

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: 241/2012

Вељко М. Куртић

Прорачун и конструкција завареног лименог носача

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Весна Марјановић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да одговори на задату тему по целинама:

- Увод
- Врсте носача у металним конструкцијама
- Лимени носачи
- Пример прорачуна и конструкција једног завареног лименог носача
- Закључак

Препоручена литература:

- [1] Буђевац Д., Марковић З. И др., Металне конструкције, Грађевинска књига, Београд, 2007. конструкција, Градјевинска књига, Београд, 1986.
- [2] Петковић З., Острић Д., Металне конструкције у машиноградњи, Институт за механизацију Машинског факултета у Београду, Београд, 1996.
- [3] Бабин Н., Бркљаћ Н., Шостаков Р., Металне конструкције, ФТН Издаштво, Нови Сад 2006.
- [4] Милосављевић М., Радојковић М., и Кузмановић В.: Основи челичних конструкција, Грађевинска књига, Београд, 1984.
- [5] Николић Р., Марјановић В., Металне конструкције- Приручник за прорачуне, Машински факултет, Крагујевац, 1998.
- [6] Зарић Б., Стиппанић Б., Буђевац Д.: Челичне конструкције у грађевинарству, Грађевинска књига, Београд 1990.
- [7] Николић Р., Марјановић В., Металне конструкције-збирка решених задатака, Машински факултет, Крагујевац, 2013.
- [8] Златко Марковић, Гранична стања челичних конструкција према еврокоду, Београд, 2014.

Крагујевац, 2015.

ментор:

Др Весна Марјановић, ванредни професор

Резиме

На дату тему “ Прорачун и конструкција завареног лименог носача“, најпре је уводом укратко дефинисана његова функција и одређене карактеристике. У следећим целинама речено је нешто о њиховој примени и правилима којих конструктор треба да се придржава при конструисању. Такође је било речи и о прорачуну и облицима заварених лимених носача. Урађен је конкретан задатак у коме је прорачунат и конструисан заварени лимени носач. И на крају је све уоквирено у закључку.

Кључне речи: носач, вертикални лим, заварени, избочавање

Abstract

On the topic "Calculation and construction of welded sheet metal bracket", first with an introduction briefly defines its function and certain characteristics. In the following section, it was something about their application and rules which constructor should comply when designing. Also was discussed about the budget and the shapes of welded plate girders. It is designed for a specific task, in which calculated and engineered welded sheet bracket. And in the end everything is framed in the conclusion.

Keywords: sheet metal carrier, vertical plate, welded, buckling

Садржај

1. Увод.....	1
2. Врсте носача у металним конструкцијама.....	3
2.1 Пуни носачи.....	3
2.1.1 Основни облици и статички системи.....	3
2.2.2 Пуни носачи израђени од ваљаних профила.....	5
2.2.3 Пуни лимени носачи.....	8
2.2.4 Обликовање попречних пресека пуних лимених носача.....	11
2.2.5 Веза ребра са појасним ламелама	17
3. Избочавање	20
3.1 Избочавање услед нормалних напона притиска.....	21
3.2 Теорија линеарно еластичног избочавања.....	23
3.3 Контрола носивости на избочавање.....	28
4. Пример прорачуна завареног лименог носача	29
5. Закључак.....	37
Литература	38

1. Увод

[1] Носачи представљају елементе конструкције чија је основна улога преношење задатог оптерећења на одређено растојање. То су елементи конструкције који су под дејством спољашњег оптерећења доминантно оптерећени на савијање. Са гледишта отпорности материјала, деформација савијања носача се јавља као последица следећих врста напрезања:

- чистог правог савијања
- правог савијања силама
- косог савијања
- косог савијања силама
- ексцентричног притиска или затезања

Али треба напоменути да елементи код којих се јављају ексцентрично затезање или притисак у зони малих ексцентритета нису носачи, зато што код њих највећи утицај имају аксијалне силе.

При конструисању сваке конструкције један од најбитнијих циљева је економичност, тј. најоптималније искоришћење материјала уз истовремено задовољење намене, као и безбедног преношења предвиђеног оптерећења.

Пример примене металне конструкције при изградњи производне хале (сл.1).



Слика 1. Метална конструкција мосне дизалице[9]

Спајање носача се врши помоћу:

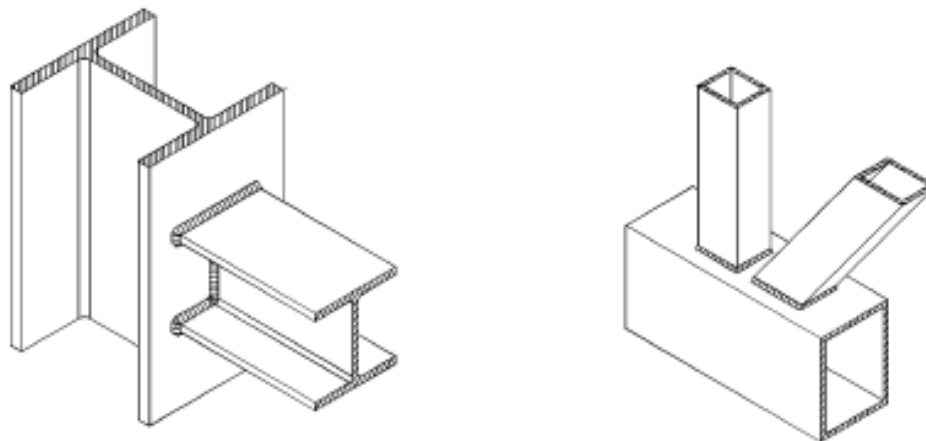
- закивака
- заваривањем

Заваривање је технолошки поступак за спајање истих или сличних метала помоћу високе температуре која изазива топљење основног и додатног материјала на месту споја. Растопи основног и додатног материјала се мешају при чему долази до њиховог физичког и хемијског сједињавања. Након хлађења долази до очвршћавања при чему настаје шав. Основни појмови који су карактеристични за заваривање:

- Основни материјал је материјал од кога су израђени елементи (делови) који се спајају заваривањем.
- Додатни материјал је материјал који се при загревању топи и са растопљеним основним материјалом формира растоп који при хлађењу образује шав. Најчешће је то електрода (жица за заваривање).
- Шав је метеријализовано место спајања, тј. материјал између делова који се спајају, добијен топљењем основног и додатног материјала на месту споја.
- Зона утицаја топлоте (ЗУТ) је зона у основном материјалу непосредно уз шав у којој је услед високе температуре дошло до структурних промена.

Једна од најбитнијих карактеристика материјала је заварљивост. Заварљивост је способност материјала да може да се завари.

Примери примене заваривања у металним конструкцијама приказани су на слици 2.



Слика 2. Примери примене заваривања у металним конструкцијама: веза греде са стубом (лево) и чвор решеткастог носача (десно)

2. Врсте носача у металним конструкцијама

Према начину израде носачи се деле на решеткасте и пуне. Код решеткастих носача повезивање горњег и доњег појаса се врши помоћу штапова испуне, а код пуних носача појасеви су повезани ребром. Решеткасти и пуни носачи врше исту функцију, али се знатно разликују и по начину напрезања и по конструкцијском облику. И једна и друга врста носача имају своје предности, али и мане. Па на сам избор носача утиче низ фактора, као што су интензитет оптерећења, распон, цена материјала, цена израде, маса конструкције, отпорност на спољне утицаје итд.

Иако се преношење момента савијања и код пуних и код решеткастих носача врши на сличан начин, помоћу ламела односно појасних штапова, постоје битне разлике у преношењу трансверзалних (смицућих) сила. Код пуних носача трансверзалне силе се преносе преко ребра изазивајући у њему смицуће напоне, док се код решеткастих носача преношење смицућих сила остварује аксијалним напрезањем штапова испуне.

На слици 2. је приказан изглед решеткастог и пуног носача.

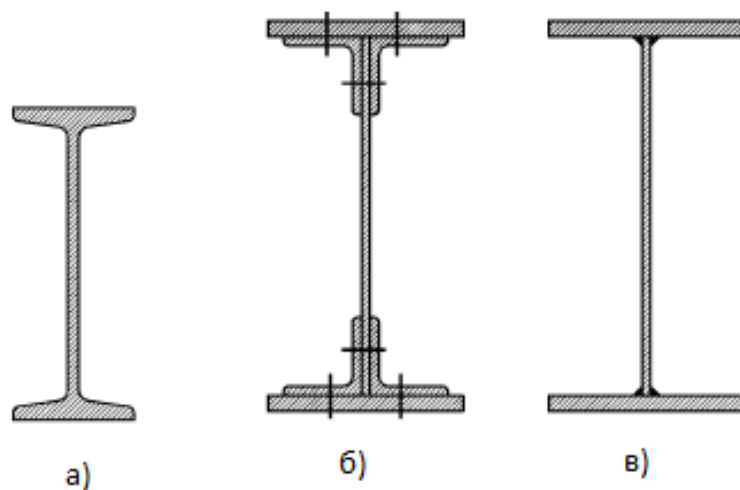


Слика 2. Решеткасти и пуни носачи[10]

2.2. Пуни носачи

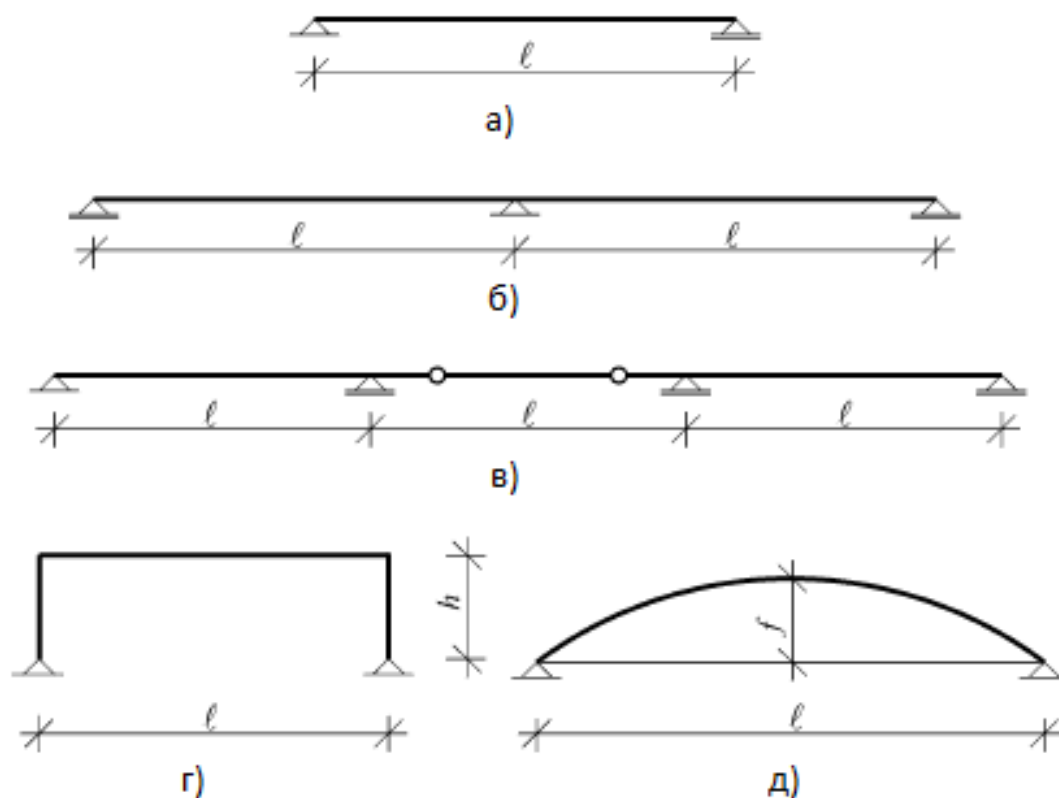
2.2.1. Основни облици и статички системи

Као пуни носачи претежно се користе стандардни ваљани профили (слика 3.а) и профили направљени од спајањем равних челичних лимова помоћу прикључних угаоника и закивака (слика 3.б) или директним заваривањем (слика 3.в). Пре него што је заваривање постало заступљено, лимени носачи су израђивани претежно као заковани носачи, што се највише види у мостоградњи.



Слика 3. Различити облици попречних пресека пуних носача: а) ваљани I профил ; б) пуни лимени заковани носач ; в) пуни лимени заварени носач [1]

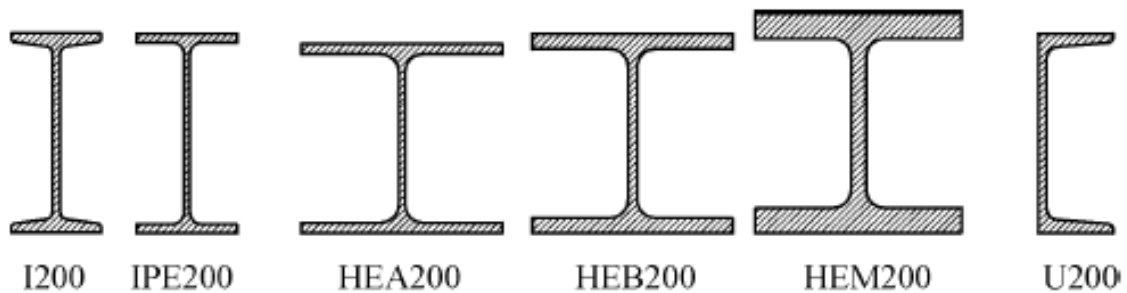
Статички системи који се најчешће примењују су гредни носачи (просте греде, континуални носачи и ретко кад Герберови носачи), али такође се примењују оквирни и лучни носачи. На слици 4. су приказани карактеристични статички системи пуних лимених носача.



