

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Металне конструкције

Број индекса : 170/2017

Ана С. Недељковић

Прорачун везе у чвору решеткастог носача

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Весна Марјановић, ванредни професор Датум одбране: _____

2. _____ Оцена : _____

3. _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да :

- 1) Опише карактеристике металних конструкција
- 2) Да прикаже значај пројектовања наставака и веза
- 3) Опише везе у чворовима решеткастих носача
- 4) Изврши моделирање једне везе у чвору решеткастог носача, као и да изврши прорачун и анализу оптерећења

Препоручена литература:

1. Buđevac D., Marković Z. i dr., Metalne konstrukcije, Građevinska knjiga, Beograd, 2007.
2. Petković Z., Ostrić D., Metalne konstrukcije u mašinogradnji 1, Institut za mehanizaciju Mašinskog fakulteta u Beogradu, Beograd, 1996.
3. Nikolić R., Marjanović V., Metalne konstrukcije – Priručnik za proračune, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1998.
4. Nikolić R., Veljković J., Marjanović V., Metalne konstrukcije – Zbirka rešenih zadataka, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2013.

Ментор:

Крагујевац, август, 2020.

др Весна Марјановић, ванредни професор

Садржај

1. Увод	1
2. Средства за везу	3
2.1 Врсте наставака.....	3
2.2 Закивци.....	4
2.3 Завртњеве.....	6
2.4 Заваривање	8
3. Значај пројектовања наставака и веза	12
4. Решеткасти носачи	16
4.1 Опште одлике решеткастих носача, подела и примена	16
4.2 Правила при димензионисању решеткастих носача	20
4.3 Конструкцијско обликовање чворова решеткастих носача.....	22
5. Конструисање решеткастих носача	26
5.1 Аналитичке методе	28
5.2 Нумеричке методе	29
6. Пример прорачуна везе по Еврокоду коришћењем софтвера Robot Structural Analysis	31
6.1 Пример прорачуна везе остварене завртњевима са чворним лимом.....	32
6.2 Пример прорачуна везе остварене заваривањем са чворним лимом.....	44
7. Закључак.....	51
8. Литература	53

The summary

This work consists of multiple parts, and every one of them represents the sum of basic things needed for forming a single conjunction, in this case, in a conjunction in the lattice bracket. First shown is a short history review of using conjunctive tools, with their basic characteristics. The importance of projecting extentions and conjunctions is an important part of the work, as are its basic characteristics and a possible construction presentation of the lattice brackets. Shown is a display of possible ways for calculating constructions, in other words, the analytic and numeric method and an adequate example.

Key words : lattice girder, welding, rivet, screw, junction

Резиме

Овај рад се састоји из више целина, а свака од њих даје приказ основних ствари неопходних за формирање једне везе, у овом случају везе у чвору решеткастог носача. Првенствено је дат кратки историјски приказ коришћења спојних средстава, уз њихове основне карактеристике. Важно место у раду заузима значај пројектовања наставака и веза, као и основне карактеристике и могућа конструкциона извођења решеткастих носача. Дат је приказ могућих начина за прорачун конструкција, тј. аналитичка и нумеричка метода, као и адекватан пример који их прати.

Кључне речи : решеткасти носач, заваривање, закивак, завртањ, чвор

1. Увод

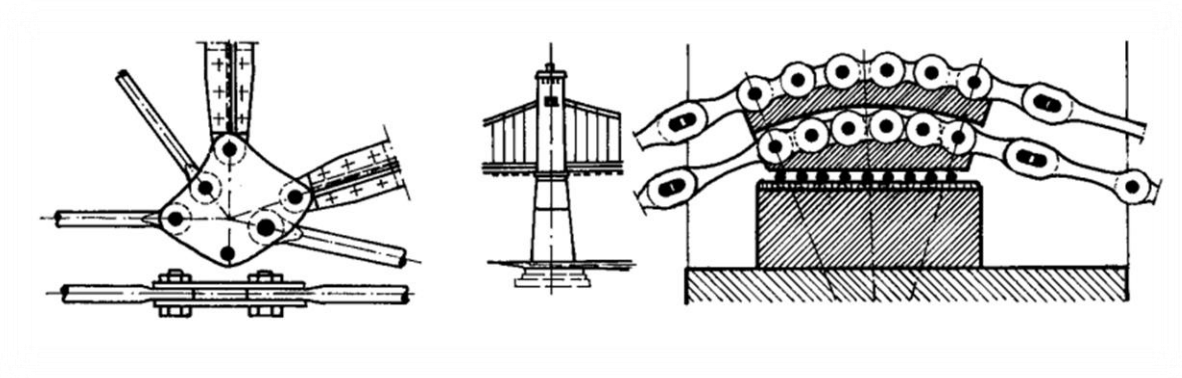
Све масовнијом изградњом и применом различитих материјала и облика при изради конструкција, стално се тежило ка неким новим формама који би на оптималан начин могле да задовоље све оне захтеве који су били наметани пред њих. Неки од тих захтева се односио на растерећење конструкције (почевши од саме масе конструкције), на смањење утрошка скупих материјала, затим на једноставност извођења, одржавања. Све ове захтеве неопходно је било уклопити првенствено са одржањем функционалности и сигурности конструкције у сваком погледу, као и са што мањим трошковима, а уз добру естетику. [1, 2]

Једно од конструктивних извођења за које се може рећи да испуњава ове услове су решеткасти носачи. Прва примена ових носача везује се за изградњу примитивних кућа током бронзаног доба. Стари Грци су такође увиђали предност ових носача, па су их користили за изградњу кровова. Примењивали су се и током средњег века, у техници и архитектури, а Леонардо Да Винчи је први имао визију, коју је касније пренео и на папир, како би се могли применити у изградњи мостова.

Решеткасти носачи су састављени од међусобно повезаних појасних штапова и штапова испуне (дијагонале и вертикале) који формирају троугаону структуру. У односу на пуне и саћасте носаче, потребно је знатно мање материјала за њихову израду, пропуштају много светлости и дају места за маневрисање, што погодује постављању инсталација и одржавању конструкције (олакшана провера закивака, завртњева, заварених места, као и боље наношење средстава за заштиту од воде, влаге, прашине, изузетно ниских или високих температура и осталих спољашњих утицаја који би могли да доведу до корозије и наруше конструкцију).

Током 19. века, када су решеткасти носачи постали све чешћи избор при изградњи мостова, везе штапова са чепом су често примењиване. У оваквим конструкцијама чепови су углавном коришћени за израду чворова код решеткастих носача (Слика 1). Тако је још 1854. године изграђен мост преко реке Елбе у Тешену, распона 119 м, а почетком 20. века и чувени Ланчани мост преко Дунава у Будимпешти, распона 290 м. На Слици 2 дат је приказ једног моста у Кини направљеног од решеткастих носача. Широка примена чепова у носећим челичним конструкцијама је проистекла из једноставних извођења и правилног статичког понашања везе. По свом понашању, ове везе су веома блиске идеално зглобним везама јер омогућавају слободну ротацију штапа на месту везе, па се у елементима не појављује момент савијања. Иако се чини да су, услед једноставности извођења и одсуства сложених оптерећења, ове везе добар избор, њихова највећа мана јесте недостатак додатне сигурности по питању носивости, јер отказивањем једног чепа, односно затеге, долази до лома читаве конструкције. Поред тога, ни одржавање, преглед и антикорозивна заштита везе нису приступачни. Због свих ових негативних карактеристика, везе остварене чеповима се готово нису ни користиле током 20. века. Међутим, развојем технологије и стварањем могућности побољшања ових веза, оне се поново враћају у употребу, али овог пута углавном за специјалне намене, нпр. код стубова где се очекују деформације услед слегања темеља, код скела, покретних мостова, за везу кука код кранова,...

Данас се за потребе остваривања веза међу елементима најчешће користе закивци, завртњеве или процеси заваривања.



Слика 1 – Примена спојева са чеповима [1]



Слика 2 – Једна од примена решеткастих носача, мост у Кини [11]

2. Средства за везу

2.1 Врсте наставака

Како ретко шта у природи, науци, животу, тако и у машиноградњи, грађевинарству, бродоградњи, мостоградњи, може да постоји само за себе, постоје средства која омогућавају међусобни контакт 2 (најмање) члана. Ти чланови су, гледајући кроз инжењерску призму, различити машински елементи многобројних намена, а та средства за везу (спојна средства) су заправо посредници међу њима. Њихова основна улога јесте да обезбеде континуитет на адекватан начин уз пренос оптерећења са једног елемента на други и њихов даљи пренос на остале делове конструкције. Појединачни елементи се израђују применом многобројних поступака: ковањем, изливањем у калупима, бризгањем, пресовањем, а њихово настављање и повезивање може се остварити помоћу механичких спојних средстава (закивака, завртњевима, чепова итд.), или технолошким поступцима (заваривањем или лепљењем). У зависности од места извођења, разликују се две врсте наставака: радионички и монтажни наставци. [1, 2]

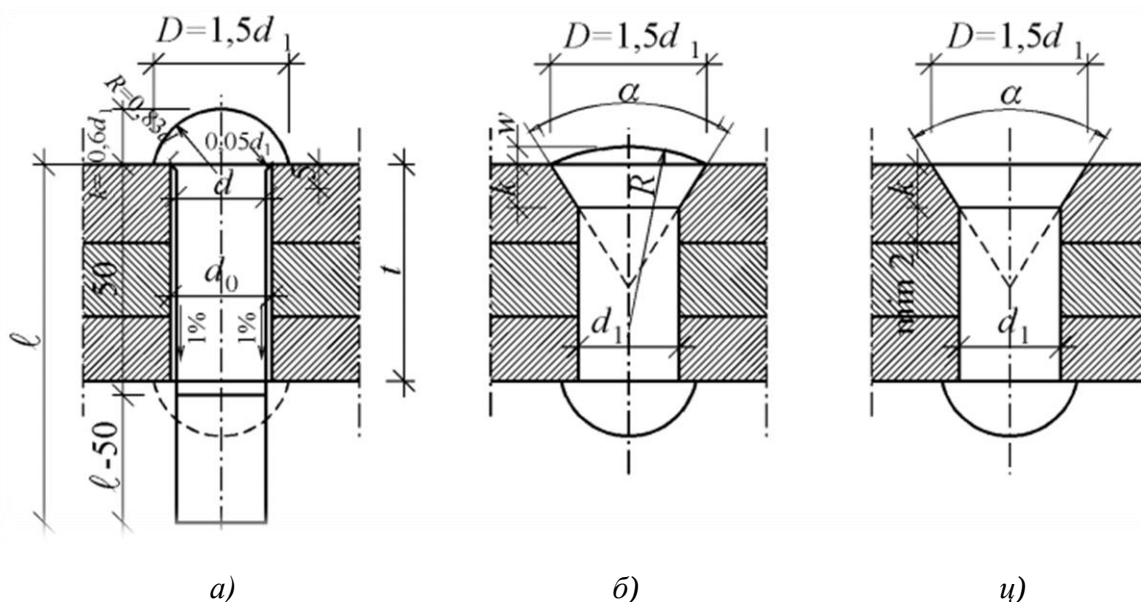
- 1) *Радионички наставци* се изводе у радионици, где се припремљени ваљаначки производи међусобно спајају и формирају просте елементе, полусклопове и склопове. Битно је да се остваре мање габаритне мере од габарита транспортног средства намењеног за њихов превоз. Прости елементи су профили који су образовани заваривањем, или спајањем ваљаних производа помоћу закивака. Полусклопови и склопови су изведени спајањем више профила у оквиру једне монтажне целине, нпр. монтажни сегмент моста. Радионички наставци се најчешће изводе заваривањем, тек понекад закивцима или завртњевима. Квалитет и димензије спојева зависе од величине и врсте утицаја које ти спојеви треба да прихвате.
- 2) *Монтажни наставци* се изводе на градилишту. Њихова улога је повезивање радионичких сегмената (полусклопова или склопова), чиме се формира јединствена целина. Избор спојних средстава за израду монтажних наставака зависи од више фактора: од врсте и величине оптерећења које наставак треба да прихвати, од брзине и начина монтаже конструкције, па и од самих услова који се разликују од једног до другог градилишта. Монтажни наставци се најчешће изводе завртњевима јер, у условима градилишта, то представља бољи избор због брзине извођења. Заваривање се у овим случајевима мање користи.

2.2 Закивци

Примена закивака почиње тридесетих година деветнаестог века и траје до данас. Они врше равномерни пренос силе дуж везе, па су се добро показали и при статичким и при динамичким оптерећењима. Рупе у вези су добро испуњене материјалом закивка, па везе имају мала проклизавања и малу деформабилност. Данас закивци имају примену само при реконструкцији и при ојачању већ постојећих конструкција израђених закивцима, ређе за израду динамички оптерећених конструкција. Са друге стране, заваривање је последњих деценија, осим у посебним случајевима, однело предност над применом закивака за израду радионичких наставака. Што се тиче израде монтажних наставака, завртњевци су их заменили због једноставности и брзине. [1, 2]

Закивци су сачињени од цилиндричног тела (врата закивка) и главе закивка. У односу на то какав је облик главе, постоје:

- закивци са полукружном главом (Слика 3.а),
- закивци са полуупуштеном главом (Слика 3.б) и
- закивци са упуштеном главом (Слика 3.ц)

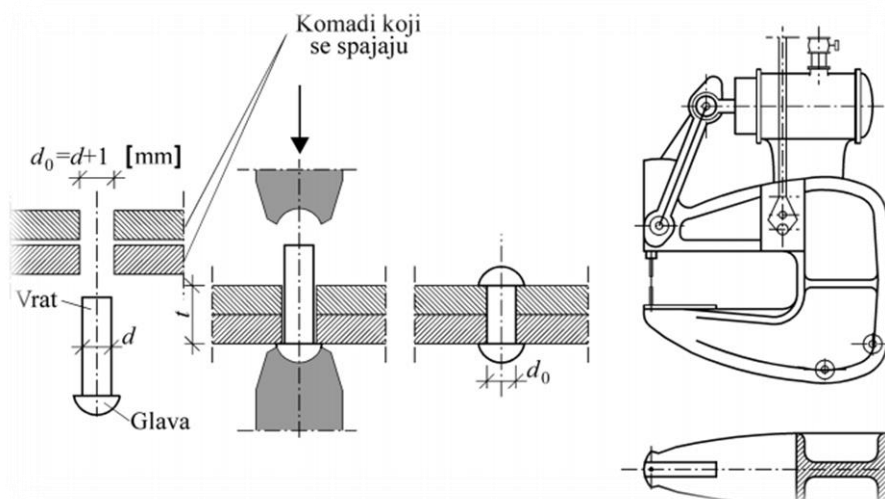


Слика 3 - врсте закивака: а) са полукружном главом;

б) са полуупуштеном главом; ц) са упуштеном главом [1]

Закивци се израђују машинским путем, најчешће од конструктивних челика квалитета 0255, 0355 и 0455, а они са полукружном главом се најчешће примењују. Уграђују се у избушене рупе, претходно загрејани до температура које одговарају ковању. Поставља се преса за закивање, па се притиском делује на главу и врат закивка. Овим поступком

се прво испуњава рупа у споју, а потом се прелази на обликовање главе са друге стране закивка (Слика 4).



Слика 4 – Израда друге главе закивка и преса за закивање [1]

Као једна од најпрепознатљивијих грађевинских конструкција, у чијем саставу лежи преко 2.5 милиона закивака, јесте Ајфелов торањ у Паризу. (Слика 5)

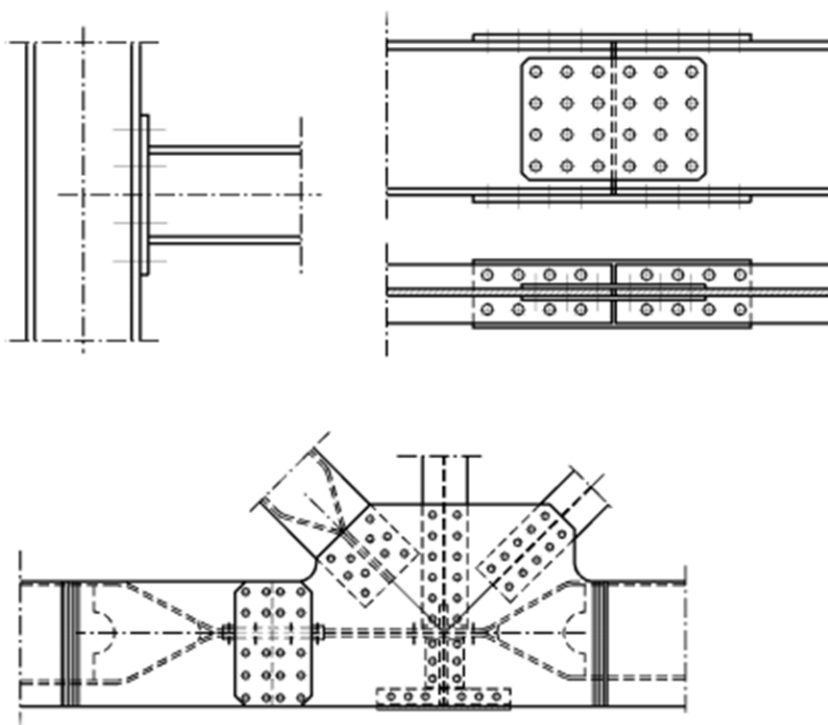


Слика 5 – Приказ закивака на Ајфеловом торњу [9]

2.3 Завртњеви

Прва механичка спојна средства која су била коришћена при спајању делова челичних конструкција били су завртњеви. Они су се јавили још у античко доба, али знатно другачији од ових који су данас познати. Према археолошким налазима, први завртњеви су били коришћени за спајање делова пумпе за наводњавање Висећих вртова у Вавилону. У Европи, гвоздени завртњеви се користе од 15. века када ливено гвожђе почиње да се употребљава за израду топова. Касније, током 19. века, почињу да се употребљавају завртњеви са прорезом, са четвороугаоном и шестоугаоном главом. С обзиром на то да су захтевали машинску израду која је била скупа, а слабо су били отпорни на замор, као добра замена за њих показали су се закивци. Касније, како се машинска индустрија све више развијала, процес израде и производње завртњева се убрзао, па су се они вратили на велика врата у употребу и постали пример квалитетног механичког спојног средства које и данас има велику примену. [1, 2]

Завртњеви представљају савремено и ефикасно спојно средство за израду, најчешће, монтажних наставака у мостogradњи и грађевинарству (Слика 6). Њихова примена је омогућила потпуну индустријализацију производње челичних конструкција. Они су, због многобројних предности, скоро у потпуности заменили закивке при изради монтажних наставака.



