

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Новаковић М. Никола

Пројектовање лаких металних конструкција

Дипломски рад

Крагујевац, 2016.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне дипломске студије

Смер: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Металне конструкције

Број индекса: 31/2000

Новаковић М. Никола

Пројектовање лаких металних конструкција

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Ружица Николић - ментор**
2. _____
3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

Крагујевац, 2016.

Univerzitet u Kragujevcu
Fakultet inženjerskih nauka

Predmet: Metalne konstrukcije

Kandidat: HOBAKOBH HUKOIA

Registarski broj: 31/2000

DIPLOMSKI RAD

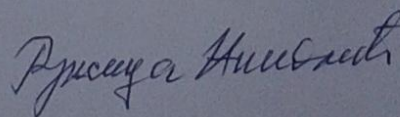
Naslov: **Projektovanje lakih metalnih konstrukcija**

U diplomskom radu treba da se obrade sledeći problemi:

1. Pojam lake i masivne gradnje metalnih konstrukcija
2. Prednosti i nedostaci lakih metalnih konstrukcija
3. Zavarivanje kao metod spajanja lakih metalnih konstrukcija
4. Metode proračuna lakih konstrukcija
5. Primeri proračuna i konstruisanja lakih metalnih konstrukcija

Literatura:

1. Georgijevski, V., Lake metalne konstrukcije, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1986.
2. Nikolić, R. i V. Marjanović, Metalne konstrukcije - priručnik za proračune, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1998.
3. Momirski, M., Elementi teorije skeletnih konstrukcija, Fakultet tehničkih nauka, Noi Sad, 1981.
4. Nikolić, R., J. Djoković i V. Marjanović, Metalne konstrukcije – Zbirka rešenih zadataka, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2013.



Predmetni nastavnik
Ružica Nikolić, Ph.D.

Увод

Лаке металне конструкције се све више користе за примене у различитим гранама индустрије: машинској индустрији, аутомобилској и авио индустрији, грађевинарству и другим. Предности лаких конструкција, посебно просторних решеткастих система, су вишеструке, а пре свега то су мала маса конструкције уз велику носивост, лакоћа спајања елемената, могућност серијске производње елемената и спојница, висока поузданост конструкција од ових елемената.

У овом дипломском раду су дате врсте, начини остваривања и карактеристике просторних решеткастих система, као и поступци заваривања ради спајања конструкције у целину. Такође су приказани конкретни реализовани примери пренамене возила из теретног у путнички програм применом лаке конструкције сопственог дизајна кандидата.

Introduction

The light-weight structures are being increasingly applied in different branches of industry: metal working industry, automobile and airplane manufacturing industries, construction industry and others. Advantages of the light-weight structures, especially the spatial truss systems, are manifold, primarily those are the small mass with high carrying capacity, ease of connecting structural elements, possibility for batch production of elements and connectors, high reliability of structures made of those elements.

In this diploma thesis are presented types, ways of connecting and characteristics of the spatial truss systems, as well as the welding procedures for connecting the structure into a whole. In addition, the concrete examples are given of the realized structures where the changes of the vehicle's purpose was done, from the commercial vehicle to a passenger car, by application of a light-weight structure of the candidate's own design.

САДРЖАЈ:

1. Појам лаке и масивне градње металних конструкција.....	2
1.1 Начини и системи извођења металних конструкција.....	6
1.2 Примери изведених конструкција.....	10
2. Предности и недостаци лаких металних конструкција.....	16
3. Методе прорачуна лаких металних конструкција.....	17
3.1 Метода коначних елемената.....	17
3.2 Нелинеарна теорија за прорачун просторног решеткастог система.....	25
4. Заваривање као метод спајања лаких металних конструкција.....	27
4.1 Основни појмови.....	27
4.2 РЕЛ поступак.....	29
4.3 МИГ/МАГ поступак.....	30
4.4 ТИГ поступак.....	31
4.5 Технологија заваривања.....	32
5. Примери конструисања лаких металних конструкција.....	33
Пример 1	33
Пример 2.....	37
Закључак.....	42
Литература.....	43