Слика 4. Статички системи пуних лимених носача: а) проста греда ; б) континуални носач ; в) Герберов носач ; г) оквирни носач ; д) лучни носач [1]

2.2.2. Пуни носачи израђени од ваљаних профила

Пуни носачи израђени од ваљаних профила нашли су велику примену у зградарству где су релативно мали распони, а оптерећења мирна и умереног интензитета. Предност ваљаних у односу на пуне лимене носаче је у минимализацији радионичких захвата, а уједно и трошкова израде. Али тежина носача од ваљаних профила у односу на еквивалентне лимене носаче је већа. Њихова већа јединична тежина је последица недовољно усавршене технологије ваљања. Технологија ваљања условљава минималне дебљине ребра профила, које би становишта економичности, односно оптималног искоришћења пресека требале да буду мање. Па се смањењем дебљине ребра смањује и тежина носача уз веома мало смањење његове носивости, јер дебљина ребра веома мало утиче на вредност отпорног момента и момента инерције попречног пресека, па самим тим и на његову крутост и носивост. Од великог избора ваљаних профила најчешће су у примени I-профили са уским и широким ножицама, а ређе U-профили (слика 5).

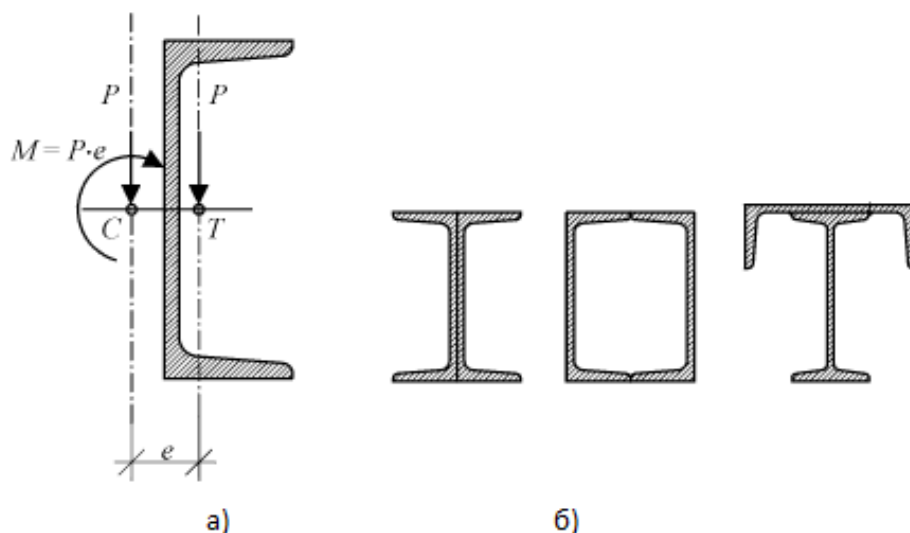


Слика 5. Различити типови ваљаних профила који се користе као носачи [1]

Употреба ваљаних I-профила са уским ножицама је рационална када је носач изложен само савијању око јаче осе инерције или ако је савијање око слабије осе веома мало. Предност оваквог носача у односу на остале се огледа у мањој тежини, а недостаци су велика конструктивна висина и релативно мала отпорност на савијање око слабије осе инерције, па тако и на бочно-торционо извијање.

Примена ваљаних профила са широким ножицама препоручује се када је носач изложен косом савијању, када носачније бочно придржан или када је ограничена грађевинска висина. Избор неког од наведених профила зависи од тога који од наведених услова је строжији, тј. који је економичнији.

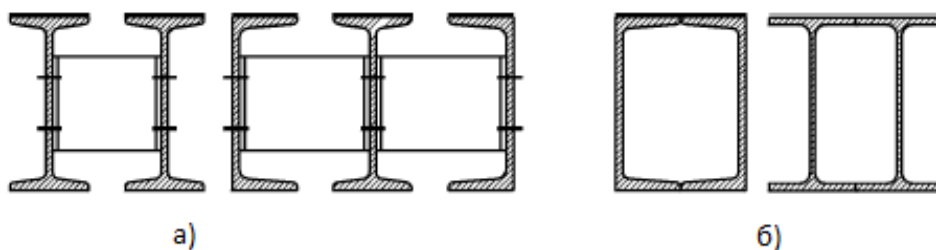
За секундарне елементе мањих распона, који су изложени дејству оптерећења умереног интензитета, могу се употребити и ваљани U-профили. Мана ових профила је што им се тежиште и центар смицања не поклапају, па се при деловању попречног оптерећења дуж тежишне осе јавља момент торзије, као секундаран али и не занемарљив утицај (слика 6.а). Носачи израђени од U-профила се ређе користе као самостални носачи, већ се користе као елементи сложеног попречног пресека у комбинацији са ваљаним I-профилима (слика 6.б).



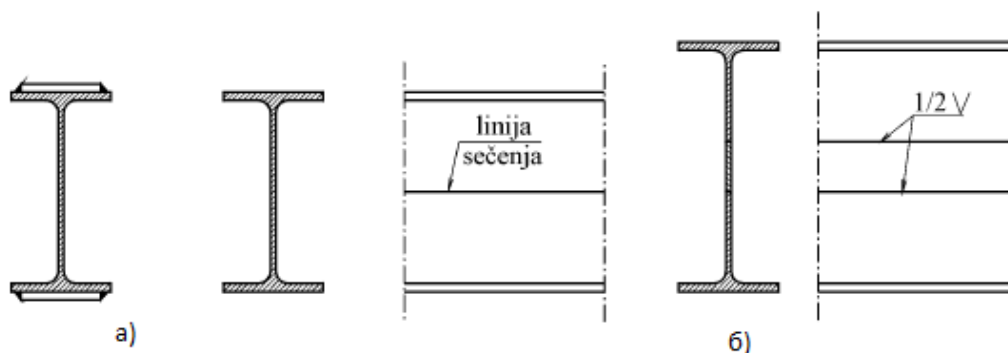
Слика 6. Носачи од ваљаних U-профила: а) статички утицаји ; б) употреба U-профила код сложених попречних пресека [1]

Сви ваљани профили производе се по стандарду и њихове геометријске карактеристике, као и носивост су ограничене. У случају носача већих распона или оптерећења већег интензитета, захтева се већа носивост од носивости коју имају стандардни ваљани профили. Овај проблем се може избећи на два начина:

- Усвајањем два или више међусобно спојених ваљаних профила (слика 7)
- Ојачањем ваљаног профила (слика 8)



Слика 7. Пуни носачи састављени од два или више ваљаних профила [1]



Слика 8. Повећање носивости ваљаних профила: а) додавањем појасних ламела ; б) расечањем ребра и уметањем завареном вертикалног лима [1]

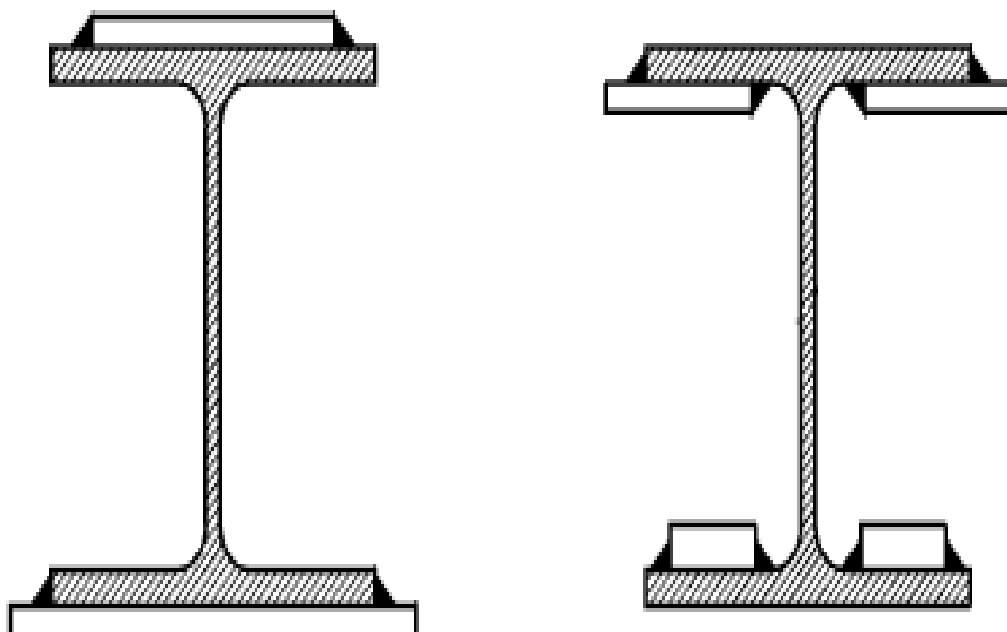
Коришћење два или више међусобно спојених ваљаних профила је оправдана само у случају веома мале грађевинске висине или у случају реконструкције и поправке већ постојећег објекта. Носачи морају бити међусобно повезани на растојању од 0,8 до 1,5 m како би се обезбедило њихово заједничко функционисање. Везе се остварују преко I-профила или U-профила помоћу завртњева или закивака (слика 7.а) или заваривањем (слика 7.б).

Повећање носивости ваљаних профила може се остварити на два начина:

- Додавањем појасних ламела (слика 8.а)
- Подужним расецањем ребра и његовим спајањем заваривањем са уметнутим вертикалним лимом исте или мање дебљине (слика 8.б)

У оба случаја повећавају се геометријске карактеристике пресека (отпорни момент и момент инерције) и носивост носача. Предност ојачања расецањем ребра је у мањем утрошку материјала. Међутим, ојачање додавањем појасних ламела не захтева велики рад, па овакви носачи имају већу отпорност на бочно-торзионо извијање, као и мању грађевинску висину.

Додатне ламеле могу се поставити са унутрашње стране ножица или са спољашње стране ножица (слика 9).



Слика 9. Ојачање ваљаних профила додатним ламелама [1]

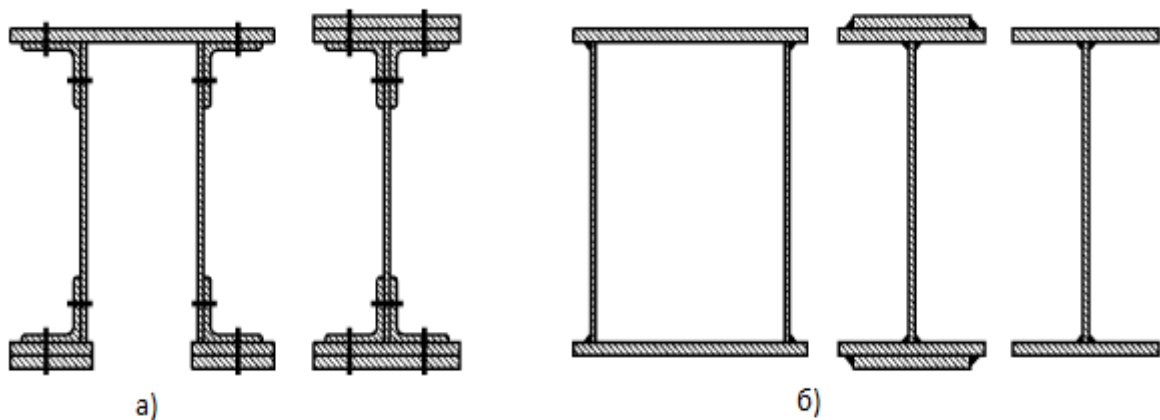
2.2.3. Пуни лимени носачи

Пуни лимени носачи се користе када су оптерећења и распони толико велики да је недовољна носивост ојачаних ваљаних профила, али и у случајевима када њихова примена је економски оправдана. Они имају неколико предности у односу на ваљане профиле, као што су:

- мања тежина
- слобода у избору облика и димензија попречног пресека
- савлађивање великих оптерећења и распона
- могућност израде носача
- могућност покривања дијаграма момента
- могућност оптимизације попречног пресека

Пуни лимени носачи имају већу јединичну цену од ваљаних, што је последица компликованије израде. Повезивање челичних лимова у целину и образовање јединственог попречног пресека захтева додатне радионичке операције (сечење и заваривање или закивање), што повећава и трошкове. Али, имајући у виду горе наведене предности, а посебно мањи утрошак челика, пуни лимени носачи у великом броју случајева представљају најјекономичније решење, па зато имају велику примену у зградарству и мостogradњи.