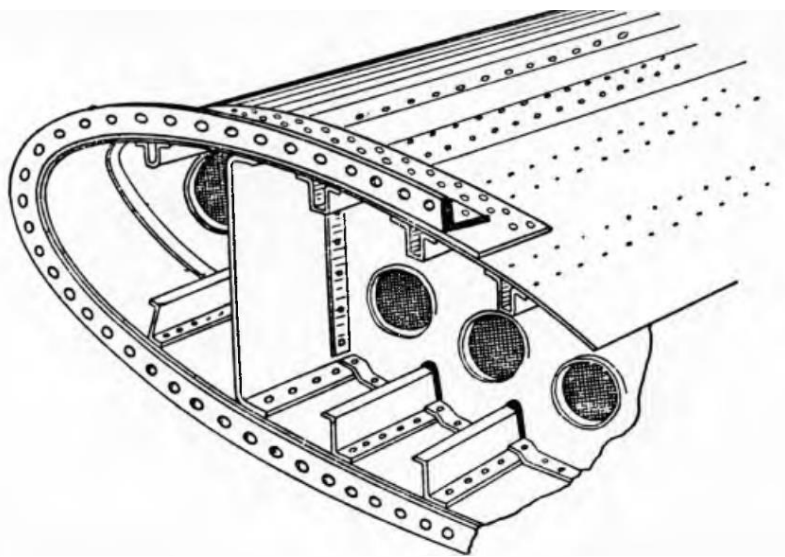
Слика 6 – Примена завртњева у мостogradњи и грађевинарству [1]

Завртњеви се израђују у фабрици машинским путем, а на монтажи се врши само њихова уградња. На тај начин се добија веома уједначен квалитет свих завртњева у

конструкцији. Да би се остварила уградња завртњева, није потребна никаква сложена опрема, нити посебно квалификована радна снага. Уградња завртњева је једноставан поступак који изводе један или два радника помоћу кључа (завијача), а сама брзина уградње је већа него код закивака. Овај вид везе се карактерише као раздвојив. Завртњевима се остварује тачкасто спајање елемената конструкције. Кроз два или више елемената који се спајају, прво се буше рупе, постављају завртњеви и навија навртка, све док се елементи међусобно не споје. Након тога, веза је одмах способна да прихвати све статичке утицаје. У завртњевима се, од оптерећења, може јавити смицање, притисак по омотачу рупе или затезање. Веома је битно водити рачуна, као и код закивака, да се правилно одреди број завртњева на једној површини, као и да се прецизира њихов распоред. Уколико ово не би било испуњено на адекватан начин, могло би да дође до јављања неправилности приликом експлоатације конструкције, нежељених дејстава, као и до слабљења основног материјала услед превеликог броја рупа формираних за закивке или завртњеве.

Поред ових обичних врста завртњева, постоје још и високовредни завртњеви. Они су почели да се појављују половином прошлог века у САД, а убрзо су се прочули и у Европи. Њих карактерише висока чврстоћа (640 – 1040 МПа) и пренос силе путем трења између притиснутих површина. Потреба за њиховим пројектовањем јавила се због оних спојева са изузетно високим напрезањима и спојева који су подвргнути динамичким напрезањима, а сусрели су се са проблемом деформисања и губитка носивости. Код ових спојева често се дешавало и одвртање навртке, па су се у околини рупе јављале велике концентрације напона. Због високе цене, користе се само у специјалним приликама.

Један од многобројних примера употребе завртњева као начина за остваривање везе у машиноградњи, дат је на Слици 7.



Слика 7 – Веза завртњевима дуж целог обима крила авиона [12]

2.4 Заваривање

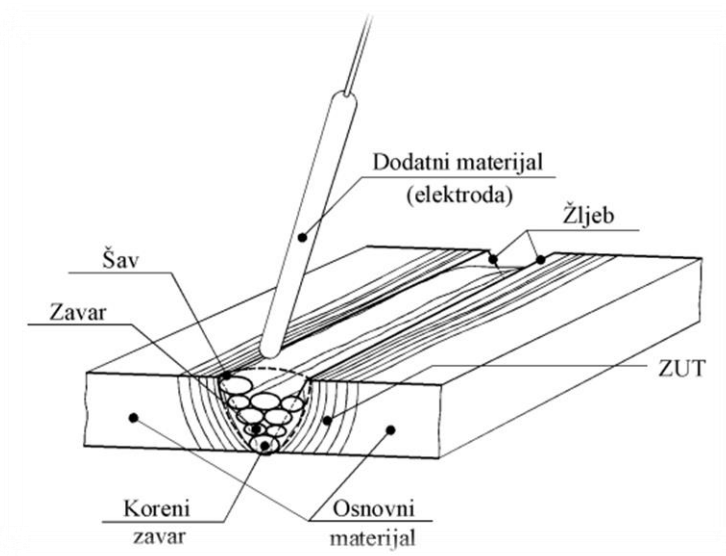
Још једно средство у низу које се користи за спајање елемената конструкције јесте заваривање. Користило се хиљадама година уназад за израду оружја, накита, посуда,... Развојем цивилизације нашло је све већу примену, а највећу експанзију доживљава тек током 20. века. Може се изводити на многобројне начине у зависности којим материјалима и средствима се располаже, најчешће у радионици. У посебним приликама се, уколико је то неопходно, може изводити и на другим местима, а посебно је занимљиво подводно електролучно заваривање. Само заваривање представља технолошки поступак спајања истих или сличних метала. Спајање елемената се изводи помоћу високе температуре која проузрокује топљење основног и додатног материјала на месту споја. Растопи основног и додатног материјала (електроде или жице за заваривање) се мешају и тада долази до њиховог физичког и хемијског сједињавања. После хлађења долази до очвршћавања и стварања шав, као и до материјалог континуитета. На овај начин се остварује континуалан спој елемената који се заварују. Основни појмови који се односе на заваривање су: основни материјал, додатни материјал, спој, шав, зона утицаја топлоте (ЗУТ), жлеб, завар. Заварљивост је особина материјала да може да се завари, а она може да се сагледа на три начина: [1, 2, 6]

- 1) Оперативна заварљивост се односи на саму могућност да се два елемента заваре, тј. да се оствари материјални континуитет уз одсуство грешака
- 2) Металуршка заварљивост која се остварује добијањем шав, одговарајућег квалитета
- 3) Конструкциона заварљивост, као способност добијеног шав, да поднесе одговарајућа оптерећења.

Задовољењем ова три услова стиче се могућност постојања квалитетног завареног споја. Међутим, поред свега тога, веома је важно да се прилагоди технологија израде, да се поседује адекватна опрема и да постоји стручна радна снага. Тек испуњењем свега овога, може се очекивати добар резултат који ће трајати и одговорити наметнутим захтевима.

Применом заваривања у грађевинским конструкцијама, почела је нова ера металних конструкција. Створене су многобројне могућности за конструисање и израду металних конструкција, проширено је поље њихове примене, а такође су примењена и нова конструкциона решења. Данас је израда металних конструкција готово незамислива без примене заваривања, које се примењује при изради елемената конструкције (профила) и њихових веза.

На Слици 8 дат је пример једног завареног споја.



Слика 8 – Пример завареног споја [1]

У зависности од тога какав квалитет шавва треба да се постигне, који су услови заваривања и која је дебљина материјала, зависиће и сама врста заваривања. Оно може бити:

- 1) Електрично заваривање : а) електролучно
б) електроотпорно
- 2) Гасно заваривање
- 3) Механичко заваривање

Електролучно заваривање је пронашло највећу примену, а као највећи представници се истичу МИГ, МАГ, ТИГ, РЕЛ.

Велика заступљеност и примена заваривања као спојног средства свакако проистиче из низа пожељних карактеристика, а неке најосновније су:

- постојање материјалног континуитета који обезбеђује правилан, континуалан ток сила из једног у други елемент везе или наставка,
- остваривање слабо деформабилних, тј. крутих веза чији се значај посебно истиче код динамички оптерећених конструкција,
- смањење тежине веза и наставака директно утиче на растерећење читаве конструкције,
- могућност варирања дебљине елемената, чиме се постижу уштеде у тежини конструкције,
- нема потребе за бушењем рупа за спојна средства, па се смањује време израде,

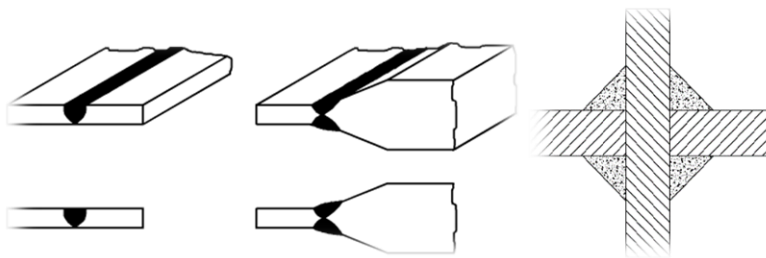
- нема слабљења елемената на оним местима на којима би били ослабљени применом закивака или завртњева,
- широк спектар конструкцијског обликовања веза између елемената различитих облика и димензија,
- могућност остваривања непропусних спојева (посебно битно при изради бункера, цистерни где може доћи до истицања опасних супстанци) и
- побољшање изгледа конструкције



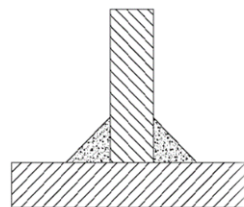
Слика 9 – Процес заваривања [13]

Још једна важна ствар односи се на сам међусобни положај елемената који се заварују, па се на основу тога разликују:

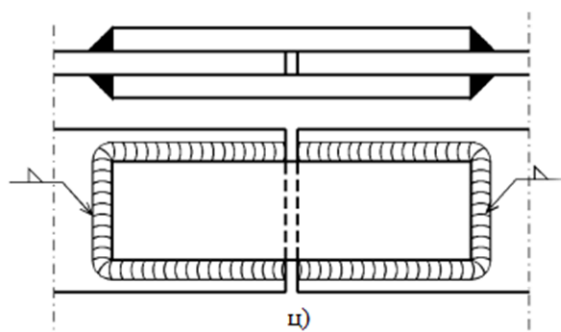
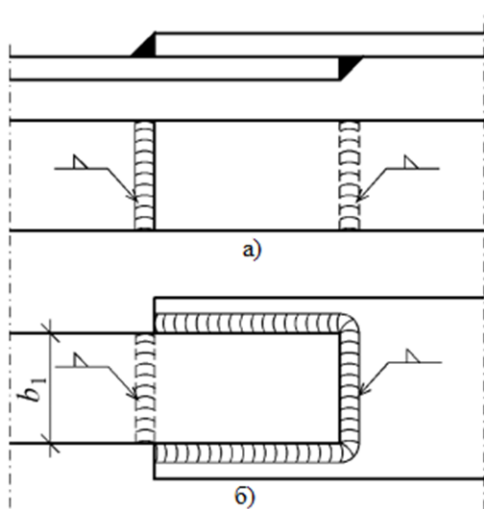
- сучеони спојеви се користе за спајање елемената који леже у истој равни, могу да се користе за елементе исте или различите дебљине (Слика 10)
- угаони или Т – спојеви могу бити прекинути или непрекинути. Као што им и сам назив каже, користе се да вежу елементе који се налазе под неким углом (Слика 11)
- преклопни спојеви јављају се код елемената који се преклапају и налазе се у две међусобно паралелне равни, а могу бити директни преклопни спојеви или преклопни спојеви са подвезама (Слика 12)



Слика 10 – Сучеони спој [1]



Слика 11 – Угаони спој [1]



Слика 12 – Преклопни спојеви; (а) и (б) – директни преклопни спојеви, (ц) – преклопни спојеви са подвезама [1]

3. Значај пројектовања наставака и веза

Специфичност пројектовања челичних конструкција лежи у томе што везе појединих конструкционих елемената не треба само пројектовати за њих саме, већ треба предвидети како ће се оне понашати и у читавим склоповима. Пре свега, конструкција везе мора својим деформационим карактеристикама да задовољи претпоставке које су предвиђене у конструктивном моделу. Везе треба конструисати као зглобне, укљештене (круте везе) или укљештене са одређеним степеном еластичности (полукруте везе). Због своје једноставности и могућности да се стандардизује производња, зглобне везе су увек јефтиније за израду од укљештених веза, па су погодне за употребу где год је то могуће. Такође, сви елементи везе треба да имају прорачунску носивост која је већа или једнака прорачунским утицајима који владају на месту везе. [1, 2, 6, 9, 10]

Поред веза између различитих конструкционих елемената, јавља се потреба да се пројектују и изводе наставци једног истог конструкционог елемента. Због ограничења димензија елемената које су условљене капацитетом транспортних средстава, као и максималних фабричких дужина челичних елемената (најчешће је максимална дужина профила или лима 12.0 м), потребно је елемент веће дужине изделити на два или више елемената, који су погодни за транспорт и монтажу. Да би се елемент на градилишту комплетно повезао, неопходно је конструисати и монтажне наставке. Места монтажних наставака су условљена технологијом монтаже, која унапред треба да се осмисли и пројектује. Треба тежити да се место наставка и везе поклапа са минималним статичким утицајима у носачу. Монтажни наставци код континуалних и оквирних носача се постављају на местима минималних вредности момената савијања. На тим местима напрезања у носачу су мала, тако да слабљење носача услед бушења рупа за завртњеве не изазива прекорачење дозвољених вредности напона. Уколико се веза изводи заваривањем, тада у тим наставцима могу да се примене угаони шавови минималних димензија, или сучеони шавови нижег квалитета. Међутим, није неуобичајено да се јави потреба за конструисањем наставака или веза носача управо на месту максималних вредности статичких утицаја. Код аксијално напрегнутих елемената утицаји у свим пресецима су исти па избором положаја наставка, односно везе не могу да се избегну максимални утицаји. У оваквим случајевима на местима наставака или веза потребно је извршити ојачавање основног пресека, које се може, на пример, обезбедити повећањем дебљине или ширине елемената везе.

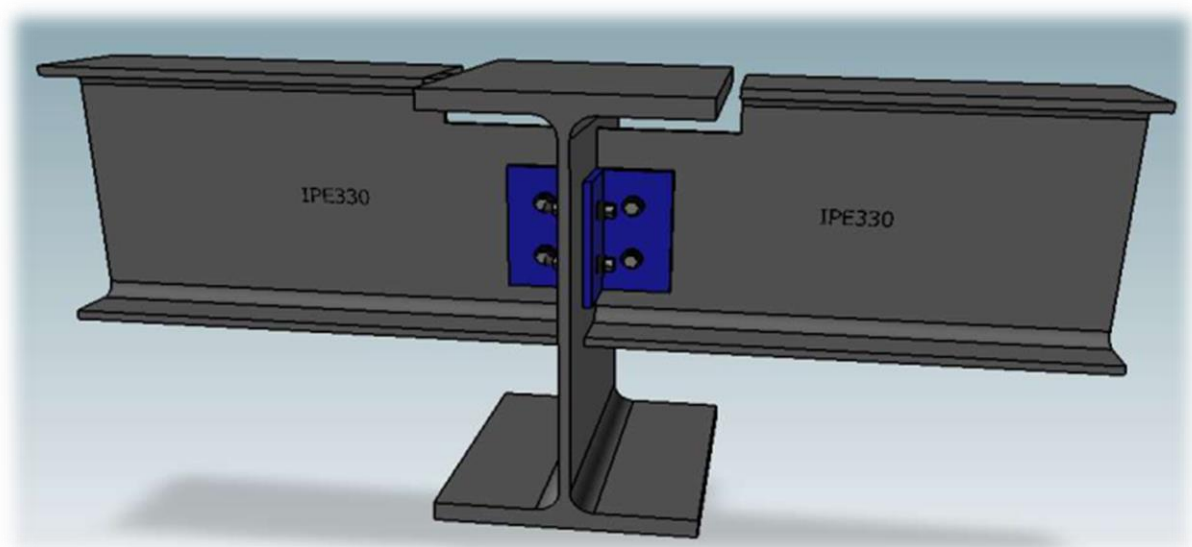
Извођењем наставака и веза у радионици и на градилишту добија се просторно повезана конструкција, пројектованог система конструкције која, заједно са темељима, има способност да прихвата пројектована оптерећења уз испуњење услова носивости и стабилности. Поред тога, треба још и да се усклади са захтеваним употребним особинама.