1. Појам лаке и масивне градње металних конструкција

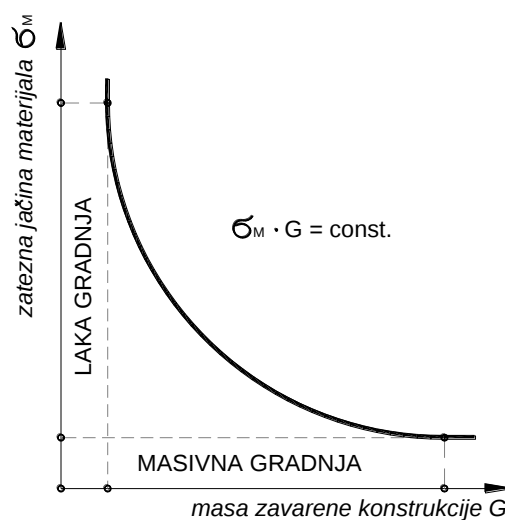
Појам лаке градње металних конструкција као и статички прорачуни били су почев од XIX века, предмет интересовања бројних аутора који су ту област разматрали и анализирали у научним радовима. Најпознатија имена која се од почетка срећу у литератури су: *H. Stenker*, *O. Büttner*, *W. Gütner* из Немачке, *Markowsk* из Енглеске, *Le Ricolais* из САД-а, *Shatellau* из Француске и други, [1].

Комплексна дефиниција појма лаке градње, дата од стране Института за лаку градњу из Дрездена, гласи: *"То је тесна сарадња између стручњака за материјале, конструктора, статичара, инжењера за изведбу, архитеката, економиста; када настаје најбоље и најоптималније решење са најмањим утрошком материјала, најсавршенијим извођењима и при томе најмањим трошковима"*.

Данас многи индустријски производи могу бити предмети лаке градње, а нарочито они који имају много тона тежине. Зато се данас лака градња развила у посебну научну дисциплину.

Поред грађевинске индустрије, лака градња се данас много користи и у области аутомобилске и машинске индустрије, авио индустрије, о чему ће бити примера њене конкретне примене.

За лаку градњу металних конструкција постоји законитост између уграђене количине материјала – масе G и јачине примењеног материјала σ_M , а дата је на слици 1 дијаграмом:



Слика 1. Дијаграм односа масе и затезне јачине материјала

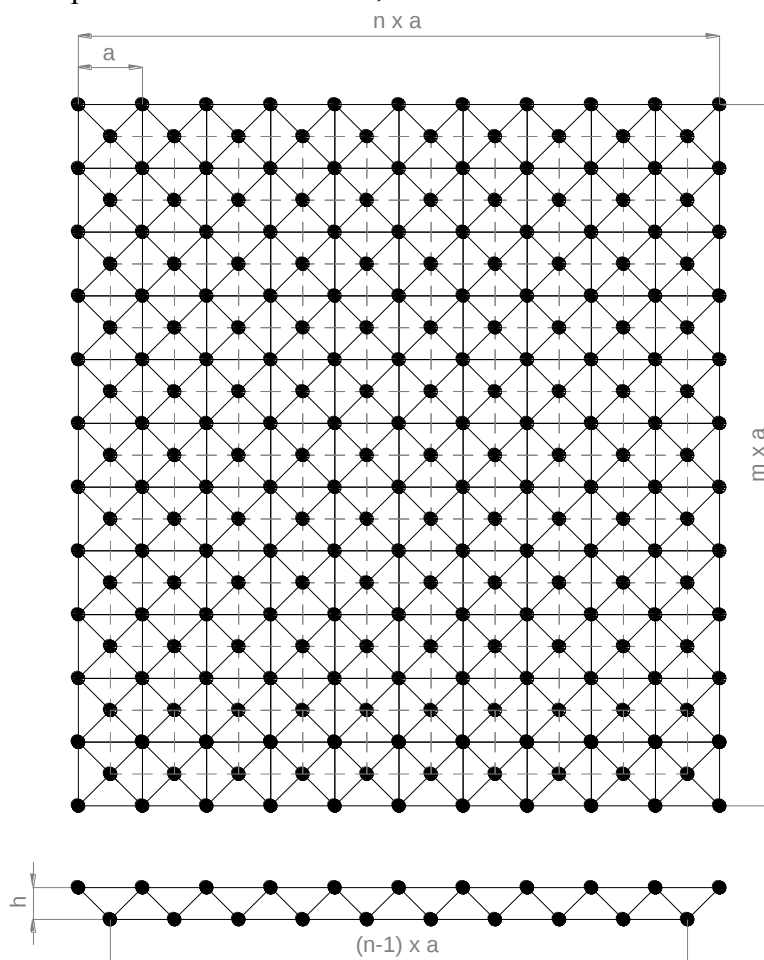
Овај дијаграм показује да се избором и коришћењем материјала веће јачине кидања σ_M постиже мања тежина уграђеног материјала.