Најчешће примењивани облици попречних пресека пуних лимених носача су приказани на слици 10. Пуни лимени носачи углавном имају једно (једнозидни носачи) или два ребра (двозидни носачи). Међутим у мостogradњи се користе и вишезидни пуни лимени носачи са више од два ребра (слика 12).



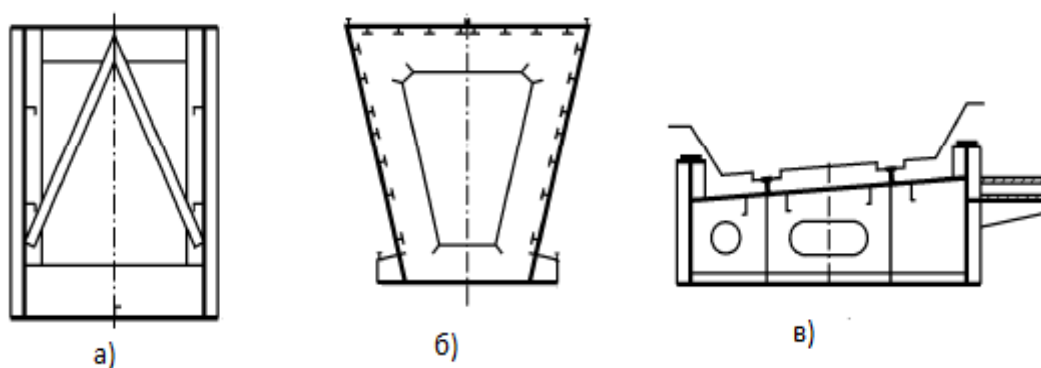
Слика 10. Попречни пресеци пуних лимених носача: а) у закованој изради ; б) у завареној изради [1]

Код заварених лимених носача појасне ламеле се директно заварују за ребро, а код закованих њихова веза се остварује помоћу појасних угаоника и закивака. Појасни угаоници осим што омогућавају међусобно повезивање управних лимова, такође учествују у функционисању попречног пресека, па се при прорачуну узимају у обзир при одређивању геометријесложеног пресека. Пуни заварени лимени носачи имају низ предности у односу на заковане, и то су пре свега:

- једноставнија и бржа израда
- мања тежина
- мања јединична цена
- лакше одржавање
- једноставније одржавање и бржа монтажа
- јефтинија антикорозиона заштита

Пуни лимени заварени носачи су због ових предности скоро у потпуности потиснули заковане лимене носаче, па се данас пуни лимени носачи искључиво праве у завареној варијанти.

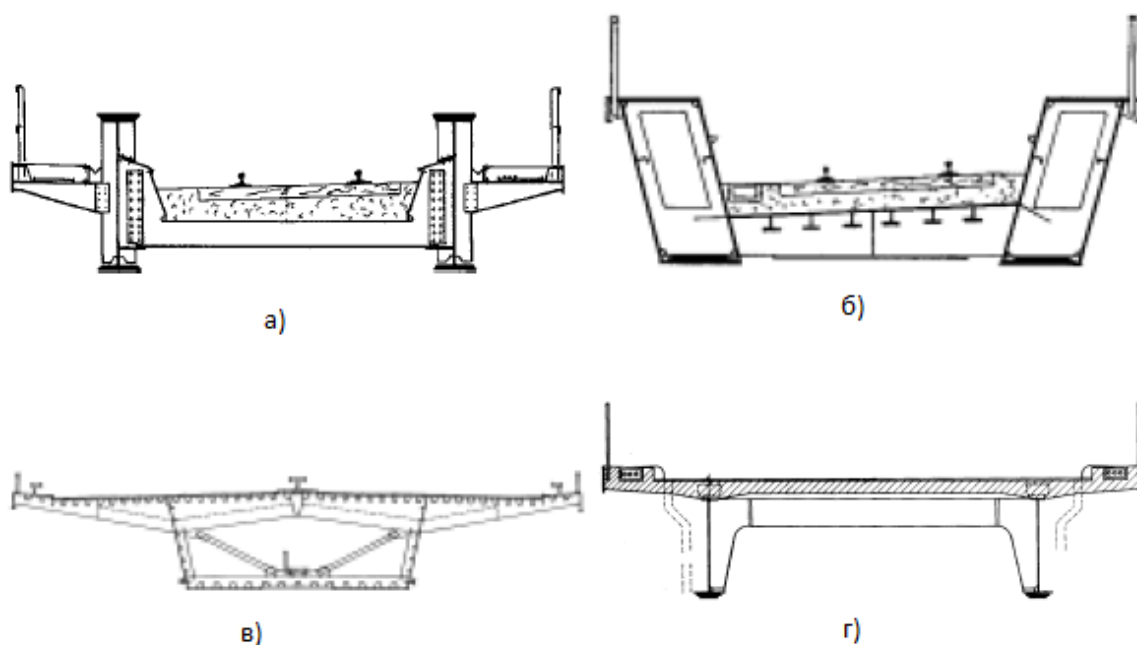
Примена двозидних или сандучастих носача је оправдана када нема могућности за бочно придржавање носача, па стабилност на бочно-торзионо извијање има најбитнији утицај на димензионисање. Такође се примењују када је ограничена грађевинска висина, када је носач изложен деловању великог бочног савијања, али и у случајевима великих распона и оптерећења, као што су кранске стазе са тешким режимом рада. Сандучасти носачи имају велику торзиону крутост, повећану стабилност на бочно-торзионо извијање, као и крутост на савијање око слабије осе инерције. Међутим они захтевају већи утрошак челика и код њих је неопходно предвидети попречна укрућења, која обезбеђују жељену геометрију и торзиону крутост, као и дејство свих елемената попречног пресека. У противном, попречни пресек би изгубио свој облик услед торзионог деформисања. Попречна укрућења могу да се изведу у виду спрега (слика 11.а), оквира (слика 11.б) или пуног зида (дијафрагме) (слика 11.в). У случају када су попречни пресеци проходни, тј. када су унутрашње димензије носача (ширина/висина) веће од 650/900 mm, неопходно је предвидети отворе на дијафраграмама, како би се обезбедио пролаз за особље за одржавање. Уколико су сандучасти носачи непроходни онда није потребна антикорозиона заштита у унутрашњости сандука и непроходни делови се херметички затварају.



Слика 11. Облици попречних укрућења код сандучастих носача: а) спрег као укрућење ; б) рамовско укрућење ; в) укрућење у виду дијафрагме [1]

Попречна укрућења такође имају улогу укрућења ребра против избочавања, а на ослонцима и местима деловања концентрисаних сила обезбеђују правилно преношење сила.

У мостоградњи се најчешће користе пуни лимени носачи, што је условљено великим распонима и оптерећењима, која се са индустријским развојем друштва повећавају. Облици попречног пресека носача који се користе у мостоградњи су разноврсни и зависе од распона моста, ширине коловоза, статичког система, врсте коловозне табле, аеродинамичности и потребне торзионе крутости. Карактеристични примери попречних пресека пуних лимених носача који се примењују у мостоградњи приказани су на слици 12.



Слика 12. Попречни пресеци пуних лимених носача у мостоградњи: а) и б) железнички ; в) и г) друмски [1]

2.2.4. Обликовање попречних пресека пуних лимених носача

Пуни лимени носачи састоје се од једног или више ребра и појасних ламела (ножица). Положај ребра је углавном вертикалан, осим у случајевима када су у питању сандучасти или вишезидни мостовски носачи, код којих се због побољшања аеродинамичности и смањења распона конзолног дела горњег појаса, ребро поставља косо (слика 12). Висина ребра пуних лимених носача варира у релативно широком опсегу од $l/10$ до $l/35$, где l представља распон носача. Висина носача осим од распона, зависи и од интензитета оптерећења и статичког система. Ако су услови деформабилности строги ($l/1000$) носачи морају да поседују велику крутост на савијање, што се постиже повећањем њихове висине. Међутим, постоје и друге емпиријске препоруке за одређивање потребне висине ребра код пуних лимених носача. Оптимална висина ребра (d) у функцији максималног момента савијања се може одредити на следећи начин:

$$d_{opt} = k_w \cdot \sqrt[3]{\frac{M_{max}}{\sigma_{dop}}} \quad (1)$$

где је k_w параметар који зависи од начина покривања дијаграма момената и има следеће вредности:

- $k_w = 4,3$ за добро покривање
- $k_w = 4,7$ за умерено покривање
- $k_w = 5,3$ за носаче непроменљивог попречног пресека

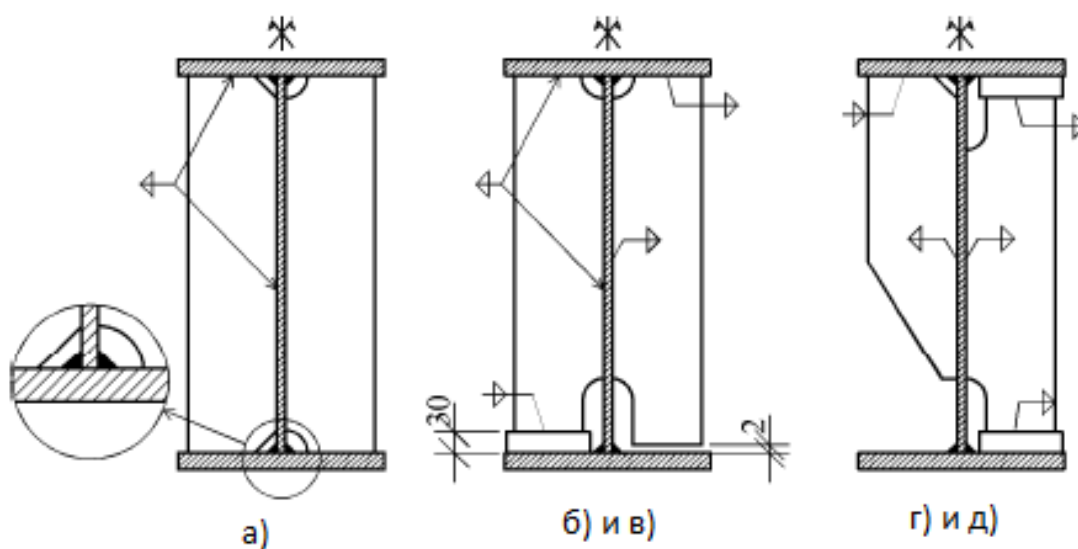
Једна од предности пуних лимених носача у односу на ваљане је то што код њих могу да варирају димензије елемената попречног пресека, како би се омогућило истовремено задовољење напонског и деформацијског услова.

Са економског аспекта дебљина ребра треба да буде што је могуће мања, јер се њеним повећањем не добија битно повећање носивости носача на савијање, али се битно повећава тежина самог носача. Али од површине ребра зависи отпорност носача на смицање, јер оно прихвата скоро целокупну смичућу силу. То значи да дебљина ребра треба да буде минимална, али и довољна да са задовољавајућим фактором сигурности прихвати смичуће силе, односно напоне. Такође дебљина ребра утиче и на отпорност ребра на избочавање услед нормалних и смичућих напона.

На ослонцима и местима деловања концентрисаних сила већег интензитета на ребру се постављају вертикална укрућења у виду ваљаних Т или L-профила или

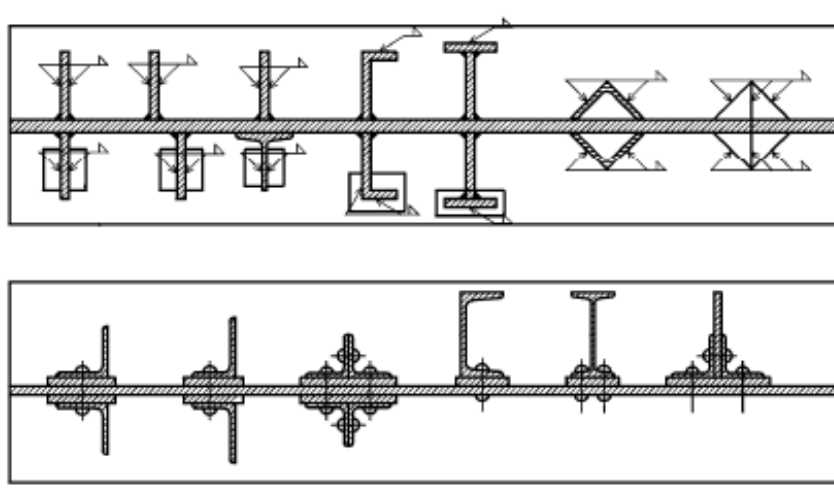
челичних лимова. Ова укућења омогућавају правилно и равномерно уношење силе и истовремено повећавају отпорност ребра на избочавање.