Једноставно речено, *наставци* се односе на међусобно повезивање делова истог елемента, а *везе* на спајање различитих елемената. И наставци и везе треба да се што лакше изводе и да теже униформности, како би се олакшало њихово извођење помоћу заваривања, закивака или помоћу завртњева. У односу на одабрано спојно средство зависиће економичност конструкције и понашање које ће испољити под оптерећењем. Заваривањем се добија хомогенији спој, а пренос сила је континуалнији. Уколико се

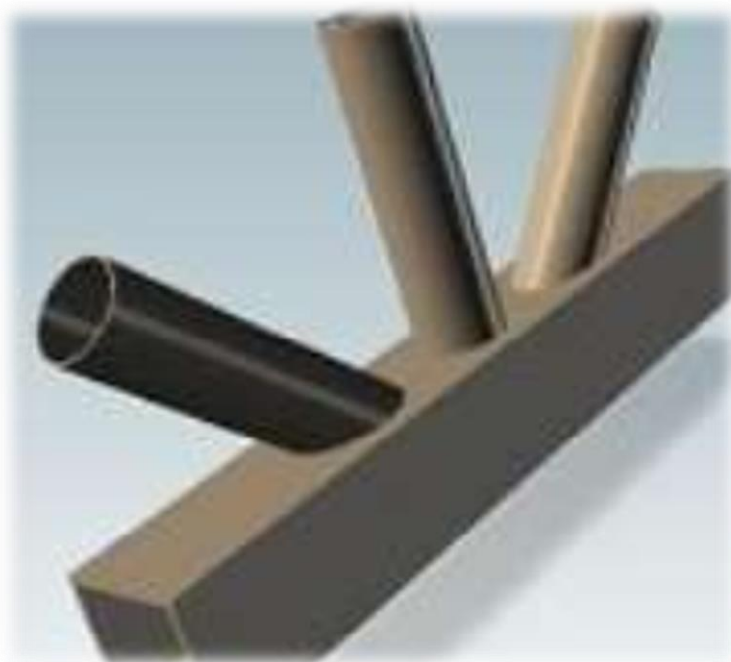
метална конструкција спаја завртњевима или закивцима остварује се тачкаст спој који није континуалан, а потребно је додати и посебне лимове – подвезе, који свакако повећавају укупну цену конструкције. Међутим, и поред додатних трошкова узрокованим подвезама, ово је и даље јефтинији и једноставнији начин спајања од заваривања јер оно, поред већ поменутих услова, изискује контролисане атмосферске услове, посебну опрему и квалификовану радну снагу. Поред тога, при заваривању може доћи до деформација елемената, као и до појаве заосталих напона. Сагледавши све позитивне и негативне особине спојних средстава, у пракси се врши дефинисање и разграничење по питању области примене. Заваривањем ће се, углавном, конструкција спајати док је у радионици, док ће се завртњеви и закивци употребити када она већ буде транспортована на градилиште.

Положај, број и врста наставака и веза у конструкцијама су условљени врстом конструкције, њеном геометријом, димензијама елемената и изабраном технологијом израде и монтаже. Када се пројектује веза два елемента, неопходно је да се обрати пажња и на рационалност и економичност предложеног решења. Овај параметар је врло тешко једнозначно одредити јер свака фирма има своје поједине специфичности које зависе од опремљености фирме за производњу и монтажу челичних конструкција. Међутим, заједничка тежња свих њих, ма колико биле међусобно различите, јесте смањење трошкова везаних за радну снагу, односно смањење времена израде елемената споја. Цена материјала за елементе споја и спојна средства је мала ако се упореди са трошковима радне снаге. Код уобичајних конструкција, тежина спојева је око 5% укупне тежине конструкције, док њихова цена може бити од 30% до 50% укупних трошкова производње конструкције.

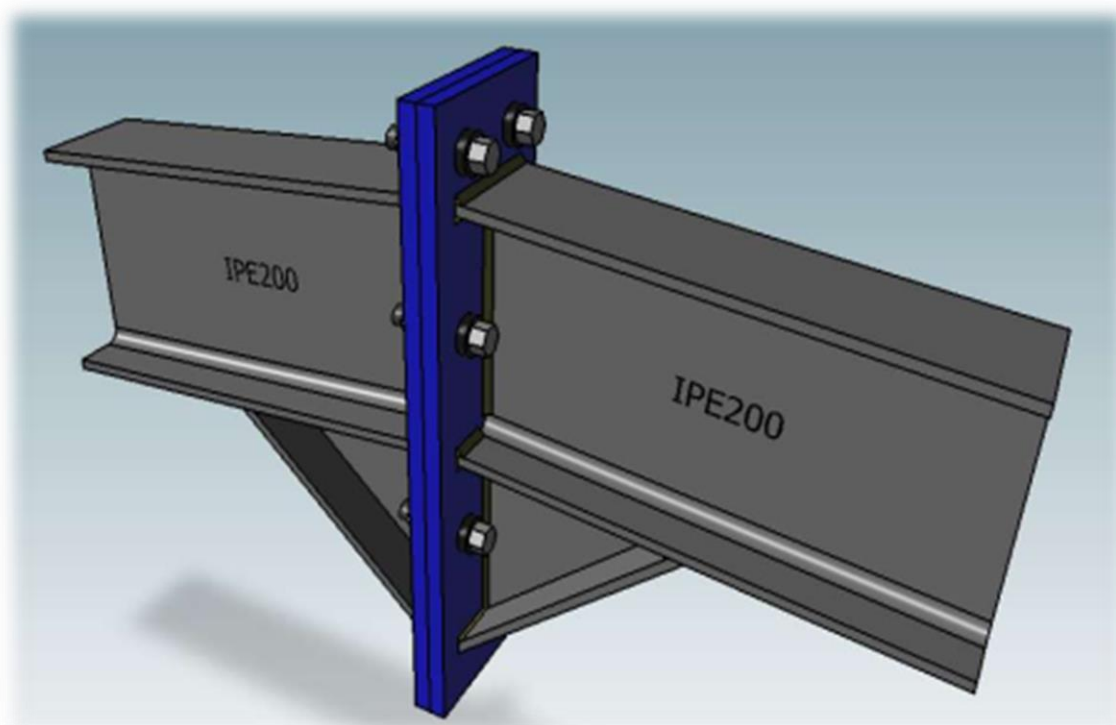
Неки од могућих примера извођења веза дати су на наредним сликама.



Слика 13 – Зглобна веза са прикључним угаоницима и спојним средствима [9]

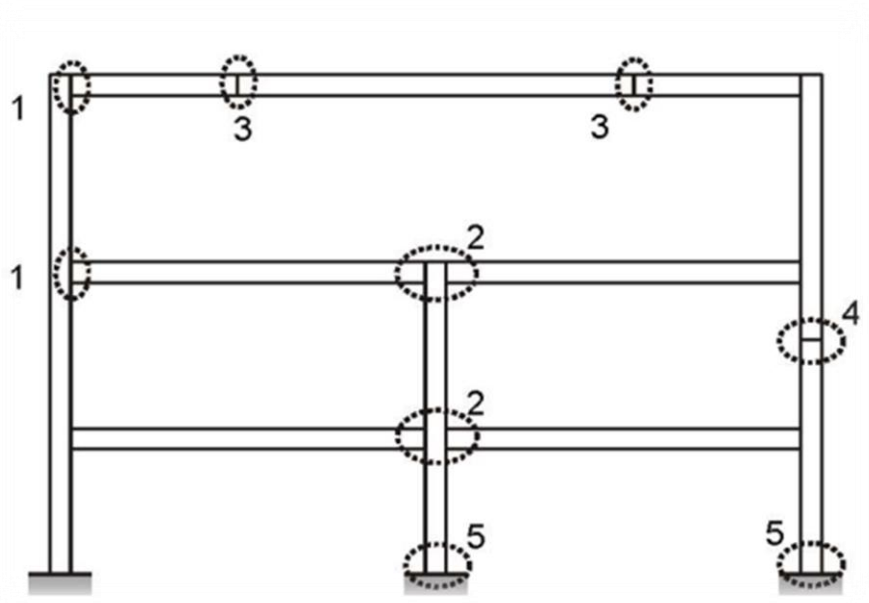


Слика 14 – Заварени спој елемената испуне за појас решеткастог носача [9]



Слика 15 – Укљештена веза са чеоним плочама и спојним средствима [9]

На следећој Слици 16 је приказан један рам са карактеристичним везама греда–стуб, монтажним наставцима на гредама и стубовима, као и везама стуб–темељ.



Слика 16 – Конфигурација веза око јаче осе [9]

Бројем (1) на слици је назначена конфигурација једностране везе греда – стуб.

Бројем (2) је назначена је конфигурација двостране везе греда – стуб.

Бројем (3) је приказан монтажни наставак греде.

Бројем (4) је приказан монтажни наставак стуба.

Бројем (5) је назначена ослоначка веза стуба.

Поред свих наведених предности које се могу остварити коришћењем наставка и веза, треба напоменути да се оне могу манифестовати само уколико се поштују препоруке које је прописао конструктор, произвођач, или било које друго одговорно лице. Стандардизовање пројектовања и производње спојева је веома важан параметар рационалног пројектовања челичних конструкција, због брзе и ефикасне производње и монтаже конструкција. Због веза које се углавном остварују уз помоћ завртњева, челичне конструкције је могуће на крају животног века демонтирати, монтирати на другом месту или челик рециклирати. На овај начин се тежи смањењу штетних утицаја узрокованих производњом и монтажом конструкција и очувању животне средине.

4. Решеткасти носачи

4.1 Опште одлике решеткастих носача, подела и примена

Решеткасте носаче карактерише веома занимљиво извођење чија примена почиње још током бронзаног доба у виду кровних носача. Користили су се годинама у својим сведеним варијантама, а Леонардо Да Винчи је први формирао озбиљније скице и разматрао могућности њихове шире примене. Тек током 19. века, решеткасти носачи доживљавају праву експанзију која траје и данас. [1, 2, 7, 14]

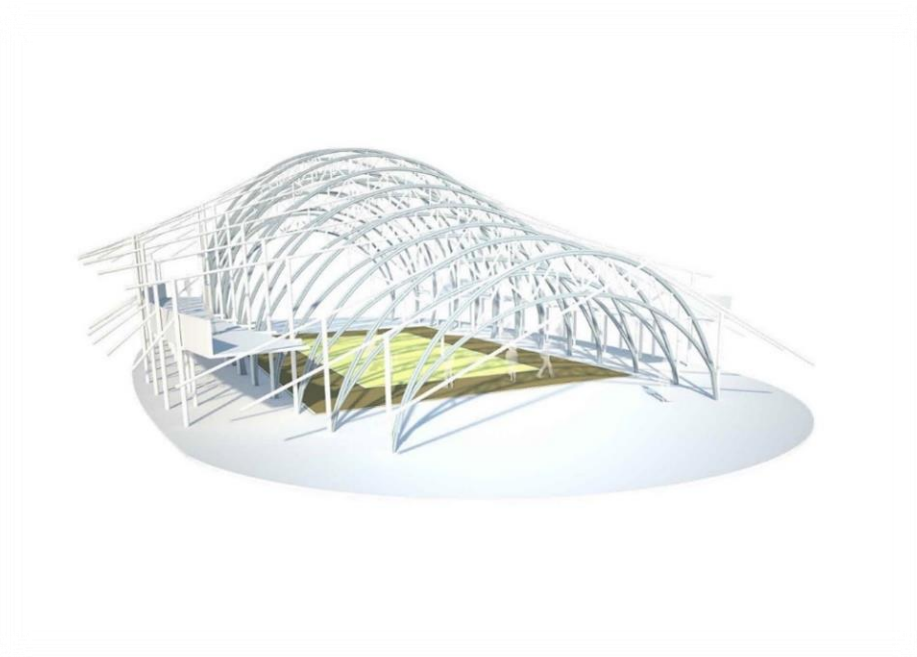
У челичним конструкцијама се решеткасти носачи користе веома често, како у грађевинарству, тако и у машиноградњи, мостogradњи. У грађевинарству се користе као: рожњаче, кровни носачи, подвлаке, подни носачи, крански носачи у индустријским халама, спрегови итд. Кровни носачи у решеткастој изради примењују се у готово свим типовима објеката од индустријских хала, преко објеката високоградње до спортских и конгресних дворана и изложбених павиљона. Избором облика решеткасте структуре могу се добити носачи веома атрактивног изгледа, тако да челична конструкција постаје саставни део ентеријера, а да ни на који начин не нарушава архитектонску целину. У машиноградњи је велика примена ових носача при изради роторних багера, конвејера, транспортних средстава и различитих врста дизалица.

Да решеткасте конструкције могу да имају веома занимљив и применљив дизајн и уколико су израђене од других материјала, говори и Слика 17, где је читава сала израђена од бамбуса. Ову фискултурну салу носе решетке од бамбуса дугачке 17 метара без икаквих металних ојачања или металних веза.



Слика 17 – Сала од бамбуса [14]

Ови носачи су израђени на лицу места и потом су подигнути краном. Решеткаста конструкција од бамбуса прошла је све статичке изазове укључујући и сеизмику и ветар. Само обликовање конструкције решеткастим носачима приказано је на Слици 18.



Слика 18 – Обликовање конструкције решеткастим носачима [14]

Велика примена решеткастих носача оправдана је низом повољних особина које поседују. Уколико се као фактор посматра потрошња материјала, решеткасти носачи су повољнији од саћастих и пуних носача. Сачињени су од међусобно повезаних појасних штапова и штапова испуне (дијагонале и вертикале) који формирају троугаону структуру. С обзиром на то да су штапови решеткастих носача аксијално напрегнути, дијаграм нормалних напона је константан, па се они могу боље користити него код пуних носача, код којих се, у области еластичног понашања, срећу нормални напони који су линеарно променљиви по висини попречног пресека. Решеткасти носачи обезбеђују већи проток светлости и омогућавају постављање инсталације без већих потешкоћа. Посебно су погодни јер омогућавају провођење инсталационих цеви између штапова испуне, па се на тај начин избегава повећање висине међуспратне конструкције. Међутим, израда решеткастих носача захтева већи број радних операција, па је јединична цена решеткастих носача виша од цене пуних носача. Пријем момента савијања код решеткастих носача одвија се помоћу појасних штапова, док су штапови испуне намењени искључиво пријему смичуће силе. Овај вид носача се примењује за пријем великих оптерећења и премошћавање већих распона, где са економског аспекта не би било пожељно користити пуне носаче.

На Слици 19 приказана је једна од многобројних примена овог вида носача.

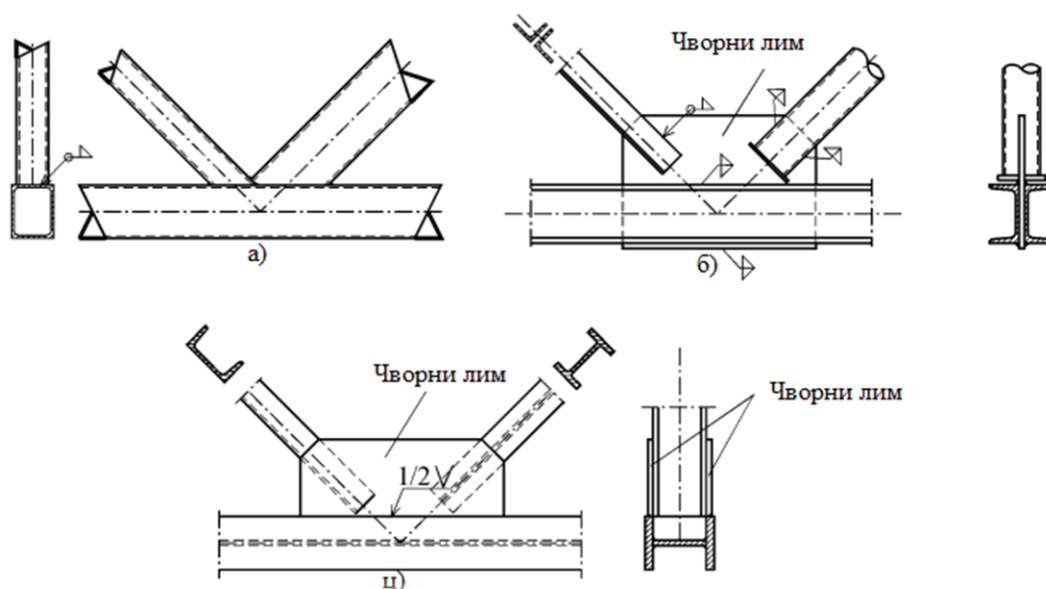


Слика 19 – Мост у Детроиту, примена решеткастих носача [15]

У мору решеткастих носача намењених многобројним применама, ради лакшег сналажења, неопходно је извршити њихову поделу. Основна подела решеткастих носача, који се могу наћи у многобројним облицима, димензијама, положајима, може се извршити :

- 1) Према броју појасева, подељени су на *двопојасне* и *вишепојасне*. Двопојасни су састављени од два појаса међусобно повезана штаповима испуне, док су вишепојасни најчешће израђени као тропојасни или четворопојасни.
- 2) Према просторном положају, решеткасти носачи су подељени на *раванске* код којих сви штапови леже у једној равни, и *просторне* чији штапови формирају просторну структуру. *Линијски просторни носачи* су они код којих је једна димензија (нпр. дужина) знатно већа од преостале две димензије. *Површински просторни решеткасти носачи* изгледом подсећају на љуске, тј. једна димензија (висина) се може занемарити у односу на преостале две.