Појам лаке градње металних конструкција данас представља највиши домет у развоју технике извођења металних конструкција које су намењене првенствено за градњу:

- индустријских хала;
- складишта материјала и робе;
- спортских и изложбених (сајамских) хала и објеката;
- кровних конструкција покривених трибина стадиона;
- надстрешница за покривене просторе као што су платои и паркинзи;
- супермаркета;
- универзалних сала великих димензија;
- челичних стубова и мостова;
- челичних носећих конструкција кранова;
- авионских хангара...

Примена принципа лаке градње металних конструкција базира се на изради просторних решеткастих система (ПРС) чиме се постиже смањење сопствене тежине-месе објекта.

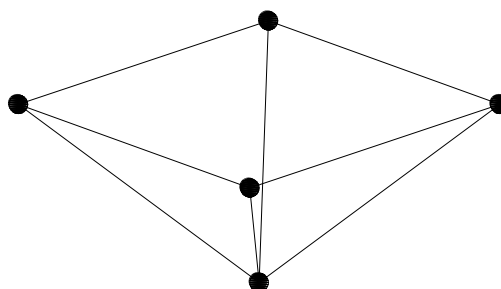
Сам просторно решеткасти систем се најчешће формира од равних и паралелних мрежастих појасева и решеткасте испуне којом се повезују чворови једне и друге појасне мреже, што је шематски приказано на *сликама 2, 3 и 4*.



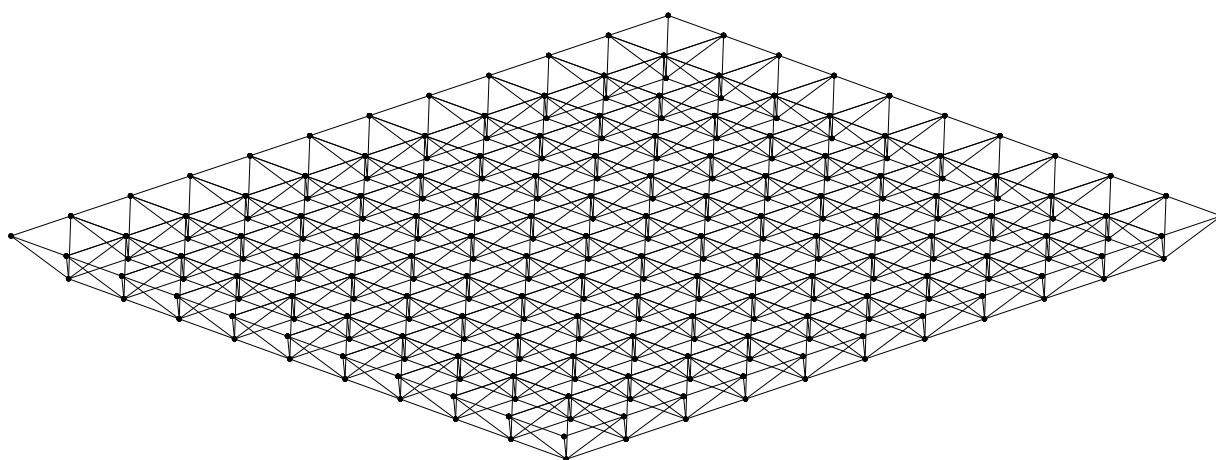
Слика 2. Правоугаони двосмерни ПРС

где су:

- a** – димензије основног елемента у ПРС;
- n** , **m** – број елемената на одређеној ширини и дужини ПРС-а;
- h** – растојање горње и доње појасне мреже.



Слика 3. Основни елемент правоугаоног ПРС

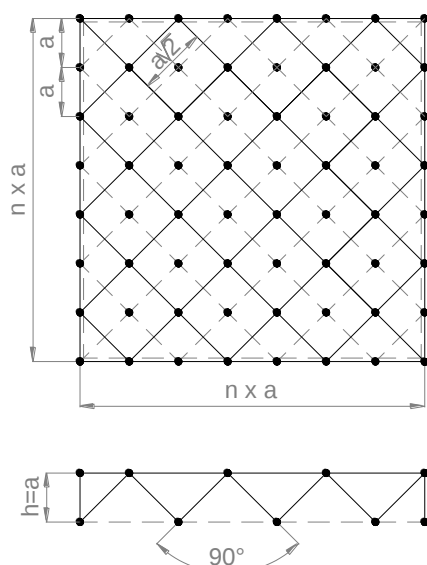


Слика 4. Изглед просторно решеткастог система у простору

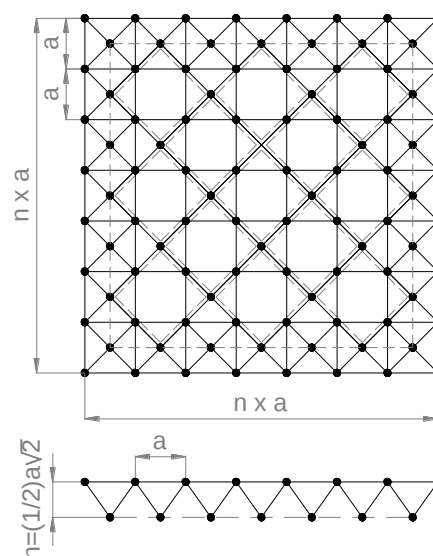
Слике 2, 3 и 4 представљају **правоугаони (ортогонални) двосмерни ПРС**, састављен од пирамида са квадратном основом, чији су врхови спојени у доњем појасу. Уколико се за висину усвоји да је $h = \frac{1}{2}a\sqrt{2}$ користи се једна јединствена дужина штапова. Код других висина мења се дужина дијагонала. Систем носи у два ортогонална правца.

Основна предност **косог (дијагоналног) двосмерног ПРС**, слика 5, у односу на предходни је што овакав ПРС омогућава веће распоне, док контура система заклапа угао од 45° са штаповима мреже горњег и доњег појаса, што додатно укрпује конструкцију за исте вредности модула и исту покривену површину, јер су штапови у угловима краћи и крући, па служе као ослонци дужим штаповима.

На слици 6 је приказан **укрштени двосмерни ПРС**, који представља комбинацију предходна два ПРС. Доњи појас је под углом од 45° у односу на горњи, чиме су штапови доњег појаса дужи за $\sqrt{2}$ од штапова горњег појаса који су оптерећени на притисак. У овако конципираном ПРС сваки други модул може бити празан, тј. без дијагонала, што захтева релативно мањи број уграђених елемената. Овим је унутрашња статичка неодређеност смањена.