Код једнозидних I-носача у зградарству укућења се заварују за ребро и обе ножице, а обликују се тако да омогуће несметан пролаз подужних шавова за везу ребра са ножицама (слика 13.а). Ово није оправдано код динамички оптерећених носача, јер заваривање управно на ток сила затезања доста смањује отпорност носача на замор. Тако да на затегнутим ножицама треба избегавати попречне шавове. То се може постићи тако што се на контакту између укућења и затегнуте ножице поставља подложна плочица (слика 13.б). Након постављања плочица се заварује за укућење, али не и за затегнуту ножицу. А уколико подложне плочице нису предвиђена, мора се оставити зазор од најмање 2 mm између затегнуте ножице и укућења (слика 13.в). Такође се могу користити посебно обликована укућења (слика 13.г), код којих услед редукције укућења у зони затезања нема потребе за заваривањем. Код континуалних носача који су изложени дејству покретног оптерећења јављају се моменти савијања алтернативног знака, па и горња и доња ножица могу бити затегнуте у зависности од положаја оптерећења. У оваквим случајевима треба поставити подложне плочице и уз горњу и уз доњу ножицу (слика 13.д).



Слика 13. Попречна и вертикална укућења ребра [1]

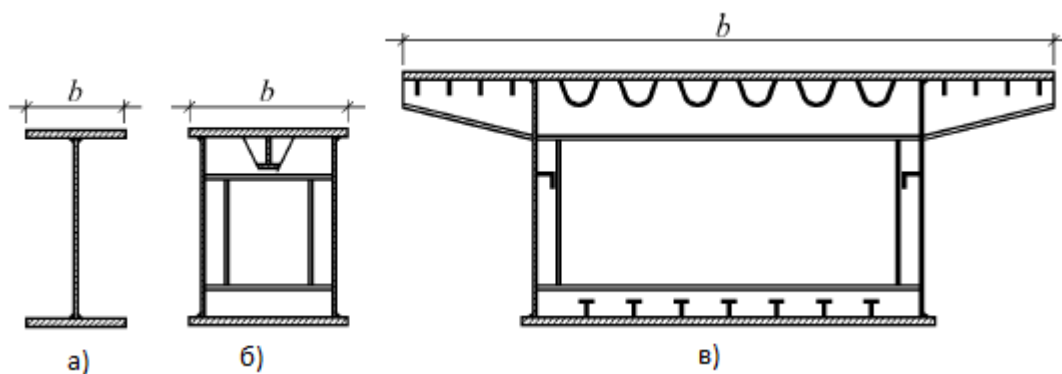
Најчешће као укућења се користе равни челични лимови. Али у ослоначким пресецима је понекад потребно усвојити укућења у облику L, Т или $\frac{1}{2}$ I профила, због веома великом оптерећења услед реакције у ослонцима. Код закованих носача углавном се користе L профили у комбинацији са челичним лимовима. Различити облици попречних укућења су приказани на слици 14.



Слика 14. Облици попречних укрућења код заварених и закованих носача [1]

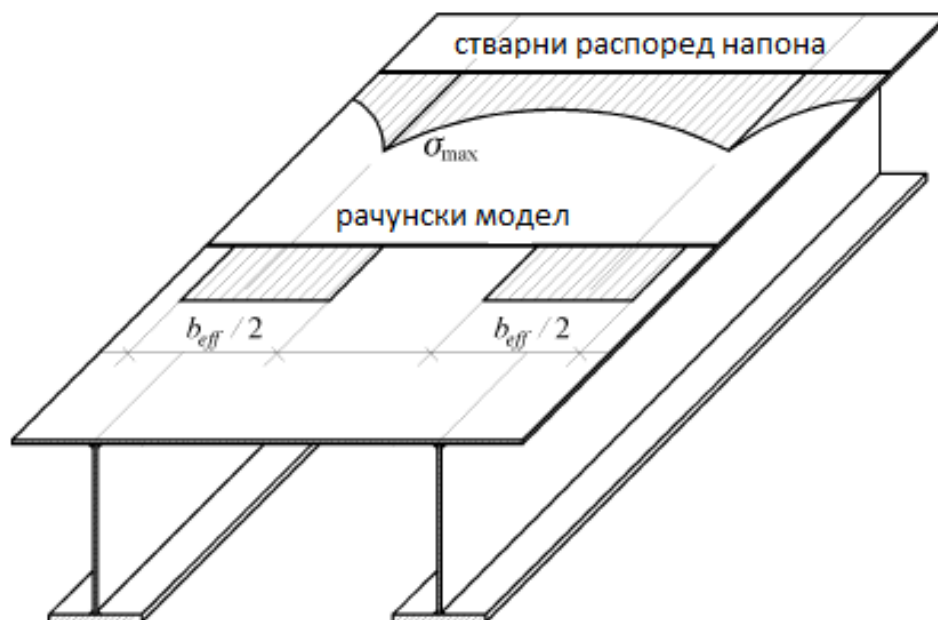
Преношење трансверзалних сила код пуних лимених носача се поверава ребру, а највећи део момента савијања преноси се помоћу појасних ламела (ножица). Па се појасеви обликују тако да имају што већу површину, да би се постигла што већа носивост попречног пресека на савијање. Ширина појасних ламела зависи од врсте носача (једнозидни, двозидни или вишезидни), могућности бочног придржавања, интензитета оптерећења, намене носача итд.

Код двозидних и вишезидних носача, ширина појасева је знатно већа него код једнозидних носача. Ово важи за мостовске носаче са ортотропном плочом код којих је ширина горњег појаса приближно једнака ширини моста. Па се код оваквих носача велика површина појасних ламела може постићи са релативно малом дебљином лима. Минимална дебљина лима коловозне табле код мостовских носача са ортотропном плочом углавном је 12 mm, а у зависности од интензитета оптерећења она може износити и преко 20 mm. Различите ширине појасних ламела су приказане на слици 15.



Слика 15. Ширина појасних ламела код: а) једнозидних носача ; б) сандучастог носача тешке кранске стазе ; в) сандучастог носача друмског моста [1]

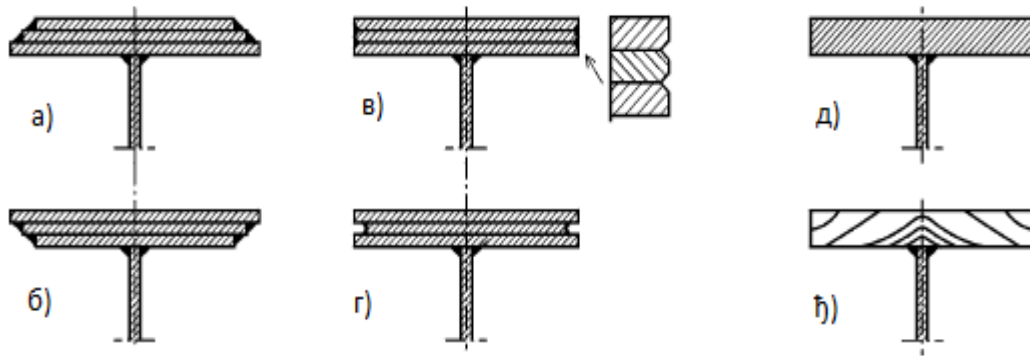
При прорачуну сандучастих носача са широким појасевима потребно је одредити ефективну ширину појаса с обзиром на неравномерну расподелу нормалних напона услед смицања, тзв. shear lag ефекат (слика 16). Ово је нарочито изражено код носача са широким појасевима и мањим распонима. Код притиснутих појасних ламела потребно је проверити и локалну стабилност лима на избочавање, па се ефективна ширина одређује на основу односа избочавања и shear lag ефекта.



Слика 16. Ефективна ширина појасних ламела [1]

Код једнозидних пуних лимених носача који се најчешће конструишу као симетрични и моносиметрични I пресеци, ширина појасних ламела је ограничена због локалног избочавања конзолног препуста, па се потребна површина појаса постиже повећањем дебљине лима. Међутим технологија заваривања не дозвољава примену појасних ламела неограничене дебљине. Приликом заваривања појасних ламела велике дебљине брже се одводи топлота при заваривању ламеле за ребро и повећава брзина хлађења шавова, због присуства велике масе метала. То може да изазове појаву вишеосног напонског стања са ламеларним цепањем појасева. Овим се значајно смањује отпорност динамички оптерећених конструкција на замор и крти лом. Дебљина појасних ламела је ограничена на 50 mm за Š0361, а 30 mm за Š0561. Поред тога, при заваривању лимова дебљина већих од 30 mm, треба обавезно предвидети предгревање, да би се обезбедио жељени квалитет шавова и избегле поменуте нежељене последице. Потребна површина појаса може се постићи и постављањем више тањих појасних ламела које се међусобно повезују заваривањем образујући јединствени појасни пакет. Дебљина једне ламеле најчешће износи од 10 mm до 20 mm, а ређе и до 30 mm.

Конструкцијско обликовање појасних ламела може се остварити на неколико начина, а неки су приказани на слици 17.



Слика 17. Обликовање појасних ламела код заварених носача [1]

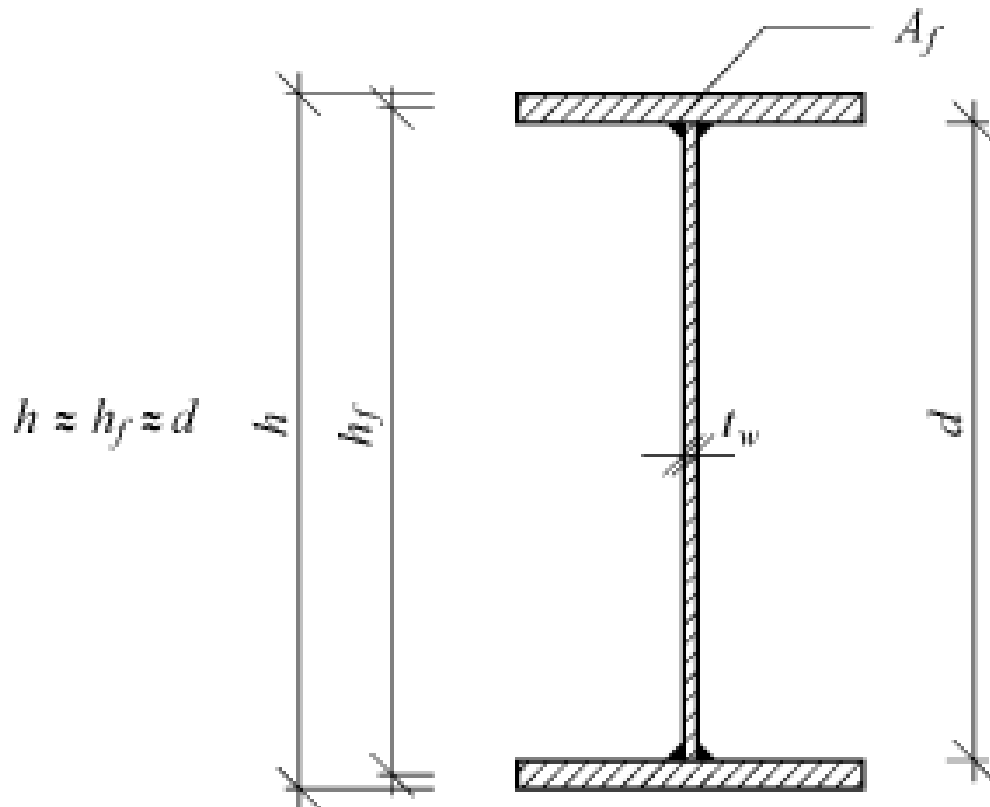
Решење приказано на слици 17.а) је повољно што се тиче саме технике заваривања. Подужни и чеони угаони шавови могу да се изведу у једном потезу ок целе појасне ламеле. У односу на ово, решење на слици 17.б) је статички повољније, јер се са истом површином појасних ламела добија већи момент инерције, па је и носивост таквог попречног пресека већа. Међутим чеони и подужни шавови не леже у истој равни, па је прелаз са једног на други компликован за извођење и представља потенцијално место зареза. Решење са слике 17.в) представља естетски најбоље решење, али оно захтева посебну обраду ивица појасних ламела, чиме се поскупљује израда. Примена појасних ламела приказаних на слици 17.г) представља најлошије решење, јер је могућност заваривања лоша, бојење отежано, а сам жљеб омогућава скупљање воде и прљавштине, што смањује отпорност носача на корозију.

Генерално гледано, примена више танких појасних ламела је повољнија са становишта отпорности конструкције на замор и крти лом, док примена дебљих ламела изискује мање трошкове израде, тако да при одабиру неке од ових варијанти треба наћи компромис.

Потребна површина појасних ламела, која се користи као полазна претпоставка при прорачуну једног пуног лименог носача, се добија преко израза:

$$W_{y,pot} \geq \frac{M}{\sigma_{dop}} \quad (2)$$

Ако су претходно, на основу препорука, одређене висина и дебљина ребра (d и t_w), може се уз извесне претпоставке, одредити и површина појаса. Ради добијања што једноставнијих израза, претпоставља се да је висина носача h и растојање тежишта појасева, једнако висини ребра d . Пошто је код пуних лимених носача висина ребра вишеструко већа од дебљине појаса, овом претпоставком се не угрожава тачност. На слици 18 је шематски приказан попречни пресек носача са ознакама.