- 3) Према интензитету напрезања, могу бити *лаки* који се најчешће користе при малим напрезањима и мирним оптерећењима, *средње тешки* који своју примену проналазе код већих распона и оптерећења значајнијих интензитета и *тешки* који се срећу приликом изградње мостова или кровних контрукција хала, тј. на местима где су очекивано велики распони и изузетно висока оптерећења.
- 4) Према начину обликовања чворова, тј. према начину остваривања споја између појасних штапова и штапова испуне, решеткасти носачи се могу поделити на *решеткасте носаче без чворног лима* и на *решеткасте носаче са чворним лимом*. Решеткасти носачи без чворног лима су носачи код којих се веза у чвору остварује директним везивањем штапова испуне за појасне штапове, било завртњевима или заваривањем. Углавном се њихова примена базира на лаким носачима, мада је могућа и примена код средње тешких и тешких носача уз коришћење адекватних хладно обликованих профила. Решеткасти носачи са чворним лимом су носачи код којих се штапови испуне и појасни штапови прикључују помоћу специјалних, додатних лимова, који се називају чворни лимови. Решеткасти носачи код којих се за прикључак користи један чворни лим називају се једнозидни решеткасти носачи и примењују код лаких и средње тешких носача у грађевинарству. Када се веза остварује преко два чворна лима који леже у две паралелне равни, говори се о решеткастим носачима који се зову двозидни решеткасти носачи.



Слика 20 – Решеткасти носач без чворног лима (а) ; решеткасти носач са чворним лимом (б – једнопојасни , ц - двопојасни) [1]

4.2 Правила при димензионисању решеткастих носача

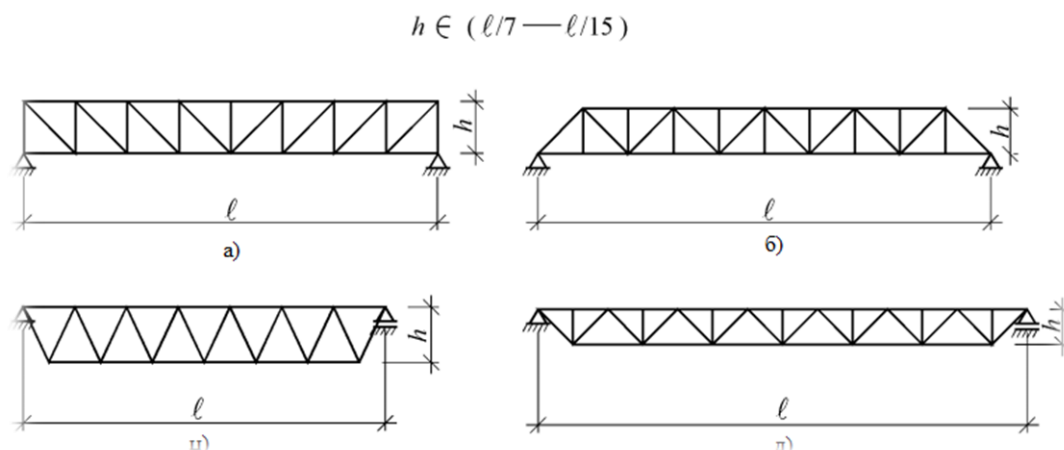
Како би се на адекватан начин спровели прорачуни, димензионисање, израда и употреба решеткастих носача, неопходно је строго поштовање одређених правила. [1, 2, 9, 10]

- 1) Прво правило се односи на то да *спољашња оптерећења треба уносити у чворовима решеткастог носача*. Овим путем се избегавају локална савијања појасних штапова, па су сви штапови изложени само дејству аксијалних сила. Међутим, код неких типова решеткастих носача, као што су рожњаче, подни и крански носачи, ово правило не може да се испоштује. Оптерећење се код ових носача не уноси посредно, преко чворова, већ директно савијањем појасних штапова, па су услед овог локалног савијања појасни штапови изложени истовременом дејству аксијалне силе и момента савијања. У таквим случајевима, појасне штапове, преко којих се директно уноси оптерећење, треба димензионисати према правилима за ексцентрично притиснуте, односно затегнуте елементе, зависно од знака аксијалне силе.
- 2) *Дужина притиснутих штапова треба да буде што мања*. Овим поступком се смањује могућност извијања притиснутих штапова, тј. повећава се његова отпорност на извијање. Смањење дужине притиснутог појаса може да се обезбеди уколико се мрежа решеткастог носача додатно повећа, тј. постане гушћа додавањем вертикала и формирањем нових чворова.
- 3) *Углови под којима се сустичу штапови решеткастих носача треба да буду већи од 30°* . Ако овај услов не би био испуњен, везе не би могле да се остваре на одговарајући начин. Код решеткастих носача са простом дијагоналном испуном најпогодније је да дијагонале са појасним штаповима заклапају угао од 60° . У случају решеткастих носача са вертикалама и дијагоналама, угао од 45° представља оптимално решење.
- 4) *Штапови решеткастих носача треба да буду прави између чворова* јер свако одступање од замишљене праве линије која спаја суседне чворове, може да доведе до појаве локалних момената савијања.
- 5) *Монтажне наставке појасних штапова треба предвидети непосредно уз чворове, са стране мање напрегнутог штапа*. Овако су монтажни наставци ослобођени евентуалних секундарних утицаја од извијања штапова и оптерећени су мањим силама, па се постиже уштеда на спојним средствима. Постављање монтажног наставка тачно на месту пресека системних линија штапова знатно компликује израду и ствара додатне трошкове.
- 6) *Појасни штапови треба да буду прави у оквиру једног монтажног комада*. На овај начин се избегавају релативно скупи радионички наставци. Уколико је потребна промена правца у оквиру једног монтажног сегмента, она треба да се оствари у чвору како би штапови испуне прихватили скретне силе.

Облици и димензије решеткастих носача првенствено зависе од врсте и интензитета оптерећења које ће преносити током експлоатације, тј. од намене за коју су предвиђени. За њихову израду се најчешће користе просте греде, континуални носачи, конзоле и

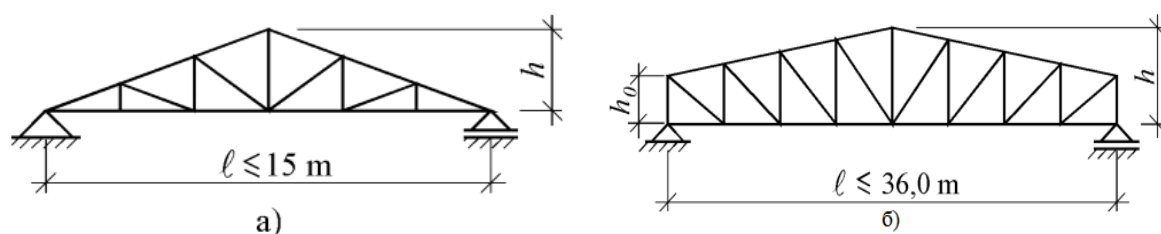
лучни носачи. Њихов облик дефинисан је геометријом појасних штапова, односно спољашњом контуром носача.

Једно од могућих извођења представљају *решеткасти носачи са паралелним појасевима* који се срећу у виду правоугаоног или трапезастог облика, уколико су изостављене ослоначке вертикале. У високоградњи се најчешће примењују као рожњаче, подни носачи, подвлаке, спрегови и крански носачи, а у мостоградњи као главни носачи и спрегови. Слика 21 даје приказ појединих носача овог типа.



Слика 21 – Решеткасти носачи са паралелним појасевима [1]

Наредно извођење односи се на *решеткасте носаче са горњим појасом у нагибу*, који су своју примену пронашли искључиво у грађевинарству као кровни носачи. По облику се могу поделити на троугаоне и полигоналне. Троугаони решеткасти носачи (Слика 22.а) се примењују код стрмих кровова са нагибом од 20 – 45 %, док се полигонални носачи (Слика 22.б) углавном примењују код кровних носача са благим нагибом (2 – 12 %). Најчешће се користе као кровни носачи већих распона у индустријским објектима.



Слика 22 – Приказ троугаоних (а) и полигоналних (б) носача [1]

Као штапови решеткастих носача користе се сви стандардни ваљани профили, како отвореног тако и затвореног попречног пресека, а поред њих ту су још и попречни

пресеци образовани заваривањем. Избор попречног пресека зависи од интензитета напрезања, начина конструкцијског обликовања веза у чворовима, положаја штапа у конструкцији (појасни или штап испуне) и предвиђене функције решеткистог носача. Различити облици попречних пресека примењују се за појасне штапове, штапове испуне, затегнуте штапове, притиснуте штапове. Избор облика попречних пресека појасних штапова и штапова испуне не може да се врши независно. Приликом избора пресека штапова, код решеткастих носача без чворног лима, треба избегавати комбинације појасних штапова и штапова испуне чије је директно везивање конструкцијски неповољно или немогуће.

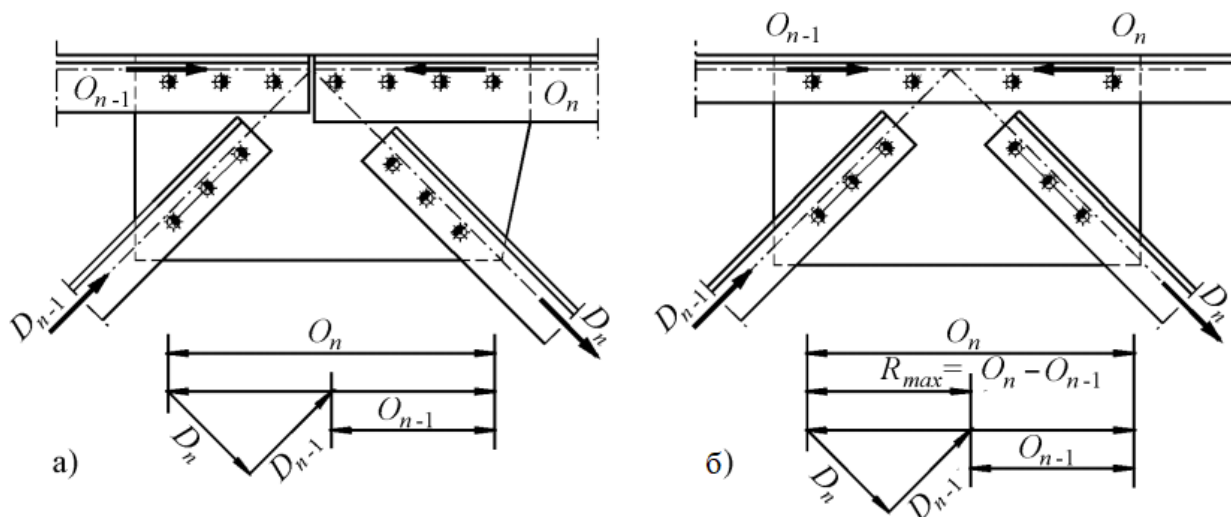
4.3 Конструкцијско обликовање чворова решеткистих носача

Посматрајући чворове решеткистих носача са становишта конструисања, увиђа се да они представљају веома осетљиве детаље. Везе појасних штапова са штаповима испуне може да се оствари директно или преко чворног лима. Директни прикључци се најчешће изводе заваривањем, мада је код појасних штапова Т-пресека могућа примена завртњева за везу штапова испуне од угаоника са ребром Т-пресека. Међутим, у већини случајева је непходна примена чворних лимова, који омогућавају индиректно увођење сила у чворове решеткистих носача. [1, 2, 8]

Уколико се користе *решеткисти носачи са чворним лимом*, при њиховој конструкцији треба имати у виду одређене препоруке које се односе на њихову једноставност и минималне димензије. Уколико су димензије чворног лима веће, већа је и крутост чвора, па се због тога повећавају секундарни утицаји услед момената савијања. Димензије чворног лима битно зависе од угла између штапова. Исувише оштри углови (мањи од 30°) проузрокују знатно веће димензије чворних лимова, па их треба избегавати. Сама улога чворних лимова је двострука. Прва се односи на омогућавање увођења сила из штапова испуне у чвор решеткистог носача, а друга је обезбеђивање равнотежа чвора. Због већ наведених чињеница, у њему се јавља сложено - двоосно напонско стање, које се не може једноставно аналитички дефинисати. Дијаграми напона у чворном лиму могу да се одреде експерименталним поступцима (нпр. напонско-оптичком анализом модела), нумеричким методама (нпр. метода коначних елемената), и директним мерењем при испитивању конструкције. Међутим, упркос овако сложеност напрезању чворног лима, при његовом димензионисању могу да се примене приближне методе засноване на стварној расподели напона. Веза чворног лима са појасним штаповима се углавном изводи заваривањем или, коришћењем механичких спојних средстава.

При прорачуну ове везе, било да је она остварена заваривањем или механичким спојним средствима, постоје два суштински различита случаја:

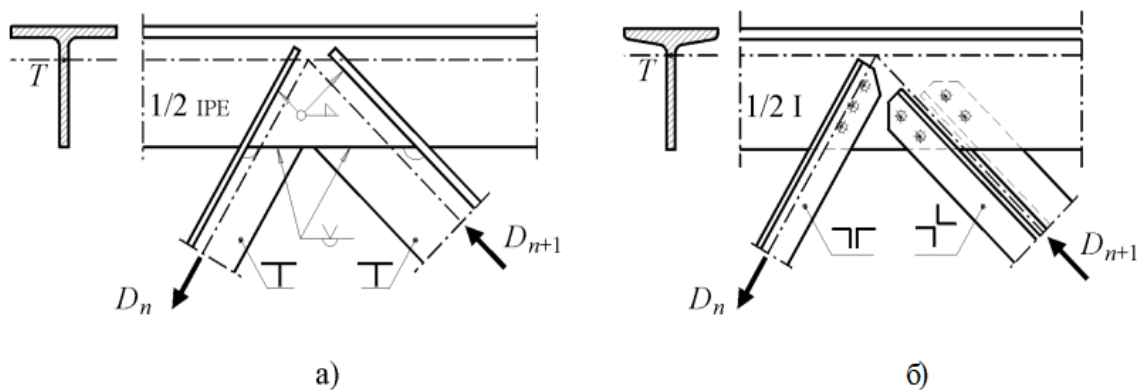
- 1) када се појасни штапови прекидају у чвору – Слика 23а)
- 2) када се појасни штапови не прекидају у чвору – Слика 23б)



Слика 23 – Веза чворног лима са појасним штаповима [1]

За остваривање везе чворног лима са појасним штаповима углавном се користи заваривање. Предности веза у завареној изради у односу на везе механичким спојним средствима су, пре свега, бржа, једноставнија и јефтинија израда. Осим тога, избегава се слабљење попречног пресека појасних штапова и самог чворног лима рупама за спојна средства.

Други могући начин извођења решеткастих носача се односи на оне *без чворних лимова*. Појава и релативно брз напредак технолошког процеса спајања метала, тј. заваривања, уз све предности које оно носи, допринели су томе да се развије овакав вид носача. Код оваквих носача веза штапова испуне се остварује директним заваривањем штапова испуне за појасеве решеткастог носача. Решеткасти носачи са појасним штаповима Т-пресека представљају пример прелаза између класичних решеткастих носача са чворним лимом и решеткастих носача без чворног лима, што је приказано на Сlici 24. Овакви чворови могу да се примењују само када је висина ребра довољна за реализацију везе штапова испуне. У супротном, на ребро се заварује чворни лим, па се такви чворови не могу сврстати у ову групу решеткастих носача. Када се појасни штапови образују од ваљаних или заварених I-профила, веза штапова испуне се остварује директним заваривањем за унутрашњу ножицу. Као штапови испуне могу да се користе ваљани I-профили и шупљи профили кружног и правоугаоног попречног пресека. На местима везе дијагоналних штапова јављају се хоризонталне и вертикалне компоненте сила. Вертикалне компоненте делују управно на појас, и само у случају мањих сила могу да се прихвате помоћу ножице I-профила. Када су силе у дијагоналама већег интензитета, да би се спречила прекомерна деформација ножице која утиче на смањење носивости везе, потребно је предвидети укрућења. Она се заварују за ножице и ребро I-профила, чиме спречавају деформацију ножице и самим тим обезбеђују правилно увођење силе у ребро појасног штапа.



Слика 24 - Чворови решеткастих носача без чворног лима код појаса T -пресека [1]

Специјалан случај решеткастих носача без чворног лима односи се на оне носаче са шупљим попречним пресеком. Ова варијанта се најчешће односи се на примену шупљих профила за носеће челичне конструкције. Производња шупљих челичних профила квадратног и правоугаоног попречног пресека, започиње у другој половини 20. века, за разлику од кружног попречног пресека који се јавља знатно раније. Поља напона и деформација на месту прикључака су нелинеарна и веома сложена, па захтевају изузетно инжењерско знање уз примену адекватних софтвера како би се дошло до одговарајућих резултата неопходних за даљи развој и примену. До самог разматрања овакве идеје дошло се посматрањем периода између два светска рата, када је највећи број челичних решеткастих конструкција од шупљих профила био је изведен са монтажним везама елемената, закивцима и чворним лимовима. Због саме чињенице да је у индустријски развијеним земљама света у току протеклих четрдесетак година значајно увећан однос цене радног сата и цене утрошеног материјала, јавила се тежња за израдом једноставнијих, директно заварених веза елемената, без примене чворних лимова или других додатних елемената. Конструисање и димензионисање веза код челичних решеткастих носача од шупљих профила без чворних лимова остварених директним заваривањем елемената, захтевају специфичан приступ у односу на традиционалне везе остварене посредством чворних лимова. Поља напона и локалних деформација на месту прикључака су нелинеарна и веома сложена па анализа понашања оваквих веза при граничном стању носивости и граничном стању употребљивости не може бити одређена само на основу аналитичких поставки. Због тога је у свету спроведен велики број експерименталних и нумеричких истраживања у циљу одређивања теоријских основа и прорачунских модела којима се одређује носивост оваквих веза. Добијени резултати базирани на теорији граничних стања, показали су да понашање оваквих веза у тренутку лома, зависе не само од геометријских карактеристика елемената у вези и квалитета основног материјала, већ и од конфигурације односно облика везе и врсте и нивоа оптерећења у појасним штаповима носача. У односу на традиционалне решеткасте носаче, одликује их већа носивост, мања потрошња материјала, мали аеродинамични коефицијент (чак 4 пута мањи него код обичних) који их квалификује за рад на отвореном, па се често примењују на местима са високом изложеношћу ветру, води, таласима, попут јарбола, антенских стубова. Коришћење унутрашњег простора је такође

чест случај у виду постављања инсталација, или пак повећања ватроотпорности испуњавањем унутрашњег дела профила бетоном. Одликује их још и једноставна монтажа, велика могућност обликовања и форми, као и смањени трошкови антикорозивне заштите услед мање површине коју је неопходно премазати. Због одсуства додатних лимова, а самим тим и оштрих ивица, нема задржавања снега, воде, влаге, који би, у класичном извођењу решеткастих носача, стварали проблем и доводили до превремене корозије. Због високе јединичне цене, као и потребе за додатном обрадом крајева елемената, овај вид решеткастих носача и даље није довољно обрађен на нашим просторима, па је и сама њихова примена мала. У свету, међутим, он заузима висок положај и тежи даљем развоју.