Слика 5. Коси (дијагонални) двосмерни ПРС



Слика 6. Укрштени двосмерни ПРС

Поред поменутих и најчешће коришћених двосмерних просторно решеткастих система, у пракси се користе још и **тросмерни (директни и инверзни) ПРС**, код којих се оптерећење преноси у три правца, **четворосмерни ПРС**, формиран од четири вертикална решеткаста носача који се постављају у четири карактеристична носећа правца, код кога велики број оса даје релативно мале силе у штаповима, али и велике трошкове при монтажи због великог броја елемената. Веома повољна и честа је примена ПРС са троугластим модулима, као и ПРС са шестоугаоном основом, посебно код већих распона, ограничених висина и вишеспратних конструкција, или када се захтева застакљивање покривне површине.

На основу наведених примера може се закључити да се просторни решеткасти системи могу формирати од карактеристичних правилних и неправилних геометријских тела (полиедара), и њихових комбинација, са основним циљем да се добије најповољнији однос штапова и чворова у систему, испуњавајући при том и остале захтеве који се траже од конструкције.

За сваку лаку градњу металних конструкција важно је остварити значајне економске уштеде, а што се може постићи:

- применом унификације и серијске израде њених делова;
- смањењем масе-тежине делова који се транспортују и монтирају;
- смањењем времена за монтажу конструкције.

Све ово се може остварити избором савремених материјала и применом нових конструкцијских и технолошких решења.

У литератури се налазе и бројчани показатељи уштеда при градњи објекта лаке градње у односу на класичну масивну челично-бетонску конструкцију, и то:

- од 35 до 45% мање масе;
- од 25 до 35% јефтинији ;
- сама монтажа временски је краћа и до 60%, [1].

1.1. Начини и системи извођења металних конструкција

У почетку су сви системи били изведени на класичан начин, спајањем штапова у чворовима "по мери" завртњима, а касније заваривањем. Овакав начин спајања се ипак показао као непрактичан у већини случајева, јер доводи до низа потешкоћа код постизања прецизности при извођењу конструкције.

Данас у свету постоје бројни примери примене лаке градње металних конструкција при изради објеката најразноврсније намене.

Карактеристично је да се ради о објектима велике површине на којима су постигнути распони од двадесетак па и стотинак метара, без постављања међуослонаца.

Током времена, у циљу побољшања и усавршавања начина израде ПРС, изналажена су многа практична решења која су у многостаклачавала начин реализације. Најчешће примењивани и најраспрострањенији у употреби су следећи системи:

- **МЕРО**¹ – који се први пут појавио на тржишту 1942. године, као један од најчешће примењиваних система, чији је творац *др. инж. Max Mengerlinghausen* из тадашње СР Немачке, [1]. Штапови (слика 7) који се најчешће користе у овом систему су цевастог профила са округлим попречним пресеком, а могу бити и правоугаоног попречног пресека, а спајају се у чворовима (слика 8) који омогућавају повезивање до 18 штапова у један чвор. Овај систем је приказан на слици 9 ,