Слика 18. Шематски приказ попречног пресека носача са ознакама [1]

Отпорни момент и момент инерције попречног пресека, уз наведене претпоставке, а у складу са ознакама датим на слици 18, могу да се одреде на следећи начин:

$$W_y = \frac{I}{\frac{d}{2}} = \frac{1}{6} \cdot d^2 \cdot t_w + A_f \cdot d \quad (3)$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot d^3 \cdot t_w + 2 \cdot A_f \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (4)$$

Када се у неједначину (2) уврсти W_y према изразу (3) добија се потребна површина појаса (A_f) у облику:

$$A_f \geq \frac{\frac{M}{d}}{\sigma_{dop}} - \frac{1}{6} \cdot d \cdot t_w \quad (5)$$

Такође се у литератури могу наћи слични изрази за одређивање потребне површине појаса, као на пример:

$$A_f \geq \frac{\frac{M}{h}}{\sigma_{dop}} - 0,15 \cdot d \cdot t_w \quad (6)$$

или, ако претходно нису одређене димензије ребра:

$$A_f \geq 0,9 \cdot \frac{\frac{M}{h}}{\sigma_{dop}} \quad (7)$$

Наведени изрази се односе на пуне лимене носаче у завареној изради, па за заковане носаче потребну површину попречног пресека треба повећати за 10-15% због слабљења рупама за закивке. Међутим сви ови изрази су само препоруке на основу којих се долази до орјентационих, полазних димензија попречног пресека. Исправност претпостављеног попречног пресека се може потврдити тек након контроле напона и деформација, доказа стабилности, а код динамички оптерећених конструкција и доказа замора.

2.2.5. Веза ребра са појасним ламелама

Код пуних лимених носача у завареној изради, веза ребра са појасним ламелама се остварује помоћу подужних шавова. Најчешће се примењују обострани угаони шавови. Њихово напрезање је сложено, тј. ови шавови су напрегнути двојачко: смичућим напонима, који делују паралелно са осом шавова (V_{II}) и евентуално нормалним напонима (n), насталим директним уношењем концентрисаног оптерећења P преко горњег појаса носача. Вредности ових напона могу да се израчунају на основу следећих изрази:

$$V_{II} = \frac{V_{max} \cdot S_y^0}{I_y \cdot 2 \cdot a_w} \quad (8)$$

$$n = \frac{P}{2 \cdot l'_w \cdot a_w} \quad (9)$$

У изразу (8) S_y^0 представља статички момент појасне ламеле у односу на осу $y - y$ и може да се одреди помоћу израза:

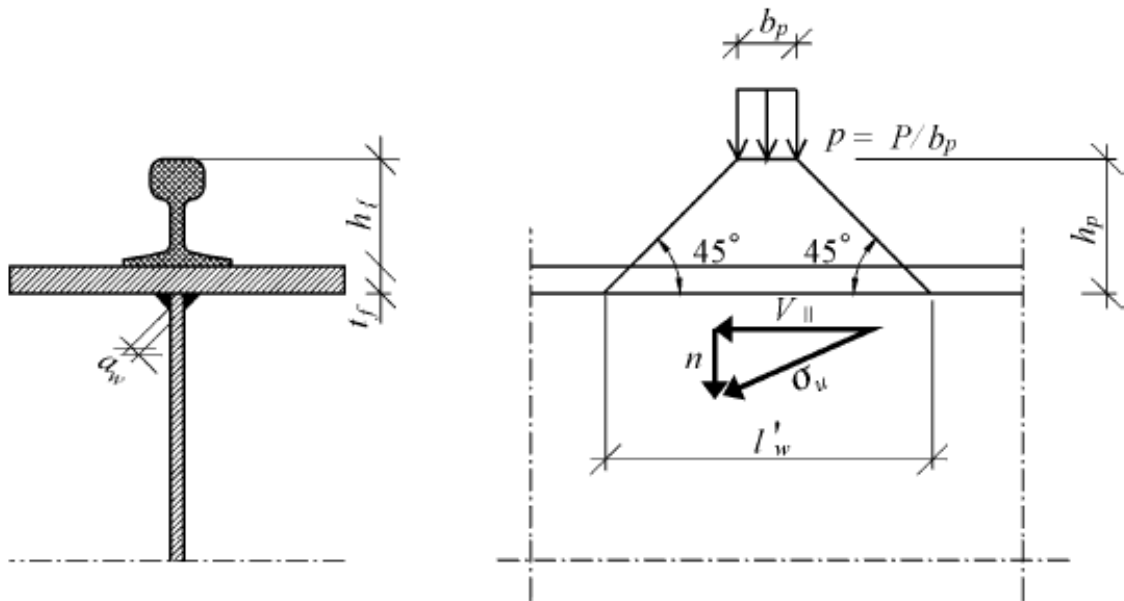
$$S_y^0 = A_f \cdot h_f \quad (10)$$

где је A_f површина појаса, а h_f растојање од тежишта појаса до тежишта попречног пресека. У случају динамичког оптерећења, израз за одређивање нормалних напона (9), треба изменити тако што се сила P множи динамичким коефицијентом φ . Дужина на којој се распростире оптерећење (l'_w) одређује се уз претпоставку да се оптерећење уноси под углом од 45° (слика 19). Она зависи од ширине на којој оптерећење делује (b_p) и висинског растојања од места деловања силе до тежишта шавова (h_p). Уколико се сила уноси директно преко ножице онда је $h_p = t_f$. Међутим код кранских носача, код којих се оптерећење преноси посредно преко шине $h_p = h_s + t_f$, где је h_s висина шине.

При димензионисању шавова векторски збир смичућих и нормалних напона треба да буде мањи од допуштеног напона за шавове, што се може представити на следећи начин:

$$\sigma_u = \sqrt{V_{II}^2 + n^2} \leq \sigma_{w,dop} \quad (11)$$

Смичуће напрезање шавова је последица спреченог трансляторног померања – проклизавања самосталних елемената попречног пресека, односно ножица и ребра. Као резултат заједничког рада целокупног попречног пресека јављају се подужни смичући напони на местима везе појединачних елемената и они се одређују на основу теореме о коњугованости смичућих напона. Максимални смичући напони се јављају на местима максималне смичуће силе, а то су по правилу зоне ослонаца, било да се ради о простој греди или континуалном носачу.



Слика 19. Напрезање угаоних шавова за везу ребра са горњим појасем [1]

Уколико постоји покретно оптерећење, као код кранских носача, максимална трансверзална сила треба да се одреди на основу утицајне линије. Такође треба водити рачуна да се максимална трансверзална сила од покретног оптерећења се јавља баш када се концентрисана сила налази над ослоначким пресецима, па се у посматраном пресеку, при максималној трансверзалној сили истовремено јавља и локални притисак точка који узрокује нормалне напоне у шавовима.

Шавови за везу доње ножице и ребра углавном су напрегнути само смичућим напонима (V_{II}), осим у случају када је оптерећење овешено за доњу ножицу, па се тако јавља и утицај локалног напрезања подужних шавова. Значи, уколико нема локалног напрезања подужних шавова, било да је реч о шавовима за везу ребра са горњом или доњом ножицом, постоје само смичући напони и самим тим се провера напона у шавовима своди на:

$$V_{II} \leq \sigma_{w,dop} \quad (12)$$

Често када је локално оптерећење великог интензитета, угаони шавови не могу да задовоље напонски услов (11), па се тада примењују К или евентуално, за ребра мање дебљине $\frac{1}{2}V$ шавови. Напрезања у шавовима се одређују као за основни материјал на месту везе, односно:

$$\tau_{II} = \frac{V_{max} \cdot S_y^0}{I_y \cdot t_w} \quad (13)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{P}{l'_w \cdot t_w} \quad (14)$$

Контрола упоредног напона у сучеоним шавовима може да се спроведе такође према изразу (11), али уз корекцију допуштеног напона за шавове, па се сведе на:

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_{II}^2} = \frac{1}{t_w} \cdot \sqrt{\left(\frac{P}{I_w}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{V_{max} \cdot S_y^0}{I_y}\right)^2} \leq \sigma_{b,w,dop} = k \cdot \sigma_{dop} \quad (15)$$

3. Избочавање

Лимени носачи се употребљавају за велике распоне као греде за укрућивање лучних мостова или као континуални носачи. Примена ових носача са све већом висином захтева развој контроле еластичне стабилности тако високих лимова. Проблеми стабилности који се јављају код линијских елемената челичних конструкција (извијање, бочно-торзионо извијање и ексцентричан притисак) чији су попречни пресеци потпуно или делимично изложени дејству нормалних напона притиска, присутни су, али на другачији начин, и код површинских, плочастих елемената челичних конструкција, као што су ребра и ножице пуних лимених носача. Витки делови попречног пресека (ребра и ножице), код попречних пресека, се понашају као површински елементи оптерећени у својој равни. Када су изложени нормалним напонима притиска постоји могућност губитка локалне стабилности дела пресека и тада настаје избочавање. Избочавање настаје услед дејства нормалног напона притиска, а присутан је и код танких (витких) делова попречног пресека који су потпуно или делимично изложени дејству нормалних напона притиска. Нормални напони притиска у деловима попречног пресека могу да буду последица деловања, аксијалне силе притиска, момента савијања, као и комбинације та два узрока.

Треба истаћи, да код витких ребара пуних лимених носача до избочавања може доћи и услед смичућих напона. Односно, при чистом смицању јављају се главни напони затезања и притиска који проузрокују појаву избочина.

Избочавање ребара пуних лимених носача може да настане и као последица деловања локалног притиска услед концентрисане силе или реакције у ослонцима. У овом случају није реч о подужним нормалним напонима σ_x , паралелним са осом елемента, који су последица утицаја из система конструкције, већ о локалним попречним нормалним напонима σ_z , који се јављају у ребру носача непосредно испод места деловања концентрисане силе или изнад ослонца.

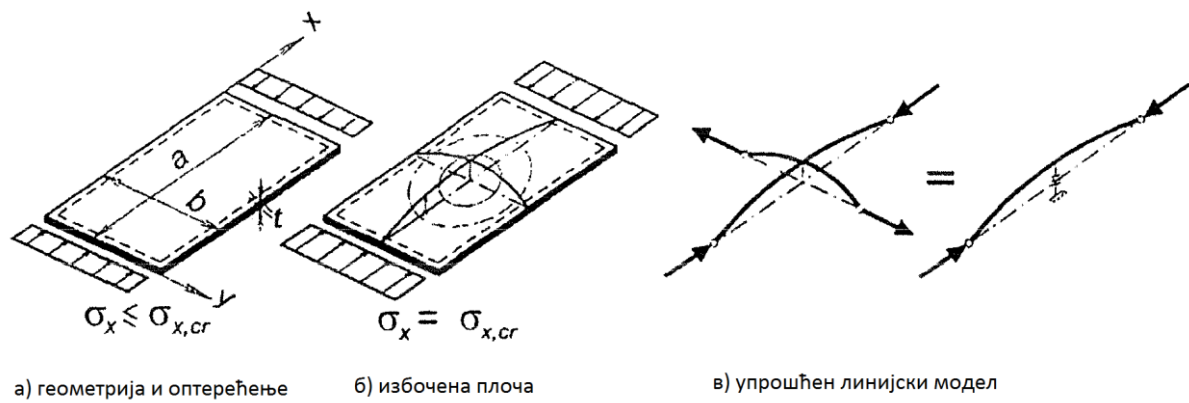
Према томе, у општем случају код пуних лимених елемената могу да се јаве следећи облици нестабилности:

- избочавање делова попречног пресека услед подужних нормалних напона притиска (σ_x) који настају као последица напрезања елемената услед аксијалних сила притиска N_{Ed} и/или момената савијања M_{Ed} ;
- избочавање ребра носача услед смичучих напона τ_{xz} који настају услед смичуће силе V_{Ed} ;
- избочавање ребра носача услед дејства концентрисане попречне силе F_{Ed} која изазива локалне попречне напоне притиска σ_z ;
- међусобно деловање претходних случајева избочавања.

3.1. Избочавање услед нормалних напона притиска

Правоугаона плоча оптерећена нормалним напоном притиска σ_x дуж две паралелне ивице и зглобно ослоњена дуж све четири ивице (слика 20.а), при малим напрезањима нема деформације управне на своју средњу раван. Повећавањем напона плоча се постепено деформише управно на своју раван, а настале деформације су еластичне јер се након уклањања оптерећења плоча враћа у првобитан положај. Али, ако се оптерећење и даље повећава, у одређеном тренутку долази до трајне деформације, односно избочине, која остаје и након уклањања оптерећења (слика 20.б). Тада плоча прелази у друго, неутрално равнотежно стање, а напон при коме долази до избочавања је критичан напон еластичног избочавања $\sigma_{x,cr}$.