5. Конструисање решеткастих носача

Тренутак када је први човек узео камен да разбије плодове за исхрану, антрополози карактеришу као почетак „техничког усавршавања“ људи. Након тога, људи повезују камен за крај штапа и праве копље за лов, а управо то се може сматрати почецима конструисања. Само конструисање представља прву и најважнију фазу у реализацији неког производа. Обухвата процес одабира оптималних машина, опреме и система уз осмишљавање идеје о принципу рада, обликовању будућег производа и израду његове техничке документације. Конструктор треба првенствено да визуализује своју идеју, колико год је то могуће, па тек онда да приступи самом процесу и преносу своје идеје на папир. [1,7]

Процес конструисања се може изводити различитим методама, које су више или мање прецизне. Развојем и применом многобројних софтвера намењених различитим врстама анализа (напонским, термичким,...) добијају се прецизни резултати, а самим тим , и решења проблема постају једноставнија и опипљивија. Међутим, без основних инжењерских знања уз примену класичних, традиционалних метода испитивања и прорачуна, сви ови софтвери би били бескорисни. Они су ту како би потврдили већ очекиване резултате, смањили време прорачуна и утицај могуће људске грешке.

Класично, конвенционално или традиционално конструисање спроводи се кроз више итерација. Прво се врши одабир концепције у складу са димензијама простора за који се врши пројектовање одређене решеткасте конструкције. Ово највише зависи од самог искуства конструктора, одређених препорука, жеља произвођача,... Затим се приступа димензионисању попречних пресека које треба прилагодити задатим условима конструкције. Не треба заборавити ни спојна средства, а поред њих ни константну тежњу за што мањом масом конструкције , а уз трошкове који ће се уклопити у предвиђени буџет. Ова метода представља један велики посао, уз честа враћања ради измене почетног плана, па уколико треба испоштовати временске рокове, што је најчешћи случај, не даје добре резултате. Због свих тих недостатака традиционалног конструисања, јавила се потреба за стварањем додатних алата који би читав овај процес убрзали, а самим тим и оправдали паролу да време значи новац на пољу инжењерства.

На Слици 25 је дат алгоритам конвенционалног поступка конструисања решеткастих носача.



Слика 25 – Конвенционални поступак конструисања решеткастих носача [7]

Да би прелазак са конвенционалних и традиционалних приступа конструисања решеткастих носача на *савремене методе* био могућ, захтева се адекватно познавање процеса конструисања решеткастих носача како би он био унапређен. Нови приступи подразумевају примену доступних, као и развој нових софтвера за пројектовање металних конструкција, примену поступка оптимизације и рационализације процеса конструисања. Применом савремених поступака омогућава се налажење решења носећих конструкција одговарајућих карактеристика. Развој оваквих конструкција је заснован на правилној расподели напона, дефинисању адекватне структуре уз контролу стабилности елемената и испуњење реалних ограничења при експлоатацији конструкције. Ово доприноси могућности да се формирају конструкције мањих маса и површина елемената, што директно доводи до уштеда. Циљ развоја ових технологија огледа се у добијању јефтинијих конструкција истих техничких карактеристика. Овакав приступ убрзава процес конструисања и смањује деловање конструктора на квалитет коначног решења, па самим тим доводи до избегавања могућих грешака услед људског фактора. Нижи трошкови овако добијених конструкција се кроз смањење масе преносе на уштеде у трошковима транспорта, површинске заштите и радне снаге потребне за израду.

5.1 Аналитичке методе

Аналитичке методе прорачуна решеткастих конструкција својствене су конвенционалном приступу конструисања. Помоћу њих се могу одредити сигурност и функционалност решеткасте конструкције које се заснивају на провери сила, тј. напона у штаповима, као и провера тих добијених вредности у односу на критичне. Због постојања прекобројних веза код готово свих, осим елементарних решеткастих носача, није их могуће решити помоћу статичких услова равнотеже. Степен неодређености дефинисан је бројем прекобројних веза. За решавање статички неодређених система морају се формулисати, поред статичких једначина, још и допунске једначине. Њихов број се поклапа са бројем статички непознатих величина, односно прекобројних веза. Овај поступак је веома захтеван и може довести до већих грешака. [1, 7]

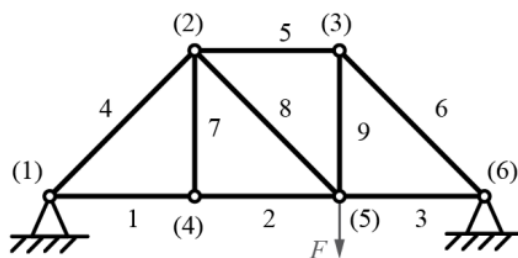
Решење статички неодређених проблема се може добити применом методе сила, методе пресека или неке друге методе настале комбинацијом претходне две.

Метода сила се заснива на уравнотежавању система сила у чворовима. Како све силе у овом случају пролазе кроз чвор, ни једна од њих не ствара момент, па не постоји потреба за једначином суме момената. Једначине које изражавају овај случај су:

$$\sum F_x = 0 \quad (1)$$

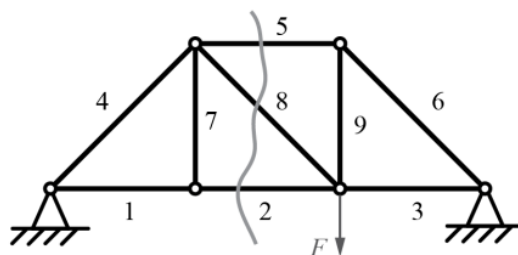
$$\sum F_y = 0 \quad (2)$$

Ове једначине се постављају за сваки чвор, па се, помоћу Слике 26 може рећи да ће их бити 12.



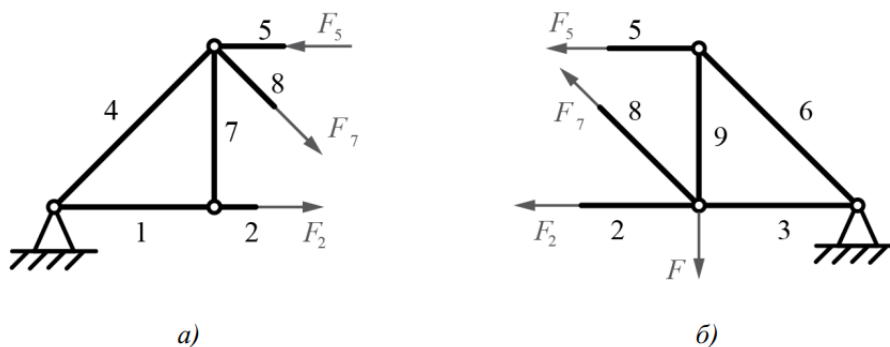
Слика 26 - Пример прорачуна методом сила [7]

Метода пресека се односи на посматрање пресеченог дела конструкције уз услов да се обе стране посматрају парцијално, као круто тело (Слика 27).



Слика 27 – Пример прорачуна методом пресека [7]

Да би се добиле силе у штаповима 2, 5, 8, прорачун ће се вршити за обе стране, и за леву и за десну. Приказ сила са обе стране дат је Сликаом 28.



Слика 28 - Приказ сила у штаповима са леве (а) и десне (б) стране [7]

У овом случају је неопходно поставити по три једначине за обе стране, и то:

$$\sum F_x = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_z = 0 \quad (3)$$

Поред уобичајених провера на чврстоћу, неопходно је одрадити још низ провера како би конструкција задовољила задате услове и са сигурношћу била спремна за све услове током експлоатације. Како се, повећањем сложености конструкције, додатно компликују и услови и једначине које треба задовољити, прелазе се могућности које аналитичка метода може да задовољи. На оваквим местима предност се даје софтверима и новим, нумеричким методама.

5.2 Нумеричке методе

Потребом за развојем све сложенијих конструкција, данашњи проблеми њихових прорачуна се заснивају на употреби рачунара. Силе и напони унутар штапова се у софтверима најчешће прорачунавају коришћењем нумеричких метода. Нумеричке методе се могу поделити на континуалне и дискретне. Континуалне методе које користе системе диференцијалних једначина су методе коначних разлика и методе нумеричке интеграције. Дискретне методе подразумевају методу померања, методу сила и методу коначних елемената, која је највише примењена у области решеткастих конструкција. [7]

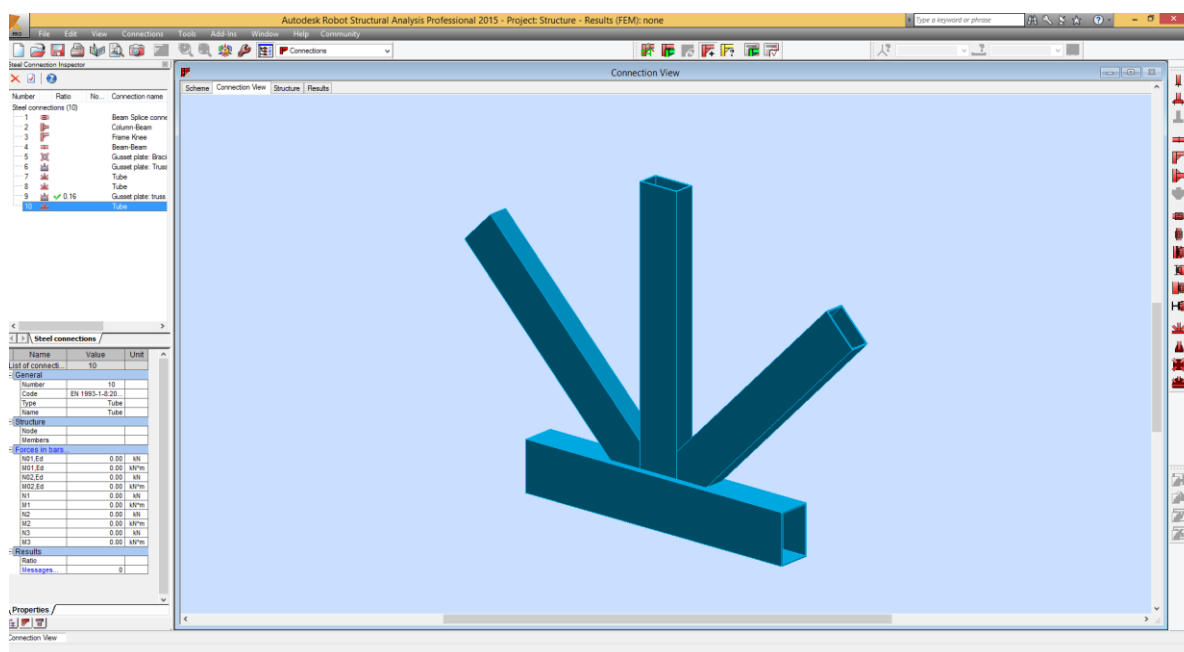
Метода коначних елемената, или краће МКЕ (енг. *Finite Element Method – FEM*), заснована је на дискретизацији континуума конструкције једноставним деловима са коначним димензијама, тј. поделом читаве конструкције на коначно много делова. Анализа методом коначних елемената је нумеричка метода која захтева коришћење

адекватних типова елемената како би дискретизација конструкције што реалније приказала понашање при спољашњим утицајима. Модели конструкција се апроксимирају моделима који су састављени од коначних елемената, тако да представљају структуру која се прорачунава. Повећањем елементарних делова, повећава се и сложеност прорачуна, чиме се добијају прецизнији резултати. У зависности од тога шта се испитује, и за коју намену, зависиће и тражена прецизност резултата. Проблеми нумеричког одређивања напона код решеткастих конструкција се свде на проблеме 1D елемената како би било могуће брзо добијање задовољавајућих резултата са најмањим бројем коришћених елемената. Код прорачуна веза се најчешће користе 2D или 3D елементи како би се добила што реалнија слика напонског стања у конкретном посматраном сегменту конструкције.

6. Пример прорачуна везе по Еврокоду коришћењем софтвера Robot Structural Analysis

Једна од могућих примена софтвера Robot Structural Analysis, а која ће бити приказана у оквиру наредна два примера, је прорачун оптерећења и деформација на основу задатих геометријских параметара потребних профила и датих сила. Овим поступком се значајно скраћује време прорачуна, па се врло лако може вршити велики број итерација, док се не добију оптималне вредности резултата, тј. све док их програм у потпуности не верификује. Велика предност овог вида прорачуна лежи у могућности да се у било ком тренутку могу променити сви задати параметри (облици и величине попречног пресека, габаритне мере, број закивака или завртњева, дебљина шава,...), па се самим тим, може лепо испратити и понашање везе при новонасталим условима.

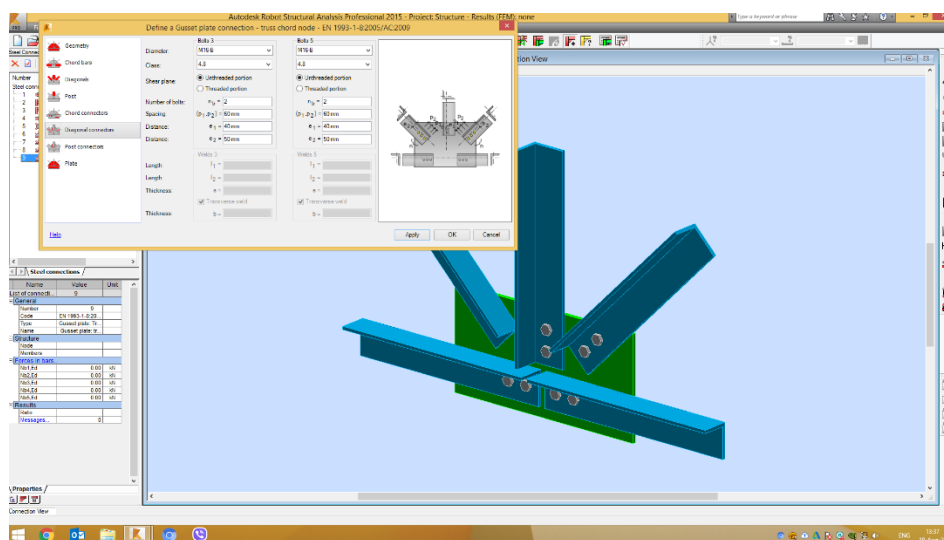
На Слици 29 дат је приказ једне везе кутијастих профила остварене заваривањем.



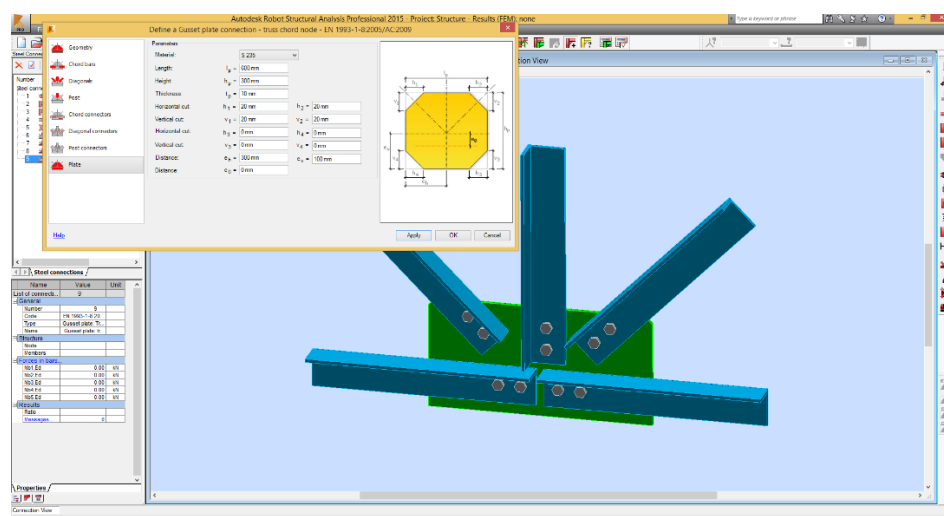
Слика 29 – Приказ везе кутијастих профила остварене заваривањем без чворног лима и без прекидања појасних штапова

6.1 Пример прорачуна везе остварене завртњевима са чворним лимом

У оквиру овог примера коришћен је L - профил и за појасеве, као и за дијагонале и вертикале, уз постојање чворног лима. Појасни штапови су прекинути, док је број завртњева у оквиру једног појасног штапа / дијагонале/ вертикале једнак 2. Сви ови параметри, као и задате силе, могу бити промењени у било ком тренутку уколико је то потребно. На Слици 30 се може видети процес подешавања броја завртњева, као и подешавање њихове позиције на појасу / дијагонали / вертикали, док се на Слици 31 приказује могућност модификације чворног лима.