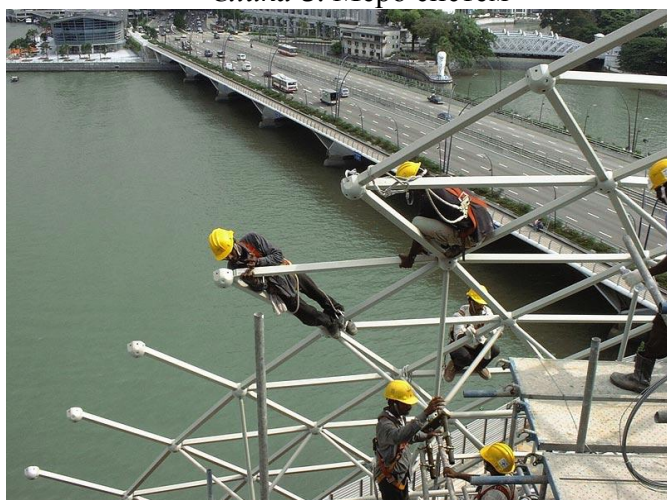
Слика 7. Штапови меро система



Слика 8. Меро систем



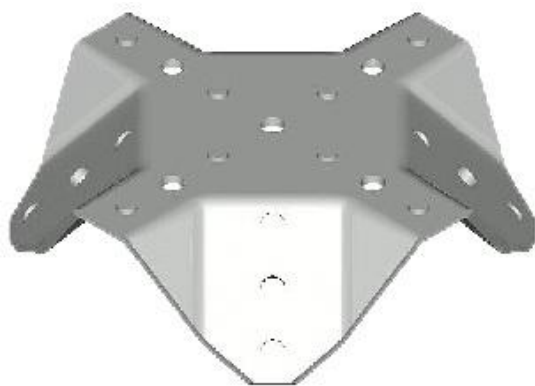
Слика 9. Чвор меро система



Слика 10. Монтажа меро система

¹ Нем. MERO (*ME*ngerlinghousens *RO*hr – *Bau*weise)

- **УНИСТРУТ**² - се појавио на тржишту 1955. године, код кога су сви штапови истих попречних пресека и истих дужина, међусобно спојени завртњима преко чворног лима, *слика 11*. Велико интересовање за овај систем је довео до више модификација чворних детаља.



Слика 11. Чворни лим униструт система

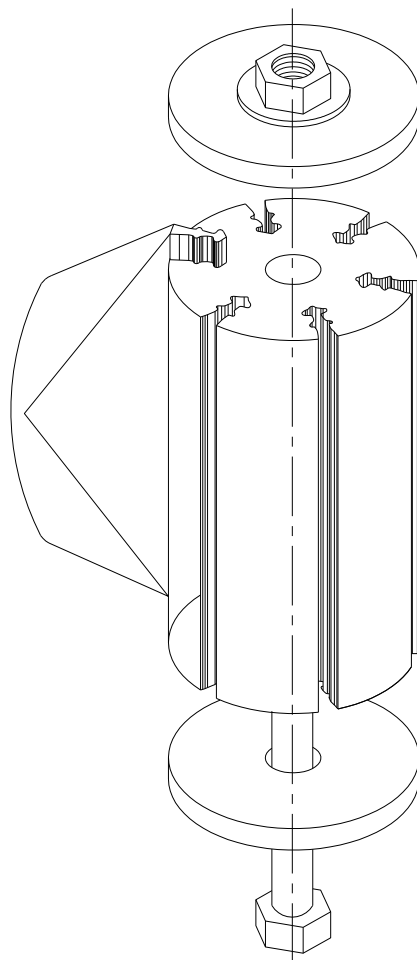
- **ТРИОДЕТИК**³ - у коме су штапови међусобно спојени без примене заваривања, завртњева и закивака. Спојница (*слика 12*) је алуминијумска или челична главчина са назубљеним процепима у потребним правцима, у које се постављају пресовани крајеви цевастих штапова, при чему се накнадном деформацијом главчине успоставља чврста веза (*слика 13*). Спајање спојница је могуће извести и вијчаном везом, помоћу вијка и навртке, (*слика 14*), што умногоме олакшава монтажу и скраћује време завршетка радова.



Слика 12. Триодетик спојница



Слика 13. Чвор триодетик система



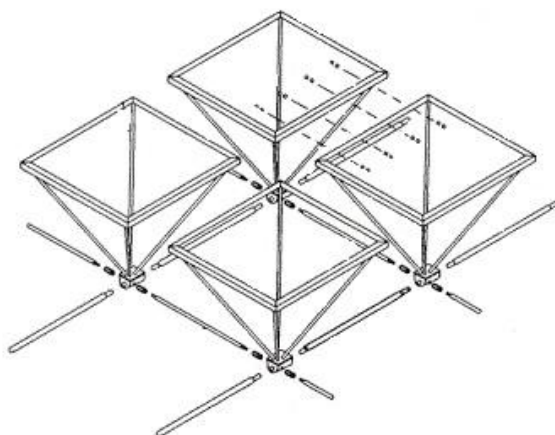
Слика 14. Осигурање вијчаном везом

² Енгл. UNISTRUT, настао у Америци, у организацији Attwood Development Co. of Muchigan