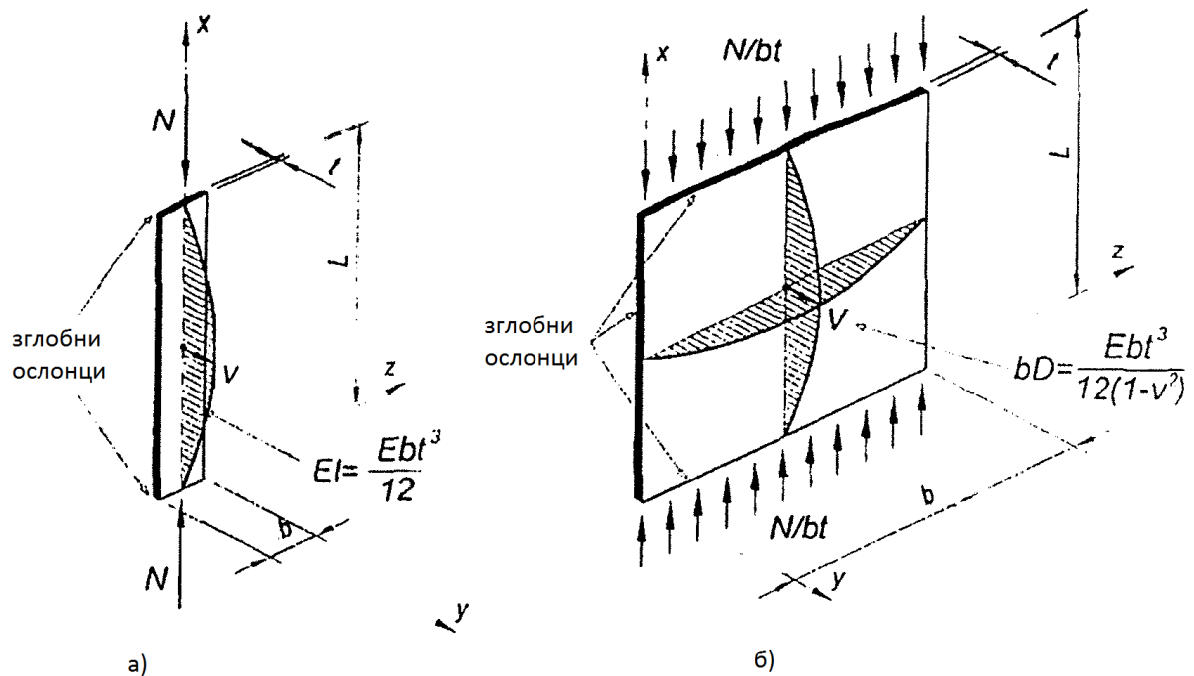
Проблем избочавања се може објаснити на упрошћеном линијском моделу образованог од подужних и попречних средњих влакана (слика 20.в). подужна влакна су притиснута, али не могу слободно да се извију, зато што их пречавају попречна затегнута влакна, која на неки начин представљају еластичан ослонац. Уколико није обезбеђено ослањање подужних ивица плоче, које су паралелне са правцем деловања силе, попречна влакна губе улогу стабилизатора, па се онда проблем избочавања плоче своди само на извијање површинског елемента управно на своју раван.



Слика 20. Избочавање правоугаоне плоче [8]

За траку јединичне ширине (слика 21.а) Ојлеров критичан напон извијања може да се одреди на основу следећег израза:

$$\sigma_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E}{\lambda^2} = \pi^2 \cdot \frac{E}{\left(\frac{b}{\sqrt{12} \cdot t}\right)^2} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (16)$$



Слика 21. Ојлеров напон избочавања [8]

Када је плоча зглобно ослоњена по читавој контури, као што је приказано на слици 21.б, она не може да се извије самостално, као линијски елемент, без утицаја суседних попречних влакана. Утицај попречних деформација на вредност критичног напона се обухвата тако што се уместо модула еластичности E уводи члан $E/(1 - \nu^2)$, па израз за Ојлеров критичан напон избочавања добија следећи облик:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 [N/mm^2] \quad (17)$$

Влакна управна да правац деловања силе стабилизују плочу, а њихов утицај зависи од ширине плоче. Што је ширина плоче већа, то је њихов позитиван утицај све мањи, а понашање све ближе извијању притиснутог елемента.

Треба напоменути да за разлику од извијања притиснутог штапа, еластичним избочавањем плоче не исцрпљује се њена носивост. Односно, већ избочена плоча пре самог лома може да пренесе додатно, пост-критично оптерећење, па избочавање не мора увек да проузрокује нестабилност попречног пресека.

3.2. Теорија линеарно еластичног избочавања

Према линеарно еластичној теорији избочавања, одређивање критичног напона избочавања код правоугаоних плоча оптерећених у својој равни, заснива се на следећим претпоставкама:

- материјал је идеално еластичан,
- нема почетних геометријских и структурних имперфекција,
- оптерећење делује у средњој равни плоче
- деформације плоче управно на средњу раван (w) су мале.

Основни вид избочавања је избочавање правоугаоне плоче зглобно ослоњене на све четири стране, оптерећене константним напонам притиска (σ_x) дуж две супреотне ивице.

Полазећи од опште диференцијалне једначине савијања плоче по теорији другог реда, узимајући у обзир да нема попречног спољашњег оптерећења ($q_z=0$) и да је за посматрану диспозицију оптерећења $\sigma_x \neq 0$ и $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$, добија се диференцијална једначина за основни случај избочавања у следећем облику:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = - \sigma_x \frac{t}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (18)$$

где је:

w - деформација плоче управно на средњу раван,

t - дебљина плоче, односно лима,

σ_x - нормални напон притиска који делује дуж две паралелне ивице,

D - крутост плоче на савијање, која је дефинисана следећим изразом,

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (19)$$

Решење ове диференцијалне једначине може да се претпостави у облику двоструког Фуријеовог реда:

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y \quad (20)$$

при чему су a и b димензије правоугаоне плоче, m и n природни бројеви, а x и y текуће координате. Диференцирањем овако претпостављеног решења и његовим увођењем у диференцијалну једначину добија се:

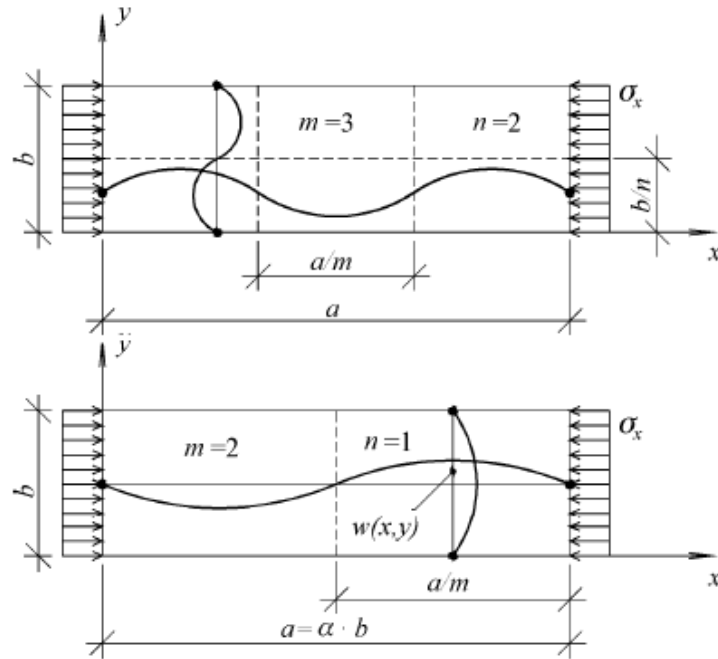
$$A_{mn} \left\{ \pi^4 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 - \pi^2 \left(\frac{m}{a} \right)^2 \sigma_x \frac{t}{D} \right\} = 0 \quad (21)$$

из услова о постојању нетривијалног решења ($A_{mn} \neq 0$), може да се одреди израз за нормални напон:

$$\sigma_x = \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 \pi^2 \left(\frac{a}{m} \right)^2 \frac{D}{t} \quad (22)$$

Претходним изразом одређен је напон σ_x , при којем долази до избочавања, у функцији параметара m и n , који имају јасно физичко значење и представљају број полуталаса избочавања, односно број избочина у правцу x , односно у осе, редом (слика 22). Ако се са α означи однос дужине и ширине плоче ($\alpha=a/b$) и крутост плоче на савијање D замени изразом (19), претходни израз добија следећи облик:

$$\sigma_x = \left(\frac{m}{\alpha} + n^2 \frac{\alpha}{m} \right)^2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (23)$$



Слика 22. Различити облици избочавања [8]

Може се уочити да у претходном изразу (23) други члан представља Ојлеров критичан напон (17), па може да се напише:

$$\sigma_x = \left(\frac{m}{\alpha} + n^2 \frac{\alpha}{m} \right)^2 \sigma_E = k \sigma_E \quad (24)$$

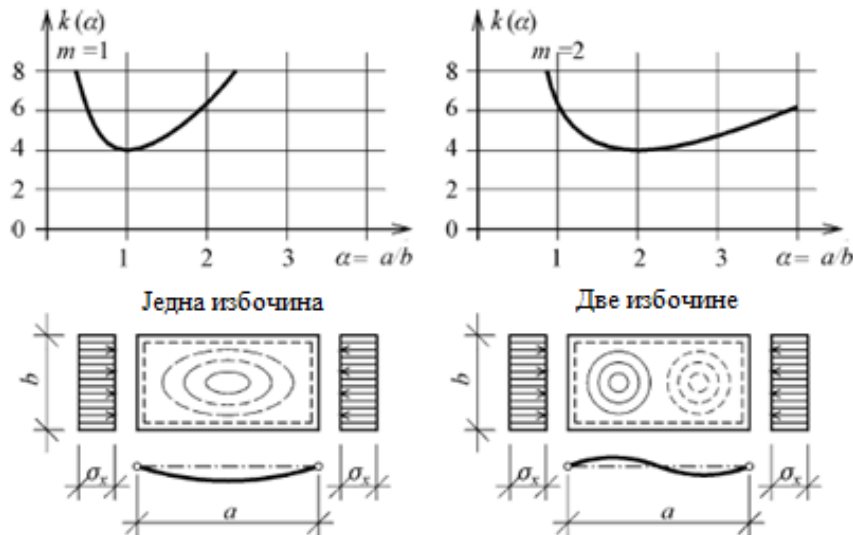
где је k параметар помоћу кога се узима у обзир зависност нормалног напона σ_x од целобројних величина m и n , а који може да се одреди на основу следећег израза:

$$k = \left(\frac{m}{\alpha} + n^2 \frac{\alpha}{m} \right)^2 \quad (25)$$

Критичан напон еластичног избочавања представља минимум напонске функције дате изразом (24). Како је Ојлеров напон за задату геометрију плоче константан, вредност критичног напона еластичног избочавања добија се када параметар k има минималну вредност. Лако се може приметити да параметар k има минималне вредности за $n=1$, то јест када се по ширини плоче јавља само један полуталас односно полуизбочина. У том случају је:

$$k = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m} \right)^2 \quad (26)$$

Имајући у виду физичко значење параметра m , он може да има само целобројне вредности од 1 до j где је j број полуталаса по дужини плоче. На тај начин добија се фамилија кривих за $m=1, 2, 3, \dots, j$.



Слика 23. Избочивање плоче: а) у једном полуталасу ; б) у два полуталаса [8]

Свака појединачна крива је једнопараметарска функција $k=k(\alpha)$, а минимуми ових функција одређују се из следећег услова:

$$(dk(\alpha))/d\alpha = 0 \quad (27)$$

За $m=1$ функција има следећи облик:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha} + \alpha\right)^2 \quad (28)$$

а параметар k има минималну вредност $k_{\min}=4,0$ за $\alpha=1,0$ (слика 23.а). Такође се може показати да је за $m=2$ минимална вредност параметра k такође $k_{\min}=4,0$, али за $\alpha=2,0$ (слика 23.б). Може се закључити кроз даљу анализу да све једнопараметарске криве имају исте минималне вредности ($k_{\min} = 4,0$), а да је положај минимума функције одређен бројем полуталаса избочавања: $\alpha(m)=m$. Минимална вредност коефицијента избочавања ($k_{\min}$) означава се са k_{σ} . Критичан напон еластичног

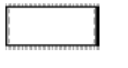
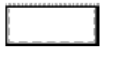
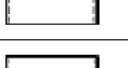
избочавања за правоугаону плочу зглобно ослоњену дуж све четири ивице и оптерећене константним нормалним напоном притиска може се одредити на основу следећег израза:

$$\sigma_{x,cr} = k\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = k_\sigma \sigma_E \quad (29)$$

Критичан напон еластичног избочавања зависи од услова ослањања и начина напрезања плоче. Ови утицаји се узимају у обзир помоћу коефицијента k_σ . У табели 1 дате су вредности коефицијента избочавања k_σ за неколико карактеристичних случајева напрезања и ослањања. У случају напрезања која нису дата табелом, коефицијент избочавања k_σ , за правоугаоне плоче које су зглобно ослоњене дуж све четири ивице, може да се одреди на следећи начин:

$$\begin{aligned} k_\sigma &= 8,2/(1,05+\psi) & \text{за} & \quad 0 < \psi < 1 \\ k_\sigma &= 7,81-6,29\psi+9,78\psi^2 & \text{за} & \quad -1 < \psi < 0 \\ k_\sigma &= 5,98(1-\psi)^2 & \text{за} & \quad -3 < \psi < -1 \end{aligned} \quad (30)$$