Слика 30 – Подешавање броја завртњева и њихове позиције



Слика 31 – Модификација чворног лима



Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015

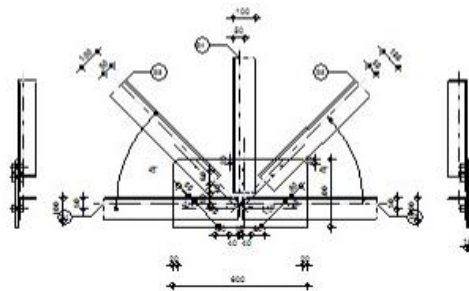
Calculations of the connection with the gusset plate



Ratio
0.31

EN 1993-1-8:2005/AC:2009

D1 - CAI100x80x9
D2 - CAI100x80x9
D3 - CAI100x80x9
D4 - CAI100x80x9
D5 - CAI100x80x9



GENERAL

Connection no.: 9
Connection name: Gusset plate: truss chord node

GEOMETRY

BARS

	Bar 1	Bar 2	Bar 3	Bar 4	Bar 5	
Section:	CAI 100x80x9	CAI 100x80x9	CAI 100x80x9	CAI 100x80x9	CAI 100x80x9	
h	100	100	100	100	100	mm
b _f	80	80	80	80	80	mm
t _w	9	9	9	9	9	mm
t _f	9	9	9	9	9	mm
r	8	8	8	8	8	mm
A	15.48	15.48	15.48	15.48	15.48	cm ²
Material:	S 235	S 235	S 235	S 235	S 235	
f _y	235.00	235.00	235.00	235.00	235.00	MPa
f _u	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	MPa
Angle	α	0.0	0.0	45.0	90.0	Deg

BOLTS

Bar 1

The shear plane passes through the UNTHREADED portion of the bolt.

Class = 4.8 Bolt class
d = 16 [mm] Bolt diameter

A
G

$d_0 = 18$ [mm] Bolt opening diameter
 $A_s = 1.57$ [cm²] Effective section area of a bolt
 $A_v = 2.01$ [cm²] Area of bolt section
 $f_{yb} = 320.00$ [MPa] Yield point
 $f_{ub} = 400.00$ [MPa] Bolt tensile resistance
 $n = 2$ Number of bolt columns
 Bolt spacing 60 [mm]
 $e_1 = 40$ [mm] Distance of the center of gravity of first bolt from the member end
 $e_2 = 50$ [mm] Distance of the axis of bolts from the member edge
 $e_c = 10$ [mm] Distance of the member end from the point of intersection of member axes

Bar 2

The shear plane passes through the UNTHREADED portion of the bolt.

Class = 4.8 Bolt class
 $d = 16$ [mm] Bolt diameter
 $d_0 = 18$ [mm] Bolt opening diameter
 $A_s = 1.57$ [cm²] Effective section area of a bolt
 $A_v = 2.01$ [cm²] Area of bolt section
 $f_{yb} = 320.00$ [MPa] Yield point
 $f_{ub} = 400.00$ [MPa] Bolt tensile resistance
 $n = 2$ Number of bolt columns
 Bolt spacing 60 [mm]
 $e_1 = 40$ [mm] Distance of the center of gravity of first bolt from the member end
 $e_2 = 50$ [mm] Distance of the axis of bolts from the member edge
 $e_c = 10$ [mm] Distance of the member end from the point of intersection of member axes



Bar 3

The shear plane passes through the UNTHREADED portion of the bolt.

Class = 4.8 Bolt class
 $d = 16$ [mm] Bolt diameter
 $d_0 = 18$ [mm] Bolt opening diameter
 $A_s = 1.57$ [cm²] Effective section area of a bolt
 $A_v = 2.01$ [cm²] Area of bolt section
 $f_{yb} = 320.00$ [MPa] Yield point
 $f_{ub} = 400.00$ [MPa] Bolt tensile resistance
 $n = 2$ Number of bolt columns
 Bolt spacing 60 [mm]
 $e_1 = 40$ [mm] Distance of the center of gravity of first bolt from the member end
 $e_2 = 50$ [mm] Distance of the axis of bolts from the member edge
 $e_c = 150$ [mm] Distance of the member end from the point of intersection of member axes

Bar 4

The shear plane passes through the UNTHREADED portion of the bolt.

Class = 4.8 Bolt class
 $d = 16$ [mm] Bolt diameter
 $d_0 = 18$ [mm] Bolt opening diameter
 $A_s = 1.57$ [cm²] Effective section area of a bolt
 $A_v = 2.01$ [cm²] Area of bolt section
 $f_{yb} = 320.00$ [MPa] Yield point
 $f_{ub} = 400.00$ [MPa] Bolt tensile resistance
 $n = 2$ Number of bolt columns



Bolt spacing 60 [mm]
 $e_1 = 40$ [mm] Distance of the center of gravity of first bolt from the member end
 $e_2 = 50$ [mm] Distance of the axis of bolts from the member edge
 $e_c = 50$ [mm] Distance of the member end from the point of intersection of member axes

Bar 5

The shear plane passes through the UNTHREADED portion of the bolt.

Class = 4.8 Bolt class
 $d = 16$ [mm] Bolt diameter
 $d_0 = 18$ [mm] Bolt opening diameter
 $A_s = 1.57$ [cm²] Effective section area of a bolt
 $A_v = 2.01$ [cm²] Area of bolt section
 $f_{yb} = 320.00$ [MPa] Yield point
 $f_{ub} = 400.00$ [MPa] Bolt tensile resistance
 $n = 2$ Number of bolt columns
Bolt spacing 60 [mm]
 $e_1 = 40$ [mm] Distance of the center of gravity of first bolt from the member end
 $e_2 = 50$ [mm] Distance of the axis of bolts from the member edge
 $e_c = 150$ [mm] Distance of the member end from the point of intersection of member axes

GUSSET PLATE

$l_p = 600$ [mm] Plate length
 $h_p = 300$ [mm] Plate height
 $t_p = 10$ [mm] Plate thickness

△

Parameters

$h_1 = 20$ [mm] Cut
 $v_1 = 20$ [mm] Cut
 $h_2 = 20$ [mm] Cut
 $v_2 = 20$ [mm] Cut
 $h_3 = 0$ [mm] Cut
 $v_3 = 0$ [mm] Cut
 $h_4 = 0$ [mm] Cut
 $v_4 = 0$ [mm] Cut

Center of gravity of the plate with respect to the center of gravity of bars (0; 50)

$e_v = 100$ [mm] Vertical distance of the plate edge from the point of intersection of member axes
 $e_H = 300$ [mm] Horizontal distance of the plate edge from the point of intersection of member axes
 $e_0 = 0$ [mm] Distance to chord axis (horiz.)
Material: S 235
 $f_y = 235.00$ [MPa] Resistance

MATERIAL FACTORS

$\gamma_{M0} = 1.00$ Partial safety factor [2.2]
 $\gamma_{M2} = 1.25$ Partial safety factor [2.2]

LOADS

Case: Manual calculations.

$N_{b1,Ed}$	=	15.00	[kN]	Axial force
$N_{b2,Ed}$	=	15.00	[kN]	Axial force
$N_{b3,Ed}$	=	10.00	[kN]	Axial force
$N_{b4,Ed}$	=	10.00	[kN]	Axial force
$N_{b5,Ed}$	=	20.00	[kN]	Axial force

RESULTS

BAR 1

BOLT CAPACITIES

$$F_{v,Rd} = 38.60 \text{ [kN]} \quad \text{Shear resistance of the shank of a single bolt} \quad F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$$

Bolt bearing on the bar

Direction x

$$k_{1x} = 2.50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2.50 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bx} = 0.74 \quad \text{Coefficient determined by bolt spacing} \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0.74 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd1x} = 76.80 \text{ [kN]} \quad \text{Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall } F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Direction z

$$k_{1z} = 2.50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2.50 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bz} = 0.93 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 0.93 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd1z} = 96.00 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Bolt bearing on the plate

Direction x

$$k_{1x} = 2.50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2.50 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bx} = 0.86 \quad \text{Coefficient determined by bolt spacing} \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0.86 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2x} = 99.20 \text{ [kN]} \quad \text{Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall } F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Direction z

$$k_{1z} = 2.50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2.50 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bz} = 1.00 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1.00 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2z} = 115.20 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

VERIFICATION OF A CONNECTION DUE TO FORCES ACTING ON BOLTS

Bolt shear

$$e = 19 \text{ [mm]} \quad \text{Axial force eccentricity relative to the bolt axis}$$

$$M_0 = 0.29 \text{ [kN}\cdot\text{m]} \quad \text{Real bending moment} \quad M_0 = N_{b1,Ed} \cdot e$$

$$F_{Nsd} = 7.50 \text{ [kN]} \quad \text{Component force in a bolt due to influence of the longitudinal force} \quad F_{Nsd} = N_{b1,Ed} / n$$

$F_{MSd} = 4.80$	[kN]	Component force in a bolt due to influence of the moment	$F_{MSd} = M_0 * x_{max} / \sum x_i^2$
$F_{x,Ed} = 7.50$	[kN]	Design total force in a bolt on the direction x	$F_{x,Ed} = F_{NSd}$
$F_{z,Ed} = 4.80$	[kN]	Design total force in a bolt on the direction z	$F_{z,Ed} = F_{MSd}$
$F_{Ed} = 8.90$	[kN]	Resultant shear force in a bolt	$F_{Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$
$F_{Rdx} = 76.80$	[kN]	Effective design capacity of a bolt on the direction x	$F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$
$F_{Rdz} = 96.00$	[kN]	Effective design capacity of a bolt on the direction z	$F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$
$ F_{x,Ed} \leq F_{Rdx}$		$ 7.50 < 76.80$	verified (0.10)
$ F_{z,Ed} \leq F_{Rdz}$		$ 4.80 < 96.00$	verified (0.05)
$F_{Ed} \leq F_{vRd}$		$8.90 < 38.60$	verified (0.23)

VERIFICATION OF A SECTION WEAKENED BY OPENINGS

$\beta_2 = 0.50$		Reduction coefficient	[Table 3.8]
$A_{net} = 13.86$	[cm ²]	Net cross-sectional area	$A_{net} = A - d_0 * t_{f1}$
$N_{u,Rd} = 199.54$	[kN]	Design plastic resistance of the net section	$N_{u,Rd} = (\beta_2 * A_{net} * f_{u1}) / \gamma_{M2}$
$N_{pl,Rd} = 327.34$	[kN]	Design plastic resistance of the gross section	$N_{pl,Rd} = (0.9 * A * f_{y1}) / \gamma_{M2}$
$ N_{b1,Ed} \leq N_{u,Rd}$		$ 15.00 < 199.54$	verified (0.08)
$ N_{b1,Ed} \leq N_{pl,Rd}$		$ 15.00 < 327.34$	verified (0.05)

BAR VERIFICATION - BLOCK TEARING

$A_{nt} = 3.69$	[cm ²]	Net area of the section in tension	
$A_{nv} = 6.57$	[cm ²]	Area of the section in shear	
$V_{effRd} = 142.28$	[kN]	Design capacity of a section weakened by openings	$V_{effRd} = 0.5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$
$ N_{b1,Ed} \leq V_{effRd}$		$ 15.00 < 142.28$	verified (0.11)

BAR 2

BOLT CAPACITIES

$F_{v,Rd} = 38.60$	[kN]	Shear resistance of the shank of a single bolt	$F_{v,Rd} = 0.6 * f_{ub} * A_v * m / \gamma_{M2}$
--------------------	------	--	---

Bolt bearing on the bar

Direction x			
$k_{1x} = 2.50$		Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_{1x} = \min[2.8 * (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1x} > 0.0$		$2.50 > 0.00$	verified
$\alpha_{bx} = 0.74$		Coefficient determined by bolt spacing	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bx} > 0.0$		$0.74 > 0.00$	verified
$F_{b,Rd1x} = 76.80$	[kN]	Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall	$F_{b,Rd1x} = k_{1x} * \alpha_{bx} * f_u * d * t_f / \gamma_{M2}$
Direction z			
$k_{1z} = 2.50$		Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 * (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 * (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1z} > 0.0$		$2.50 > 0.00$	verified
$\alpha_{bz} = 0.93$		Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bz} > 0.0$		$0.93 > 0.00$	verified
$F_{b,Rd1z} = 96.00$	[kN]	Bearing resistance of a single bolt	$F_{b,Rd1z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t_f / \gamma_{M2}$

Bolt bearing on the plate

Direction x			
$k_{1x} = 2.50$		Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_1 = \min[2.8 * (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1x} > 0.0$		$2.50 > 0.00$	verified
$\alpha_{bx} = 0.86$		Coefficient determined by bolt spacing	

$$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_{u'}] = 0.86 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2x} = 99.20 \text{ [kN]} \quad \text{Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall } F_{b,Rd2x} = k_1 \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Direction z

$$k_{1z} = 2.50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2.50 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bz} = 1.00 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_{u'}] = 1$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1.00 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2z} = 115.20 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

VERIFICATION OF A CONNECTION DUE TO FORCES ACTING ON BOLTS

Bolt shear

$$e = 19 \text{ [mm]} \quad \text{Axial force eccentricity relative to the bolt axis} \quad M_0 = N_{b2,Ed} \cdot e$$

$$M_0 = 0.29 \text{ [kN} \cdot \text{m]} \quad \text{Real bending moment} \quad F_{NSd} = N_{b2,Ed} / n$$

$$F_{NSd} = 7.50 \text{ [kN]} \quad \text{Component force in a bolt due to influence of the longitudinal force} \quad F_{MSd} = M_0 \cdot x_{max} / \sum x_i^2$$

$$F_{MSd} = 4.80 \text{ [kN]} \quad \text{Component force in a bolt due to influence of the moment} \quad F_{x,Ed} = F_{NSd}$$

$$F_{x,Ed} = 7.50 \text{ [kN]} \quad \text{Design total force in a bolt on the direction x} \quad F_{z,Ed} = F_{MSd}$$

$$F_{z,Ed} = 4.80 \text{ [kN]} \quad \text{Design total force in a bolt on the direction z} \quad F_{Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$$

$$F_{Ed} = 8.90 \text{ [kN]} \quad \text{Resultant shear force in a bolt} \quad F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdx} = 76.80 \text{ [kN]} \quad \text{Effective design capacity of a bolt on the direction x} \quad F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$$F_{Rdz} = 96.00 \text{ [kN]} \quad \text{Effective design capacity of a bolt on the direction z}$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |7.50| < 76.80 \quad \text{verified} \quad (0.10)$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |4.80| < 96.00 \quad \text{verified} \quad (0.05)$$

$$F_{Ed} \leq F_{vRd} \quad 8.90 < 38.60 \quad \text{verified} \quad (0.23)$$

VERIFICATION OF A SECTION WEAKENED BY OPENINGS

$$\beta_2 = 0.50 \quad \text{Reduction coefficient} \quad [Table 3.8]$$

$$A_{net} = 13.86 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{Net cross-sectional area} \quad A_{net} = A - d_0 \cdot t_2$$

$$N_{u,Rd} = 199.54 \text{ [kN]} \quad \text{Design plastic resistance of the net section} \quad N_{u,Rd} = (\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u) / \gamma_{M2}$$

$$N_{pl,Rd} = 327.34 \text{ [kN]} \quad \text{Design plastic resistance of the gross section} \quad N_{pl,Rd} = (0.9 \cdot A \cdot f_y) / \gamma_{M2}$$

$$|N_{b2,Ed}| \leq N_{u,Rd} \quad |15.00| < 199.54 \quad \text{verified} \quad (0.08)$$

$$|N_{b2,Ed}| \leq N_{pl,Rd} \quad |15.00| < 327.34 \quad \text{verified} \quad (0.05)$$

BAR VERIFICATION - BLOCK TEARING

$$A_{nt} = 3.69 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{Net area of the section in tension}$$

$$A_{nv} = 6.57 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{Area of the section in shear}$$

$$V_{effRd} = 142.28 \text{ [kN]} \quad \text{Design capacity of a section weakened by openings } V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|N_{b2,Ed}| \leq V_{effRd} \quad |15.00| < 142.28 \quad \text{verified} \quad (0.11)$$

BAR 3

BOLT CAPACITIES

$$F_{v,Rd} = 38.60 \text{ [kN]} \quad \text{Shear resistance of the shank of a single bolt} \quad F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$$

Bolt bearing on the bar

Direction x

$$k_{1x} = 2.50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2.50 > 0.00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bx} = 0.74 \quad \text{Coefficient determined by bolt spacing} \quad \alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_{u'}]$$

$\alpha_{bx} > 0.0$	0.74 > 0.00	verified	
$F_{b,Rd1x} = 76.80$ [kN]	Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall $F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$		
Direction z			
$k_{1z} = 2.50$	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$	
$k_{1z} > 0.0$	2.50 > 0.00	verified	
$\alpha_{bz} = 0.93$	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$	
$\alpha_{bz} > 0.0$	0.93 > 0.00	verified	
$F_{b,Rd1z} = 96.00$ [kN]	Bearing resistance of a single bolt	$F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$	

Bolt bearing on the plate

Direction x			
$k_{1x} =$	2.50	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_1 = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1x} > 0.0$	2.50 > 0.00	verified	
$\alpha_{bx} =$	0.86	Coefficient determined by bolt spacing	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bx} > 0.0$	0.86 > 0.00	verified	
$F_{b,Rd2x} = 99.20$ [kN]	Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall $F_{b,Rd2x} = k_1 \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d^2 t / \gamma_{M2}$		
Direction z			
$k_{1z} =$	2.50	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
$k_{1z} > 0.0$	2.50 > 0.00	verified	
$\alpha_{bz} =$	0.96	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bz} > 0.0$	0.96 > 0.00	verified	
$F_{b,Rd2z} = 111.02$ [kN]	Bearing resistance of a single bolt		$F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d^2 t / \gamma_{M2}$