Табела 1. Вредности коефицијента k за различите услове ослањања и начине напрезања

Услови ослањања	Облик дијаграма нормалног напона				
	$\psi = 1$	$\psi = 0,5$	$\psi = 0$	$\psi = -0,5$	$\psi = -1$
					
	4,00	5,32	7,81	13,40	23,90
	6,97	9,27	13,54	24,50	39,52
	5,41	-	11,73	-	23,94
	5,41	-	9,54	-	-
	1,28	-	5,91	-	2,134
	1,28	-	1,608	-	-
	0,426	-	1,702	-	0,851
	0,426	-	0,567	-	-

3.3. Контрола носивости на избочавање

Применом методе ефективног попречног пресека контрола носивости на избочавање разматраног укрућеног или неукрућеног поља, елемента оптерећеног аксијалном силом притиска N_{Ed} и моментом савијања око једне осе савијања M_{Ed} , треба да се спроведе на следећи начин:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{MO}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N}{W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{MO}} \leq 1 \quad (31)$$

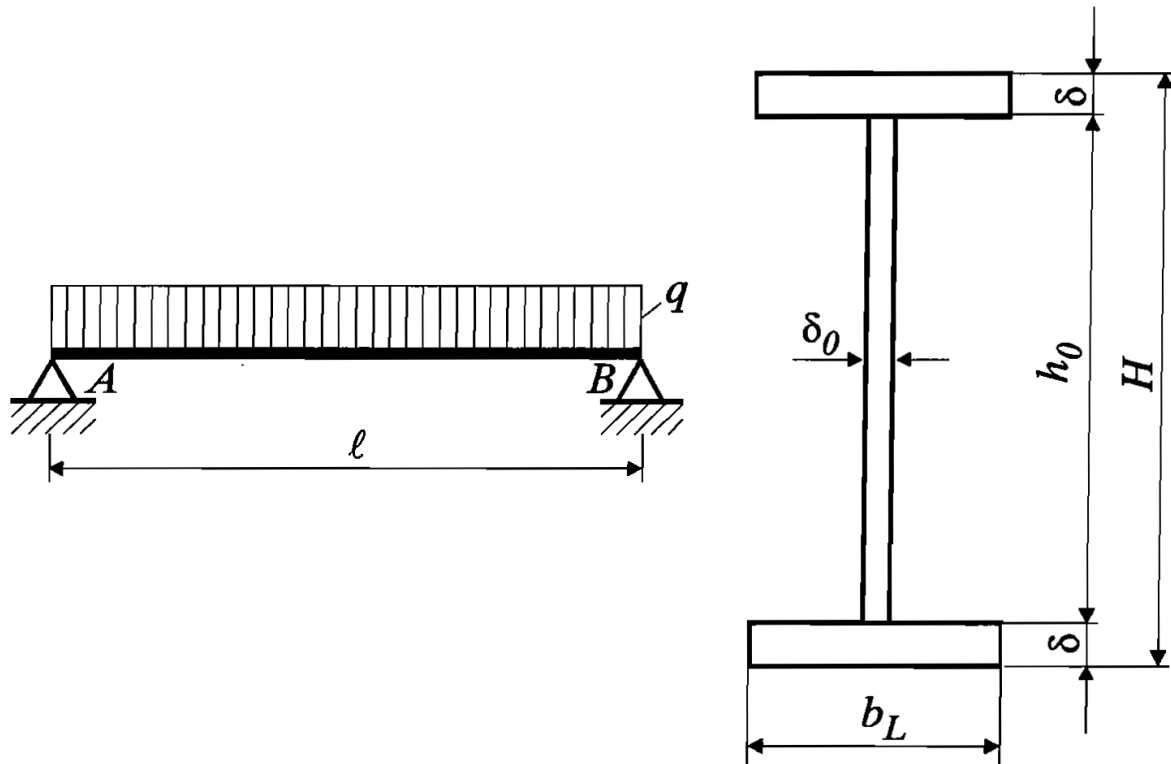
Где је:

- N_{Ed} - прорачунска вредност аксијалне силе притиска,
- M_{Ed} - прорачунска вредност момента савијања,
- A_{eff} - ефективна површина попречног пресека који је изложен чистом притиску,
- W_{eff} - еластични отпорни момент ефективног попречног пресека за случај чистог савијања око разматране осе савијања,
- e_N - померање положаја тежишта ефективног пресека услед дејства нормалне силе притиска (само код несиметричних попречних пресека класе 4),
- γ_{MO} - парцијални коефицијент

4. Пример прорачуна завареног лименог носача

Прорачунати заварени лимени носач распона $l = 15 \text{ m}$. Носач је оптерећен једнако подељеним теретом $q = 130 \text{ kN/m}$, као што је приказано на слици 24. Попречни пресек носача дат је на слици 24. Допуштени напон је:

$$\sigma_{dop} = 140 \text{ MPa}, \sigma_{u,dop} = 105 \text{ MPa}$$



Слика 24. Поставка задатка

Решење:

- Потребна висина носача

За посматрани проблем усваја се да је висина основног пресека:

$$h_o = \frac{l}{10} = \frac{15}{10} = 1,5 \text{ m}$$

- Димензије вертикалног лима

За посматрани проблем је:

$$\delta_o [\text{mm}] = 9 + 2,5 \cdot h_o [\text{m}] = 9 + 2,5 \cdot 1,5 = 12,75 \text{ mm}$$

За дебљину вертикалног лима усваја се: $\delta_o = 12 \text{ mm}$

Конструктивно усвајам $b = 400 \text{ mm}$

- Отпорни момент вертикалног лима

$$W_0 = \frac{h_o^2 \cdot \delta_o}{6} = \frac{150^2 \cdot 1,2}{6} = 4500 \text{ cm}^3$$

- Појачање основног пресека ламелама

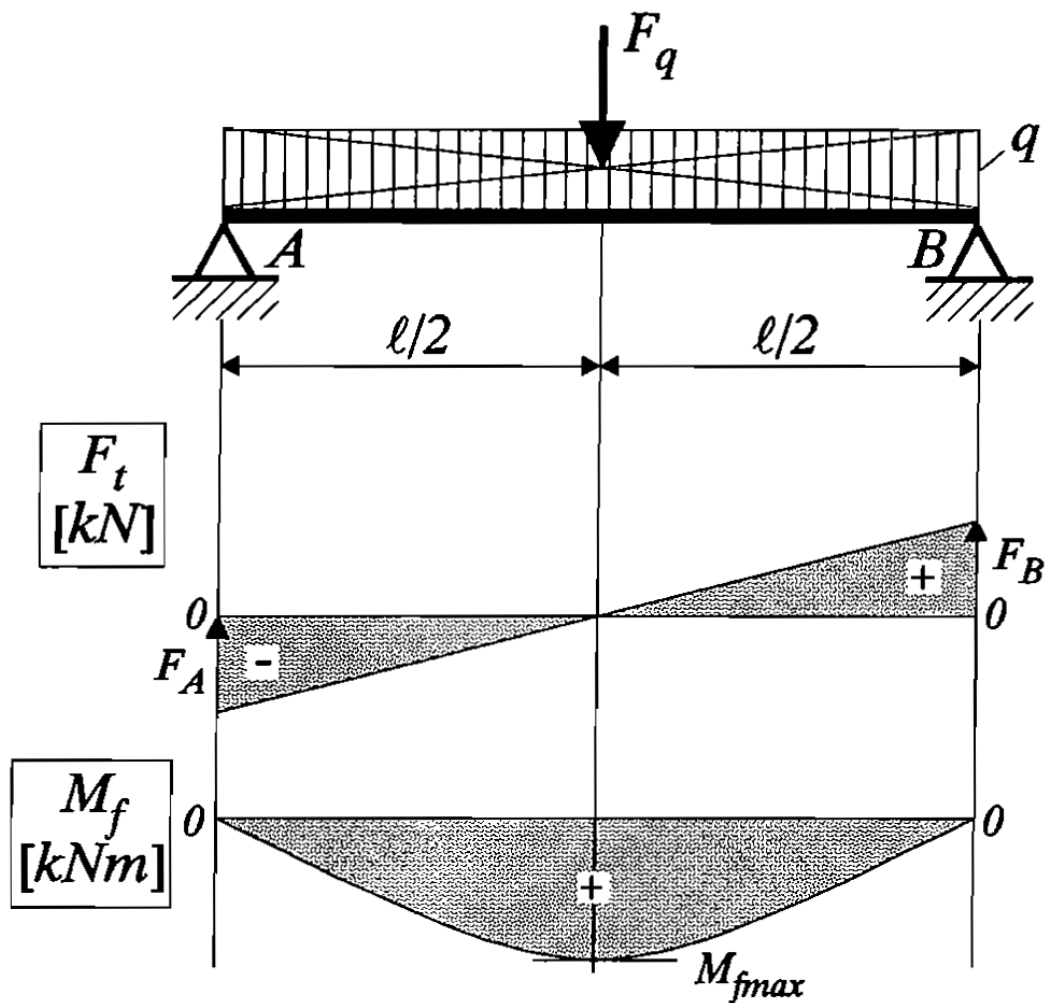
Отпори ослонаца су:

$$\sum F_i = 0 \Rightarrow F_A = F_B = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{130 \cdot 15}{2} = 975 \text{ kN}$$

Максимални момент савијања је за $z = l/2$ и износи:

$$M_f = M_{fmax} = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{130 \cdot 15^2}{8} = 3660 \text{ kNm}$$

Статички дијаграми за посматрани проблем дати су на слици 25.



Слика 25. Статички дијаграми

Потребан отпорни момент нето пресека у средини распона, јер је то пресек са највећим моментом савијања, јесте:

$$W_n = \frac{M_{fmax}}{\sigma_{dop}} = \frac{3660 \cdot 10^3}{140 \cdot 10^6} = 26400 \text{ cm}^3$$

Потребна површина нето пресека ојачаног ламелама је:

$$A_p = \frac{W_n}{h_o} - \frac{W_0}{H} = \frac{26400}{100} - \frac{4500}{157} = 145,9 \text{ cm}^2$$

Где је:

W_0 - отпорни момент вертикалног лима

$$H = h_o + 2 \cdot t = 1500 + 2 \cdot 35 = 1500 + 70 = 1570 \text{ mm} = 157 \text{ cm}$$

$t = 35 \text{ mm}$ - укупна дебљина свих ламела на највећем делу.

Дакле, усвојене димензије су $\neq 420 \times 35$. Статичке вредности за заварени лимени носач дате су у Таблици 2.

- Контрола напона у носачу

Ивични нормални напон у средини распона

$$\sigma_{max} = \frac{M_{fmax}}{W_{3n}} = \frac{3660 \cdot 10^3}{26400 \cdot 10^{-6}} = 127,27 \text{ MPa} < \sigma_{dop} = 140 \text{ MPa}$$

Смичући напон у пресеку десно од ослонца

Максимална трансверзална сила је $F_T = F_A = F_B = 975 \text{ kN}$. У пресеку десно од ослонца, $z = 0$, нема ламела. Смичући напон је:

$$\tau_{max} = \frac{F_A \cdot S_x}{I_x \cdot \delta_o} = \frac{975 \cdot 9760}{1307900 \cdot 1,2} = 60,6 \text{ MPa} < 0,6 \cdot \sigma_{dop} = 84 \text{ MPa}$$

С обзиром на то да су оба напона мања од одговарајућих дозвољених напона усвојени носач задовољава.

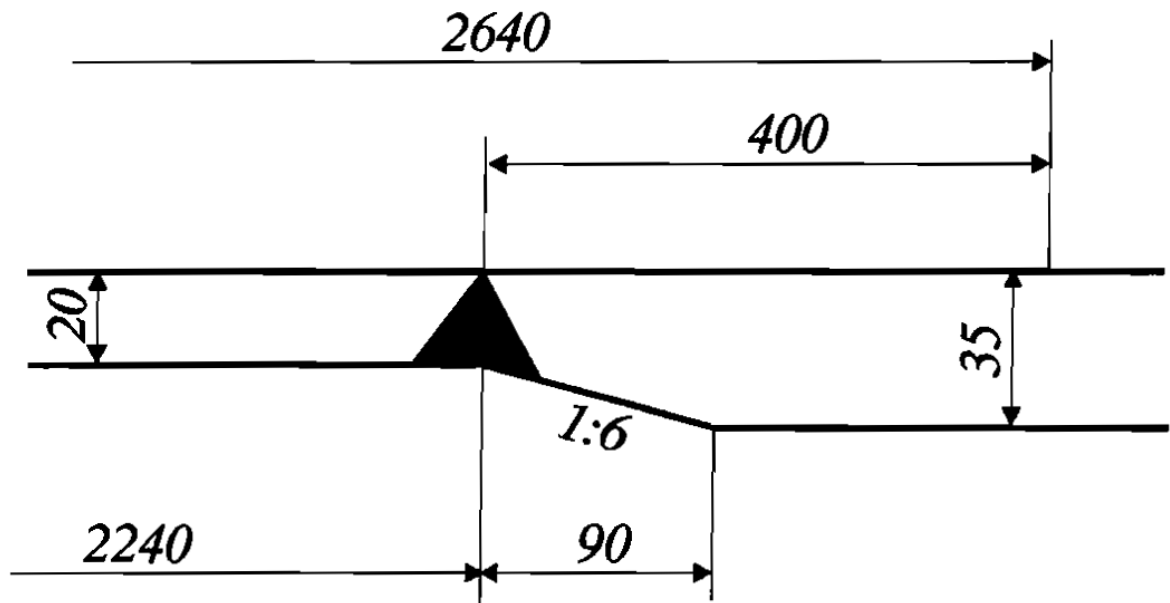
- Одређивање теоријских дужина ламела

$$x = \frac{0,88 \cdot l}{2} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{M_{nosiv}}{M_{max}}} \right) = \frac{0,88 \cdot 15}{2} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{2350}{3660}} \right) = 2,64 \text{ m}$$

Теоријска дужина средње ламеле је: $l - 2x = 15 - 2 \cdot 2,64 = 9,72 \text{ m}$

- Контрола упоредног напона у шавовима за везу вертикалног лима и ламеле

Најосетљивије место у конструкцији биће на месту почетка средње дебеле ламеле. Ту је исцрпљена моћ ношења пресека са првом ламелом, а попречна сила која изазива смичући напон је знатна тако да упоредни напон може прећи границу дозвољеног. Због тога се место наставка помера према ослоњу за ширину ламеле, у овом случају за 0,4 m , слика 26.



Слика 26. Теоријски почетак дебље ламеле

На том месту је трансверзална сила:

$$F_T = F_A - qx = 975 - 130 \cdot 2,24 = 683,8 \text{ kN}$$

Напон на месту наставка у шавовима за везу ребра и подвезе:

$$\sigma_u = V_{II} = \frac{F_T \cdot S_x}{I_x \cdot 2a} = \frac{683,8 \cdot 9760}{1307900 \cdot 2 \cdot 0,6} = 42,6 \text{ MPa}$$

I_x – момент инерције основног пресека

S_x - статички момент основног пресека

a - дебљина шав

Упоредни напон је:

$$\sigma_u = 42,6 \text{ MPa} < \sigma_{u,dop} = 105 \text{ MPa}$$

Контрола напрезања шавова у пресеку непосредно поред ослонца:

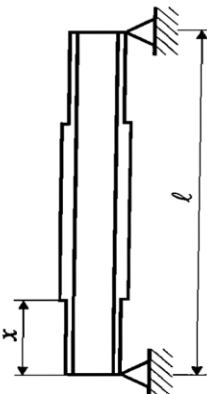
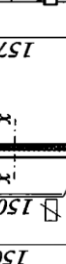
На том месту трансверзална сила је:

$$F_T = F_A = 975 \text{ kN}$$

па је упоредни напон:

$$\sigma_u = V_{II} = \frac{F_T \cdot S_x}{I_x \cdot 2a} = \frac{975 \cdot 9760}{1307900 \cdot 2 \cdot 0,6} = 61 \text{ MPa} < \sigma_{u,dop} = 105 \text{ MPa}$$

Таблица 2. Статичке вредности за заварени лимени носач

Redni broj			Skica poprečnog preseka		Dimenzije		Podaci za površine		Podaci za statičke momente			Podaci za momente inercije		Podaci za otporne momente i momente nosivosti			
	2	3					Delovi pojedinačno	Ukupno	Odstojanje težišta elemenata od težišta preseka	Statički momenti elemenata	Ukupno	I_x elemenata preseka	I_x preseka elementa	V šina	Otporni momenti W_n neto preseka	Momenti nosivosti W_n max	Najveći napon
1	180	3			Vertikalni lim 1500x12		4	5	37,5	3375	8	10	13	14	15	16	17
1	90				750x12							337500					
2	168				Prva lamela 420x20		168				9760	970400	1307900	77	17000	2350	138
2	84				420x20		84	348	76	6384							
3	294				Druga lamela 420x35		294		76,75	11282	14657	1732000	2069500	78,5	264000	3660	
3	147				420x35		147	542									

- Провера стабилности вертикалног лима против избочавања за заварени носач

Прво поље до ослонца:

$$a = 150 \text{ mm}$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$Q_x = F_A = 975 \text{ kN}$$

$$M_x \approx 0$$

$$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{150}{150} = 1$$

критичан напон је:

$$\tau_{ki} = k \cdot \sigma_e$$

$$k = 5,34 + \frac{4}{\alpha^2} = 5,34 + \frac{4}{1^2} = 9,34$$

$$\sigma_e = 1898 \cdot \left(\frac{\delta_0}{b}\right)^2 = 1898 \cdot \left(\frac{1,2}{150}\right)^2 \approx 12 \text{ MPa}$$

Заменом се добија:

$$\tau_{ki} = 9,34 \cdot 12 = 112,1 \text{ MPa}$$

Упоредни напон избочавања је:

$$\sigma_{uk} = \tau_{ki} \cdot \sqrt{3} = 112,1 \cdot \sqrt{3} = 194 \text{ MPa} \approx \sigma_p = 192 \text{ MPa}$$

Редуковани упоредни напон у овом случају износи:

$$\sigma_{uk} = \sigma_{uki} = 194 \text{ MPa}$$

Напон од оптерећења:

$$\tau_{sr} = \frac{Q_x}{b \cdot \delta_0} = \frac{975 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}} = 54,2 \text{ MPa}$$

Упоредни напон је:

$$\sigma_u = \tau_{sr} \cdot \sqrt{3} = 54,2 \cdot \sqrt{3} = 93,7 \text{ MPa}$$

Степен сигурности против избочавања:

$$\vartheta_b = \frac{\sigma_{uk}}{\sigma_u} = \frac{194}{93,7} = 2,07 > 1,35$$

Поље до средине распона

$$\alpha = 1$$

Момент савијања у пресеку

$$x = \frac{l}{2} - \frac{a}{2} = \frac{15}{2} - \frac{1.5}{2} = 7,5 - 0,75 = 6,75 \text{ m}$$

$$M_{x=6,75} = F_A \cdot x - q \cdot \frac{x^2}{2} = 975 \cdot 6,75 - 130 \cdot \frac{6,75^2}{2} = 3620 \text{ kNm}$$

Трансверзална сила у истом пресеку је:

$$Q_{x=6,75} = F_A - q \cdot x = 975 - 130 \cdot 6,75 = 97,5 \text{ kN}$$

Критични напони:

$$\tau_{ki} = k \cdot \sigma_e$$

$$k = 5,34 + \frac{4}{\alpha^2} = 5,34 + \frac{4}{1^2} = 9,34$$

$$\sigma_e = 1898 \cdot \left(\frac{\delta_0}{b}\right)^2 = 1898 \cdot \left(\frac{1,2}{150}\right)^2 \approx 12 \text{ MPa}$$

Заменом се добија:

$$\tau_{ki} = 9,34 \cdot 12 = 112,1 \text{ MPa}$$

$$k_2 = 23,9 \text{ (за савијање)}$$

$$\sigma_{1ki} = k \cdot \sigma_e = 23,9 \cdot 12 = 286,8 \text{ MPa}$$

Напони од оптерећења су:

$$\sigma_1 = \frac{M_{x=6,75}}{W_x^{3L}} = \frac{3620 \cdot 10^3}{26400 \cdot 10^{-6}} = 137,1 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{Q_{x=6,75}}{b \cdot \delta_0} = \frac{97,5 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}} = 5,4 \text{ MPa}$$

Упоредни напон је:

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau^2} = \sqrt{137,1^2 + 3 \cdot 5,4^2} = 137,4 \text{ MPa}$$

Упоредни напон избочавања:

$$\sigma_{uki} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau^2}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1ki}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ki}}\right)^2}} = \frac{137,4}{0,7805} = 285,9 \text{ MPa} > \sigma_p = 192 \text{ MPa}$$

Редуковани упоредни напон је таблична вредност:

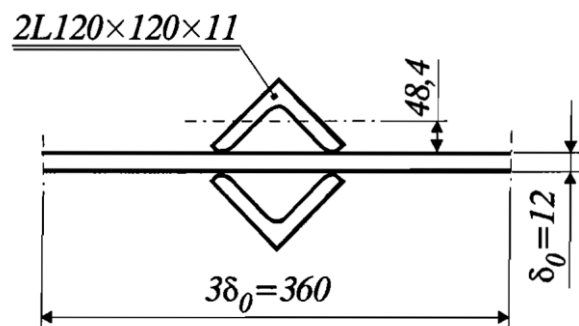
$$\sigma_{uk} = 222,3 \text{ MPa}$$

Степен сигурности против избочавања је:

$$\vartheta_b = \frac{\sigma_{uk}}{\sigma_u} = \frac{222,3}{137,4} = 1,62 > 1,35$$

- Прорацун попречног укрућења изнад ослонца

Пресек укрућења приказан је на слици 27.



Слика 27. Попречно укрућење изнад ослонца

Слободна висина укрућења је:

$$l_k = 150 \text{ cm}$$

Момент инерције пресека укрућења је:

$$I = 2 \cdot (140 + 25,4 + 4,84^2) = 1460 \text{ cm}^4$$

Површина пресека је:

$$A = 2 \cdot 25,4 + 36 \cdot 1,2 = 50,8 + 43,2 = 94 \text{ cm}^2$$

Полупречник инерције је:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{1460}{94}} = 3,95 \text{ cm}$$

Виткост је:

$$\lambda = \frac{l_k}{i} = \frac{150}{3,95} = 38 \xrightarrow{\text{усваја се}} \omega = 1,10$$

Напон извијања је:

$$\sigma = \frac{F_A}{A} \cdot \omega_x = \frac{975 \cdot 10^3}{94 \cdot 10^{-4}} \cdot 1,10 = 103,7 \text{ MPa}$$

5. Закључак

При конструисању сваке конструкције циљ је постићи најекономичније искоришћење материјала уз истовремено задовољење намене и могућности преношења оптерећења. Међутим, избор конструкције ипак зависи од низа фактора као што су врсте напрезања која се јављају у конструкцији.

Један од најбитнијих чиниоца је поузданост конструкције. И можемо рећи да она обухвата три појма: сигурност, функционалност и трајност. Као прво конструкција треба да испуни услов сигурности, који је директно повезан са самом носивошћу, односно способношћу да се одупре свим дејствима која се могу јавити у току израде и експлоатације. Осим овога, конструкција треба задовољити архитектонске и естетске захтеве.

При конструкцији заварених лимених носача треба детаљно дефинисати оптерећења којима је носач оптерећен. Такође треба дефинисати величину, односно да ли је носач оптерећен центрично или ексцентрично. Треба извршити анализу начина ослањања носача на његовим крејевима.

Основни задатак конструктора је да направи одређену конструкцију, у ово случају заварени лимени носач, водећи рачуна да утрошак челика буде минималан, а да при томе буде испуњен услов одговарајуће носивости. Могућност промене попречног пресека је једна од најбитнијих карактеристика заварених лимених носача.

У раду је укратко објашњена теорија везана за пуне лимене носаче. Прорачуном је димензионисан заварени лимени носач, приказано деловање критичних напона, проверено да ли постоји избочавање вертикалног лима и постављена укрућења.

У данашње време прорачун и димензионисање металних конструкција је доста олакшано применом савремених софтверских алата, због својих предности у односу да традиционалне методе прорачунавања.

Литература

- [1] Буђевац Д., Марковић З. И др., Металне конструкције, Грађевинска књига, Београд, 2007. конструкција, Грађевинска књига, Београд, 1986.
- [2] Петковић З., Острић Д., Металне конструкције у машиноградњи, Институт за механизацију Машинског факултета у Београду, Београд, 1996.
- [3] Бабин Н., Бркљаћ Н., Шостаков Р., Металне конструкције, ФТН Издаштво, Нови Сад 2006.
- [4] Милосављевић М., Радојковић М., и Кузмановић В.: Основи челичних конструкција, Грађевинска књига, Београд, 1984.
- [5] Николић Р., Марјановић В., Металне конструкције- Приручник за прорачуне, Машински факултет, Крагујевац, 1998.
- [6] Зарић Б., Стиппанић Б., Буђевац Д.: Челичне конструкције у грађевинарству, Грађевинска књига, Београд 1990.
- [7] Николић Р., Марјановић В., Металне конструкције-збирка решених задатака, Машински факултет, Крагујевац, 2013.
- [8] Златко Марковић, Гранична стања челичних конструкција према еврокоду, Београд, 2014.
- [9] <http://www.indenna.si/> , преузето 20.3.2015.г.
- [10] <http://likaprom.me/me/3046/0/Masine/1/20/857/> ,преузето 19.3.2015.г.