VERIFICATION OF A CONNECTION DUE TO FORCES ACTING ON BOLTS

Bolt shear

$e = 19$ [mm]	Axial force eccentricity relative to the bolt axis		
$M_0 = 0.19$ [kN*m]	Real bending moment $M_0 = N_{b3,Ed} \cdot e$		
$F_{NSd} = 5.00$ [kN]	Component force in a bolt due to influence of the longitudinal force $F_{NSd} = N_{b3,Ed}/n$		
$F_{MSd} = 3.20$ [kN]	Component force in a bolt due to influence of the moment $F_{MSd} = M_0 \cdot x_{max} / \sum x_i^2$		
$F_{x,Ed} = 5.00$ [kN]	Design total force in a bolt on the direction x $F_{x,Ed} = F_{NSd}$		
$F_{z,Ed} = 3.20$ [kN]	Design total force in a bolt on the direction z $F_{z,Ed} = F_{MSd}$		
$F_{Ed} = 5.94$ [kN]	Resultant shear force in a bolt $F_{Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$		
$F_{Rdx} = 76.80$ [kN]	Effective design capacity of a bolt on the direction x $F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$		
$F_{Rdz} = 96.00$ [kN]	Effective design capacity of a bolt on the direction z $F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$		
$ F_{x,Ed} \leq F_{Rdx}$	$ 5.00 < 76.80$	verified	(0.07)
$ F_{z,Ed} \leq F_{Rdz}$	$ 3.20 < 96.00$	verified	(0.03)
$F_{Ed} \leq F_{vRd}$	$5.94 < 38.60$	verified	(0.15)

VERIFICATION OF A SECTION WEAKENED BY OPENINGS

$\beta_2 = 0.50$	Reduction coefficient [Table 3.8]		
$A_{net} = 13.86$ [cm ²]	Net cross-sectional area $A_{net} = A - d_0 \cdot t_3$		
$N_{u,Rd} = 199.54$ [kN]	Design plastic resistance of the net section $N_{u,Rd} = (\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_{u3}) / \gamma_{M2}$		
$N_{pl,Rd} = 327.34$ [kN]	Design plastic resistance of the gross section $N_{pl,Rd} = (0.9 \cdot A \cdot f_{y3}) / \gamma_{M2}$		
$ N_{b3,Ed} \leq N_{u,Rd}$	$ 10.00 < 199.54$	verified	(0.05)
$ N_{b3,Ed} \leq N_{pl,Rd}$	$ 10.00 < 327.34$	verified	(0.03)

BAR VERIFICATION - BLOCK TEARING

$A_{nt} = 3.69 \text{ [cm}^2\text{]}$ Net area of the section in tension
 $A_{nv} = 6.57 \text{ [cm}^2\text{]}$ Area of the section in shear
 $V_{effRd} = 142.28 \text{ [kN]}$ Design capacity of a section weakened by openings $V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$
 $|N_{b3,Ed}| \leq V_{effRd} \quad |10.00| < 142.28 \quad \text{verified} \quad (0.07)$

BAR 4

BOLT CAPACITIES

$F_{v,Rd} = 38.60 \text{ [kN]}$ Shear resistance of the shank of a single bolt $F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$

Bolt bearing on the bar

Direction x
 $k_{1x} = 2.50$ Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$ $k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
 $k_{1x} > 0.0$ $2.50 > 0.00$ **verified**
 $\alpha_{bx} = 0.74$ Coefficient determined by bolt spacing $\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$
 $\alpha_{bx} > 0.0$ $0.74 > 0.00$ **verified**
 $F_{b,Rd1x} = 76.80 \text{ [kN]}$ Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall $F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Direction z
 $k_{1z} = 2.50$ Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$ $k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
 $k_{1z} > 0.0$ $2.50 > 0.00$ **verified**
 $\alpha_{bz} = 0.93$ Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
 $\alpha_{bz} > 0.0$ $0.93 > 0.00$ **verified**
 $F_{b,Rd1z} = 96.00 \text{ [kN]}$ Bearing resistance of a single bolt $F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Bolt bearing on the plate

Direction x
 $k_{1x} = 2.50$ Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$ $k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
 $k_{1x} > 0.0$ $2.50 > 0.00$ **verified**
 $\alpha_{bx} = 0.86$ Coefficient determined by bolt spacing $\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$
 $\alpha_{bx} > 0.0$ $0.86 > 0.00$ **verified**
 $F_{b,Rd2x} = 99.20 \text{ [kN]}$ Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall $F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Direction z
 $k_{1z} = 2.50$ Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$ $k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
 $k_{1z} > 0.0$ $2.50 > 0.00$ **verified**
 $\alpha_{bz} = 1.00$ Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
 $\alpha_{bz} > 0.0$ $1.00 > 0.00$ **verified**
 $F_{b,Rd2z} = 115.20 \text{ [kN]}$ Bearing resistance of a single bolt $F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

VERIFICATION OF A CONNECTION DUE TO FORCES ACTING ON BOLTS

Bolt shear

$e = 19 \text{ [mm]}$ Axial force eccentricity relative to the bolt axis
 $M_0 = 0.19 \text{ [kN}\cdot\text{m]}$ Real bending moment $M_0 = N_{b4,Ed} \cdot e$
 $F_{NSd} = 5.00 \text{ [kN]}$ Component force in a bolt due to influence of the longitudinal force $F_{NSd} = N_{b4,Ed} / n$
 $F_{MSd} = 3.20 \text{ [kN]}$ Component force in a bolt due to influence of the moment $F_{MSd} = M_0 \cdot x_{\max} / \sum x_i^2$
 $F_{x,Ed} = 5.00 \text{ [kN]}$ Design total force in a bolt on the direction x $F_{x,Ed} = F_{NSd}$
 $F_{z,Ed} = 3.20 \text{ [kN]}$ Design total force in a bolt on the direction z $F_{z,Ed} = F_{MSd}$
 $F_{Ed} = 5.94 \text{ [kN]}$ Resultant shear force in a bolt $F_{Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$
 $F_{Rdx} = 76.80 \text{ [kN]}$ Effective design capacity of a bolt on the direction x $F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$

$F_{Rdz} = 96.00$ [kN]	Effective design capacity of a bolt on the direction z	$F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$
$ F_{x,Ed} \leq F_{Rdx}$	$ 5.00 < 76.80$	verified (0.07)
$ F_{z,Ed} \leq F_{Rdz}$	$ 3.20 < 96.00$	verified (0.03)
$F_{Ed} \leq F_{vRd}$	$5.94 < 38.60$	verified (0.15)

VERIFICATION OF A SECTION WEAKENED BY OPENINGS

$\beta_2 = 0.50$	Reduction coefficient	[Table 3.8]
$A_{net} = 13.86$ [cm ²]	Net cross-sectional area	$A_{net} = A - d_0 \cdot t_{f4}$
$N_{u,Rd} = 199.54$ [kN]	Design plastic resistance of the net section	$N_{u,Rd} = (\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_{u4}) / \gamma_{M2}$
$N_{pl,Rd} = 327.34$ [kN]	Design plastic resistance of the gross section	$N_{pl,Rd} = (0.9 \cdot A \cdot f_{y4}) / \gamma_{M2}$
$ N_{b4,Ed} \leq N_{u,Rd}$	$ 10.00 < 199.54$	verified (0.05)
$ N_{b4,Ed} \leq N_{pl,Rd}$	$ 10.00 < 327.34$	verified (0.03)

BAR VERIFICATION - BLOCK TEARING

$A_{nt} = 3.69$ [cm ²]	Net area of the section in tension	
$A_{nv} = 6.57$ [cm ²]	Area of the section in shear	
$V_{effRd} = 142.28$ [kN]	Design capacity of a section weakened by openings	$V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$
$ N_{b4,Ed} \leq V_{effRd}$	$ 10.00 < 142.28$	verified (0.07)

BAR 5

BOLT CAPACITIES

$F_{v,Rd} = 38.60$ [kN]	Shear resistance of the shank of a single bolt	$F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$
-------------------------	--	---

Bolt bearing on the bar

Direction x			
$k_{1x} = 2.50$	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$	
$k_{1x} > 0.0$	$2.50 > 0.00$	verified	
$\alpha_{bx} = 0.74$	Coefficient determined by bolt spacing	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$	
$\alpha_{bx} > 0.0$	$0.74 > 0.00$	verified	
$F_{b,Rd1x} = 76.80$ [kN]	Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall	$F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_f / \gamma_{M2}$	

Direction z			
$k_{1z} = 2.50$	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$	
$k_{1z} > 0.0$	$2.50 > 0.00$	verified	
$\alpha_{bz} = 0.93$	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$	
$\alpha_{bz} > 0.0$	$0.93 > 0.00$	verified	
$F_{b,Rd1z} = 96.00$ [kN]	Bearing resistance of a single bolt	$F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_f / \gamma_{M2}$	

Bolt bearing on the plate

Direction x			
$k_{1x} = 2.50$	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_1 = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$	
$k_{1x} > 0.0$	$2.50 > 0.00$	verified	
$\alpha_{bx} = 0.86$	Coefficient determined by bolt spacing	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$	
$\alpha_{bx} > 0.0$	$0.86 > 0.00$	verified	
$F_{b,Rd2x} = 99.20$ [kN]	Design capacity in the limit state of plastification of the opening wall	$F_{b,Rd2x} = k_1 \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t_f / \gamma_{M2}$	

Direction z			
$k_{1z} = 2.50$	Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$	

A

$k_{1z} > 0.0$		$2.50 > 0.00$	verified	
$\alpha_{bz} = 0.96$		Coefficient for calculation of $F_{b,Rd}$		$\alpha_{bz} = \min[e_z/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$
$\alpha_{bz} > 0.0$		$0.96 > 0.00$	verified	
$F_{b,Rd2z} = 111.02$	[kN]	Bearing resistance of a single bolt		$F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d^2 / \gamma_{M2}$

VERIFICATION OF A CONNECTION DUE TO FORCES ACTING ON BOLTS

Bolt shear

$e = 19$	[mm]	Axial force eccentricity relative to the bolt axis		
$M_0 = 0.38$	[kN*m]	Real bending moment		$M_0 = N_{b5,Ed} \cdot e$
$F_{NSd} = 10.00$	[kN]	Component force in a bolt due to influence of the longitudinal force		$F_{NSd} = N_{b5,Ed} / n$
$F_{MSd} = 6.40$	[kN]	Component force in a bolt due to influence of the moment		$F_{MSd} = M_0 \cdot x_{max} / \sum x_i^2$
$F_{x,Ed} = 10.00$	[kN]	Design total force in a bolt on the direction x		$F_{x,Ed} = F_{NSd}$
$F_{z,Ed} = 6.40$	[kN]	Design total force in a bolt on the direction z		$F_{z,Ed} = F_{MSd}$
$F_{Ed} = 11.87$	[kN]	Resultant shear force in a bolt		$F_{Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$
$F_{Rdx} = 76.80$	[kN]	Effective design capacity of a bolt on the direction x		$F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$
$F_{Rdz} = 96.00$	[kN]	Effective design capacity of a bolt on the direction z		$F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$
$ F_{x,Ed} \leq F_{Rdx}$		$ 10.00 < 76.80$	verified	(0.13)
$ F_{z,Ed} \leq F_{Rdz}$		$ 6.40 < 96.00$	verified	(0.07)
$F_{Ed} \leq F_{vRd}$		$11.87 < 38.60$	verified	(0.31)

VERIFICATION OF A SECTION WEAKENED BY OPENINGS

$\beta_2 = 0.50$		Reduction coefficient		[Table 3.8]
$A_{net} = 13.86$	[cm ²]	Net cross-sectional area		$A_{net} = A - d_0 \cdot t_{f5}$
$N_{u,Rd} = 199.54$	[kN]	Design plastic resistance of the net section		$N_{u,Rd} = (\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_{u5}) / \gamma_{M2}$
$N_{pl,Rd} = 327.34$	[kN]	Design plastic resistance of the gross section		$N_{pl,Rd} = (0.9 \cdot A \cdot f_{y5}) / \gamma_{M2}$
$ N_{b5,Ed} \leq N_{u,Rd}$		$ 20.00 < 199.54$	verified	(0.10)
$ N_{b5,Ed} \leq N_{pl,Rd}$		$ 20.00 < 327.34$	verified	(0.06)

BAR VERIFICATION - BLOCK TEARING

$A_{nt} = 3.69$	[cm ²]	Net area of the section in tension		
$A_{nv} = 6.57$	[cm ²]	Area of the section in shear		
$V_{effRd} = 142.28$	[kN]	Design capacity of a section weakened by openings		$V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$
$ N_{b5,Ed} \leq V_{effRd}$		$ 20.00 < 142.28$	verified	(0.14)

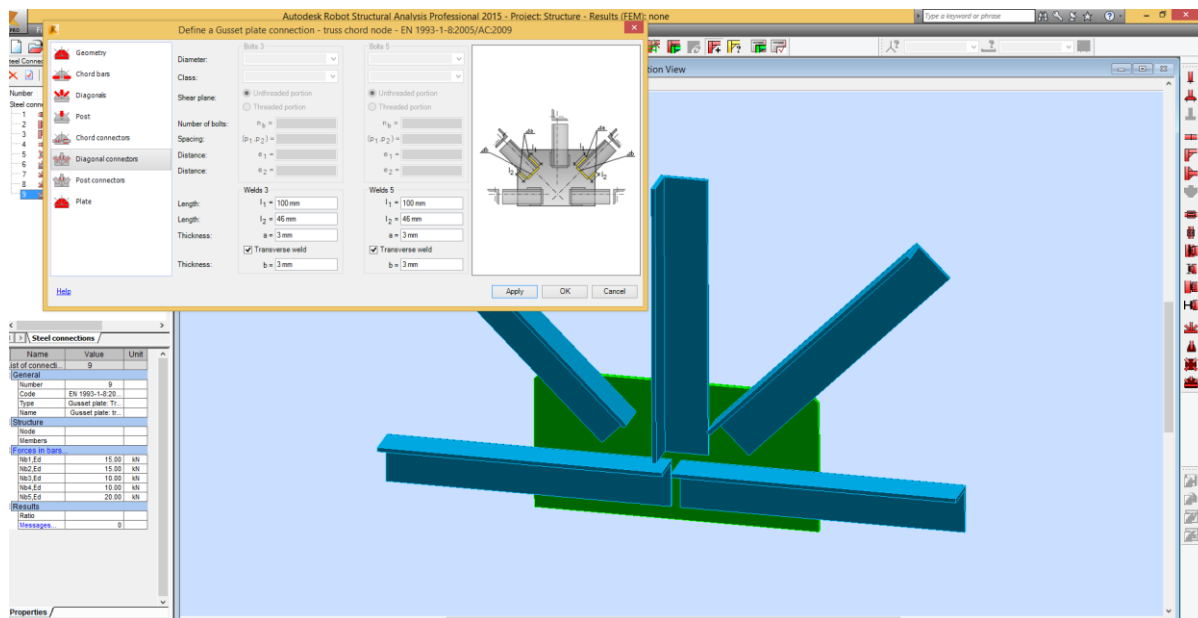
Connection conforms to the code

Ratio 0.31

6.2 Пример прорачуна везе остварене заваривањем са чворним лимом

Током овог примера посматра се понашање везе остварене заваривањем. Коришћен је, као и у претходном примеру, L – профил, уз прекинуте појасне штапове са чворним лимом.

На Слици 33 приказана је могућност подешавања дебљине вара, која у сваком тренутку може бити модификована, као и сви остали параметри.



Слика 33 – Измена основних геометријских параметара вара



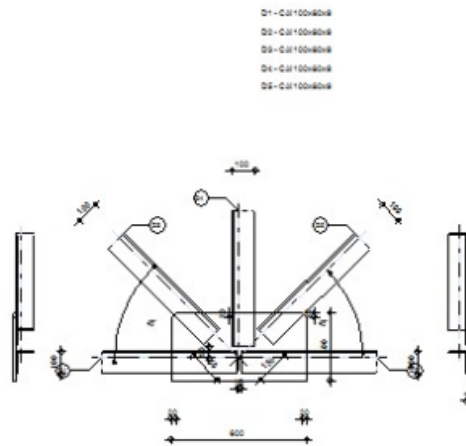
Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015

Calculations of the connection with the gusset plate

EN 1993-1-8:2005/AC:2009



Ratio
0.16



GENERAL

Connection no.: 9
Connection name: Gusset plate: truss chord node

GEOMETRY

BARS

		Bar 1	Bar 2	Bar 3	Bar 4	Bar 5	
Section:		CAI 100x80x9	CAI 100x80x9	CAI 100x80x9	CAI 100x80x9	CAI 100x80x9	
	h	100	100	100	100	100	mm
	b _f	80	80	80	80	80	mm
	t _w	9	9	9	9	9	mm
	t _f	9	9	9	9	9	mm
	r	8	8	8	8	8	mm
	A	15.48	15.48	15.48	15.48	15.48	cm ²
Material:		S 235	S 235	S 235	S 235	S 235	
	f _y	235.00	235.00	235.00	235.00	235.00	MPa
	f _u	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	MPa
Angle	α	0.0	0.0	45.0	90.0	45.0	Deg

WELDS

Member welds

Bar 1

$l_1 =$	100	[mm]	Length 1 of longitudinal fillet weld
$l_2 =$	46	[mm]	Length 2 of longitudinal fillet weld
$a =$	3	[mm]	Thickness of longitudinal fillet welds
$b =$	3	[mm]	Thickness of transversal fillet weld

Bar 2

$l_1 =$	100	[mm]	Length 1 of longitudinal fillet weld
$l_2 =$	46	[mm]	Length 2 of longitudinal fillet weld
$a =$	3	[mm]	Thickness of longitudinal fillet welds
$b =$	3	[mm]	Thickness of transversal fillet weld

Bar 3

$l_1 =$	100	[mm]	Length 1 of longitudinal fillet weld
$l_2 =$	46	[mm]	Length 2 of longitudinal fillet weld
$a =$	3	[mm]	Thickness of longitudinal fillet welds
$b =$	3	[mm]	Thickness of transversal fillet weld

Bar 4

$l_1 =$	100	[mm]	Length 1 of longitudinal fillet weld
$l_2 =$	46	[mm]	Length 2 of longitudinal fillet weld
$a =$	3	[mm]	Thickness of longitudinal fillet welds
$b =$	3	[mm]	Thickness of transversal fillet weld

Bar 5

$l_1 =$	100	[mm]	Length 1 of longitudinal fillet weld
$l_2 =$	46	[mm]	Length 2 of longitudinal fillet weld
$a =$	3	[mm]	Thickness of longitudinal fillet welds
$b =$	3	[mm]	Thickness of transversal fillet weld

GUSSET PLATE

$l_p =$	600	[mm]	Plate length
$h_p =$	300	[mm]	Plate height
$t_p =$	10	[mm]	Plate thickness

Parameters

$h_1 =$	20	[mm]	Cut
$v_1 =$	20	[mm]	Cut
$h_2 =$	20	[mm]	Cut
$v_2 =$	20	[mm]	Cut
$h_3 =$	0	[mm]	Cut
$v_3 =$	0	[mm]	Cut
$h_4 =$	0	[mm]	Cut
$v_4 =$	0	[mm]	Cut

Center of gravity of the plate with respect to the center of gravity of bars (0; 50)

$e_V =$	100	[mm]	Vertical distance of the plate edge from the point of intersection of member axes
$e_H =$	300	[mm]	Horizontal distance of the plate edge from the point of intersection of member axes

$e_0 = 0$ [mm] Distance to chord axis (horiz.)
 Material: S 235
 $f_y = 235.00$ [MPa] Resistance

MATERIAL FACTORS

$\gamma_{M0} = 1.00$ Partial safety factor [2.2]
 $\gamma_{M2} = 1.25$ Partial safety factor [2.2]

LOADS

Case: Manual calculations.

$N_{b1,Ed} = 15.00$ [kN] Axial force
 $N_{b2,Ed} = 15.00$ [kN] Axial force
 $N_{b3,Ed} = 10.00$ [kN] Axial force
 $N_{b4,Ed} = 10.00$ [kN] Axial force
 $N_{b5,Ed} = 20.00$ [kN] Axial force

RESULTS

BAR 1

VERIFICATION OF WELDS

$e = 8$ [mm] Axial force eccentricity relative to the centroid of a weld group
 $M_0 = 0.12$ [kN*m] Real bending moment $M_0 = N_{b1,Ed} * e$
 $A_w = 7.37$ [cm²] Area of welds
 $I_0 = 198.61$ [cm⁴] Polar moment of inertia of welds
 $\tau_N = 20.35$ [MPa] Component stress due to influence of the longitudinal force $\tau_N = N_{b1,Ed} / A_s$
 $\tau_{Mx} = 3.71$ [MPa] Component stress due to influence of the moment on the x direction $\tau_{Mx} = M_0 * z / I_0$
 $\tau_{Mz} = 4.49$ [MPa] Component stress due to influence of the moment on the z direction $\tau_{Mz} = M_0 * x / I_0$
 $\tau = 24.48$ [MPa] Resultant stress $\tau = \sqrt{(\tau_N + \tau_{Mx})^2 + \tau_{Mz}^2}$
 $\beta_w = 0.80$ Correlation coefficient [Table 4.1]
 $f_{vw,d} = 207.85$ [MPa] $f_{vw,d} = f_u / (\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2})$
 $\tau \leq f_{vRd}$ $24.48 < 207.85$ **verified** (0.12)

SECTION RESISTANCE

$N_{plRd} = 363.71$ [kN] Design plastic resistance of the gross section $N_{plRd} = A * f_y / \gamma_{M0}$
 $|N_{b1,Ed}| \leq N_{pl,Rd}$ $|15.00| < 363.71$ **verified** (0.04)

BAR 2

VERIFICATION OF WELDS

$e = 8$ [mm] Axial force eccentricity relative to the centroid of a weld group
 $M_0 = 0.12$ [kN*m] Real bending moment $M_0 = N_{b2,Ed} * e$
 $A_w = 7.37$ [cm²] Area of welds
 $I_0 = 198.61$ [cm⁴] Polar moment of inertia of welds
 $\tau_N = 20.35$ [MPa] Component stress due to influence of the longitudinal force $\tau_N = N_{b2,Ed} / A_s$
 $\tau_{Mx} = 3.71$ [MPa] Component stress due to influence of the moment on the x direction $\tau_{Mx} = M_0 * z / I_0$

$\tau_{Mz} =$	4.49 [MPa]	Component stress due to influence of the moment on the z direction	$\tau_{Mz} = M_0 \cdot x / I_0$
$\tau =$	24.48 [MPa]	Resultant stress	$\tau = \sqrt{(\tau_N + \tau_{Mx})^2 + \tau_{Mz}^2}$
$\beta_w =$	0.80	Correlation coefficient	[Table 4.1]
$f_{vw,d} =$	207.85 [MPa]		$f_{vw,d} = f_u / (\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2})$
$\tau \leq f_{vRd}$		24.48 < 207.85	verified (0.12)

SECTION RESISTANCE

$N_{plRd} =$	363.71 [kN]	Design plastic resistance of the gross section	$N_{plRd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0}$
$ N_{b2,Ed} \leq N_{pl,Rd}$		15.00 < 363.71	verified (0.04)

BAR 3

VERIFICATION OF WELDS

$e =$	8 [mm]	Axial force eccentricity relative to the centroid of a weld group	
$M_0 =$	0.08 [kN*m]	Real bending moment	$M_0 = N_{b3,Ed} \cdot e$
$A_w =$	7.37 [cm ²]	Area of welds	
$I_0 =$	198.61 [cm ⁴]	Polar moment of inertia of welds	
$\tau_N =$	13.57 [MPa]	Component stress due to influence of the longitudinal force	$\tau_N = N_{b3,Ed} / A_s$
$\tau_{Mx} =$	2.47 [MPa]	Component stress due to influence of the moment on the x direction	$\tau_{Mx} = M_0 \cdot z / I_0$
$\tau_{Mz} =$	2.99 [MPa]	Component stress due to influence of the moment on the z direction	$\tau_{Mz} = M_0 \cdot x / I_0$
$\tau =$	16.32 [MPa]	Resultant stress	$\tau = \sqrt{(\tau_N + \tau_{Mx})^2 + \tau_{Mz}^2}$
$\beta_w =$	0.80	Correlation coefficient	[Table 4.1]
$f_{vw,d} =$	207.85 [MPa]		$f_{vw,d} = f_u / (\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2})$
$\tau \leq f_{vRd}$		16.32 < 207.85	verified (0.08)

A

SECTION RESISTANCE

$N_{plRd} =$	363.71 [kN]	Design plastic resistance of the gross section	$N_{plRd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0}$
$ N_{b3,Ed} \leq N_{pl,Rd}$		10.00 < 363.71	verified (0.03)

BAR 4

VERIFICATION OF WELDS

$e =$	8 [mm]	Axial force eccentricity relative to the centroid of a weld group	
$M_0 =$	0.08 [kN*m]	Real bending moment	$M_0 = N_{b4,Ed} \cdot e$
$A_w =$	7.37 [cm ²]	Area of welds	
$I_0 =$	198.61 [cm ⁴]	Polar moment of inertia of welds	
$\tau_N =$	13.57 [MPa]	Component stress due to influence of the longitudinal force	$\tau_N = N_{b4,Ed} / A_s$
$\tau_{Mx} =$	2.47 [MPa]	Component stress due to influence of the moment on the x direction	$\tau_{Mx} = M_0 \cdot z / I_0$
$\tau_{Mz} =$	2.99 [MPa]	Component stress due to influence of the moment on the z direction	$\tau_{Mz} = M_0 \cdot x / I_0$
$\tau =$	16.32 [MPa]	Resultant stress	$\tau = \sqrt{(\tau_N + \tau_{Mx})^2 + \tau_{Mz}^2}$
$\beta_w =$	0.80	Correlation coefficient	[Table 4.1]
$f_{vw,d} =$	207.85 [MPa]		$f_{vw,d} = f_u / (\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2})$
$\tau \leq f_{vRd}$		16.32 < 207.85	verified (0.08)

SECTION RESISTANCE

$N_{plRd} =$	363.71 [kN]	Design plastic resistance of the gross section	$N_{plRd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0}$
$ N_{b4,Ed} \leq N_{pl,Rd}$		10.00 < 363.71	verified (0.03)

BAR 5

VERIFICATION OF WELDS

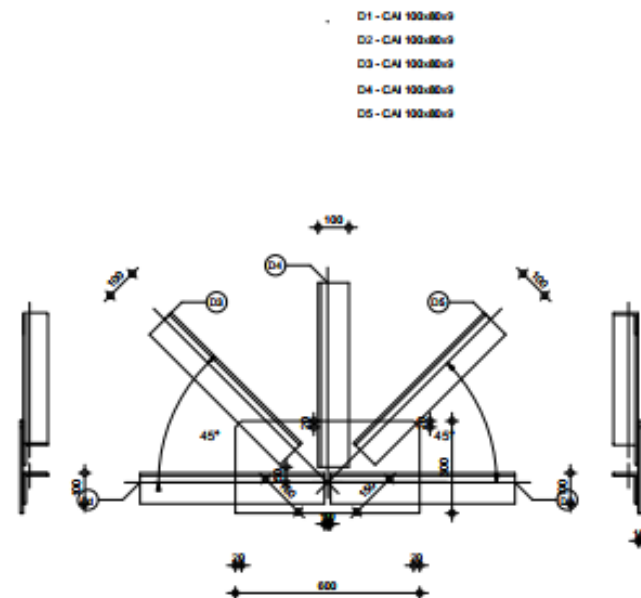
$e =$	8	[mm]	Axial force eccentricity relative to the centroid of a weld group	
$M_0 =$	0.16	[kN*m]	Real bending moment	$M_0 = N_{b5,Ed} * e$
$A_w =$	7.37	[cm ²]	Area of welds	
$I_0 =$	198.61	[cm ⁴]	Polar moment of inertia of welds	
$\tau_N =$	27.13	[MPa]	Component stress due to influence of the longitudinal force	$\tau_N = N_{b5,Ed} / A_s$
$\tau_{Mx} =$	4.95	[MPa]	Component stress due to influence of the moment on the x direction	$\tau_{Mx} = M_0 * z / I_0$
$\tau_{Mz} =$	5.98	[MPa]	Component stress due to influence of the moment on the z direction	$\tau_{Mz} = M_0 * x / I_0$
$\tau =$	32.64	[MPa]	Resultant stress	$\tau = \sqrt{(\tau_N + \tau_{Mx})^2 + \tau_{Mz}^2}$
$\beta_w =$	0.80		Correlation coefficient	[Table 4.1]
$f_{vw,d} =$	207.85	[MPa]		$f_{vw,d} = f_u / (\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2})$
$\tau \leq f_{vRd}$			32.64 < 207.85	verified (0.16)

SECTION RESISTANCE

$N_{plRd} =$	363.71	[kN]	Design plastic resistance of the gross section	$N_{plRd} = A * f_{ys} / \gamma_{M0}$
$ N_{b5,Ed} \leq N_{pl,Rd}$			20.00 < 363.71	verified (0.05)

Connection conforms to the code

Ratio 0.16



Слика 34 – Приказ заварене везе у чвору решеткастог носача са свим потребним котама и пројекцијама потребним за израду

7. Закључак

Решеткати носачи представљају један вид конструкционог извођења са широким дијапазоном примене. Као такви, могу се наћи у најразличитијим облицима, димензијама, попречним пресецима, спремни да прихвате изузетно висока оптерећења, а све то уз сопствену минималну масу. Због својих интересантних извођења, могу се посматрати и као део ентеријера, без икаквог нарушавања естетике. Поред основних металних материјала од којих се могу израђивати, у последње време није редак случај ни примена природних материјала, тј. различитих врста дрвета, како не би дошло до загађења животне средине, а уз сву могућу сигурност конструкције. Иако се ово не виђа баш на сваком кораку, могло би да постане добра пракса у будућности. Како ништа од овога не би било могуће направити да нема средстава која би омогућила везу између елемената, посебно је битно сагледати све њихове одлике. Да ли ће се за остваривање везе користити технолошки поступци (заваривање, лепљење) или механичка средства (закивци, завртњеве, чепови), зависи од низа фактора. Треба имати у виду шта та конструкција треба да задовољи, какви су њени будући експлоатациони услови, која и колика оптерећења треба да поднесе. Поред тога, треба обратити пажњу на само место споја и поштовати све задате препоруке приликом његовог извођења, како на том месту не би дошло до оштећења материјала, а самим тим и до слабљења конструкције што би у неком тренутку могло да доведе до лома. Сви ови услови које треба испоштовати, а који представљају само мали део од укупних, имају за циљ да покажу колико је неопходно имати знање и праксу при извођењу спојева, и да то није само просто лупање чекићем, како се понекад чини. Међутим, да би се извео макар један спој, пре свега тога је неопходно да конструктор замисли шта би све то могло да се спаја, и у коју сврху. Пре него што своју идеју стави на папир, треба да је визуализује колико год је то могуће. Након тога долази до разматрања потенцијалних решења која би могла да задовоље ту почетну идеју. Раније је то био посао искључиво конструктора, док се данас, применом савремене технологије, може делом преbacити и на машину, тј. могу се употребити разни софтвери, а све у сврху бржег и једноставнијег добијања резултата. Наравно, то не значи да су они преузели контролу над послом, ‘мозак’ операције је свакако конструктор, док софтвери служе само као добар алат. Оваква сарадња човека и машине довела је до високе стопе продуктивности уз добијање прецизнијих резултата. Самим тим, квалитет производа је повећан, а смањено је време потребно за његов пласман на тржиште. У времену када је ефикасност и брзина, поред квалитета, један од елементарних фактора за успех како у свим осталим сегментима, тако и у инжењерству, ово свакако чини добар спој чије предности треба паметно користити. Један од софтвера који ово омогућава је *Robot Structural Analysis*, у ком су и одрађена два примера дата у раду. На основу изабраних профила, њихове геометрије, начина спајања и задатих сила, софтвер израчунава оптерећења и приказује резултате уз детаљан увид у сваки корак. Уколико постоји било какав проблем, тј. уколико није безбедно остварити такву везу из било ког разлога, програм то показује, а на самом одговорном лицу је задатак да провери могућа решења и нађе оно одговарајуће. Да ли ће то бити промена профила, додавање или одузимање материјала, измена спојног средства, зависи од више фактора. Примери приказани у оквиру овог рада односе се на остваривање везе у чвору решеткастог носача помоћу завртњева и заваривања, а уз додатак чворног лима. У оквиру извештаја дат је

приказ целокупног прорачуна уз све неопходне полазне податке. Провера је у овом раду вршена по Еврокод стандарду, мада је у овом софтверу могуће радити и по другим светским стандардима.

Применом савремених метода, процес конструисања је знатно убрзан и лакше је маневрисати многобројним подацима. Међутим, иако се до резултата долази пречицом, никако не треба ставити у други план ни онај основни, полазни пут, који у овом случају представља знање и искуство одговорног лица. Без њега, сви ти резултати би били само обична слова на папиру и као такви се не би ни могли користити.

8. Литература

1. Buđevac D., Marković Z. i dr., Metalne konstrukcije, Građevinska knjiga, Beograd, 2007.
2. Petković Z., Ostrić D., Metalne konstrukcije u mašinogradnji 1, Institut za mehanizaciju Mašinskog fakulteta u Beogradu, Beograd, 1996.
3. Nikolić R., Marjanović V., Metalne konstrukcije – Priručnik za proračune, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1998.
4. Nikolić R., Veljković J., Marjanović V., Metalne konstrukcije – Zbirka rešenih zadataka, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2013.
5. Bešević M., Tešanović A., Dobrić J., Zbirka rešenih ispitnih zadataka iz Metalnih konstrukcija, Građevinski fakultet, Subotica, 2002.
6. Mitrović S., Metalne i drvene konstrukcije 1, Visoko građevinsko – geodetska škola, Beograd, 2011.
7. Петровић Н., Структурна оптимизација решеткастих носећих конструкција, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2020.
8. Milošević M., Živković S., Zbornik radova građevinsko – arhitektonskog fakulteta, Niš, 2016.
9. https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_42861/objava_72629/fajlovi/06%20Celicne%20konstrukcije%20II.pdf
10. https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_42861/objava_72629/fajlovi/07%20Celicne%20konstrukcije%20II.pdf
11. <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/5752/820/pregled-savremenih-kineskih-mostova>
12. <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/avion.pdf>
13. <https://galeb.com/product-category/programi/alati-i-oprema/aparati-za-zavarivanje/>
14. <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/7554/820/sportska-hala-od-bambusa-koja-odrzava-prijatnu-temperaturu-u-troskim-uslovima>
15. <https://www.alamy.com/stock-photo-detroit-bridge-huron-basin-erie-basin-north-bay-salford-quays-manchester-27434801.html>