³ Развијен 1955. године, од стране канадске фирме Fentiman Co. Ltd

- **СПЕЈС ДЕК**⁴ - осмишљен у Великој Британији 1958. године, [1] а чине га предходно обликоване пирамиде са квадратном основом, и врховима окренутим на доле. Врхови пирамида су спојени затегама са навојем, које истовремено представљају доње појасне штапове. Квадратне основе (горњи појасни штапови) решетке сачињени су од угаоних пресека, а округли цевasti профили се користе за дијагонале, што је шематски приказано на *слици 15*.

- **ОКТАПЛЕТ**⁵ - представља прву заварену решеткасту конструкцију која се појавила на тржишту око 1960. године, у фирми *Mannesmann AG*, која је откупила патент *H. Köning-a*, [1] Овај систем сачињавају штапови од цевастог округлог профила, исечени под правим углом, заварују се на челичне шупље кугле угаоним шавовима. Челичне кугле су ојачане у средини једним округлим диском, тако да формирају делове октаедра, *слика 14*.



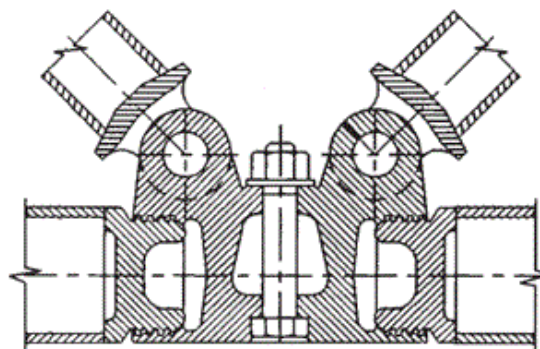
Слика 15. Спејс дек систем



Слика 15. Октаплет систем

- **УНИБАТ**⁶ - који се, слично СПЕЈС ДЕКУ, састоји од формираних пирамида као основа, код којих је горњи појас просторне решетке изведен од штапова дуплог Т профила, доњи појас од округлих цевастих, а дијагонале од квадратних цевастих профила, [1]. Овај систем је погодан за примену код вишеспратне челичне конструкције зграда, паркинга, и др.

- **НОДУС**⁷ - (*слика 16*), код кога се спојница састоји од две ливене полушколке, на коју могу да се прикључе цевasti штапови кружног, квадратног и правоугаоног попречног пресека, [1]. За велики број прикључених штапова конструисана је релативно компликована спојница са зглобним везама *KONRAD-a* *WACHSMANN-a*, која пружа могућност да број прикључних штапова буде и до 20.



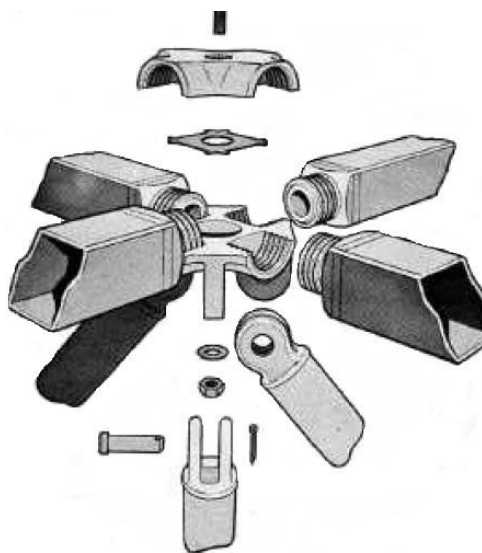
Слика 16. Пресек НОДУС спојнице

⁴ Енгл. SPACE DECK

⁵ Енгл. OKTAPLATTE system

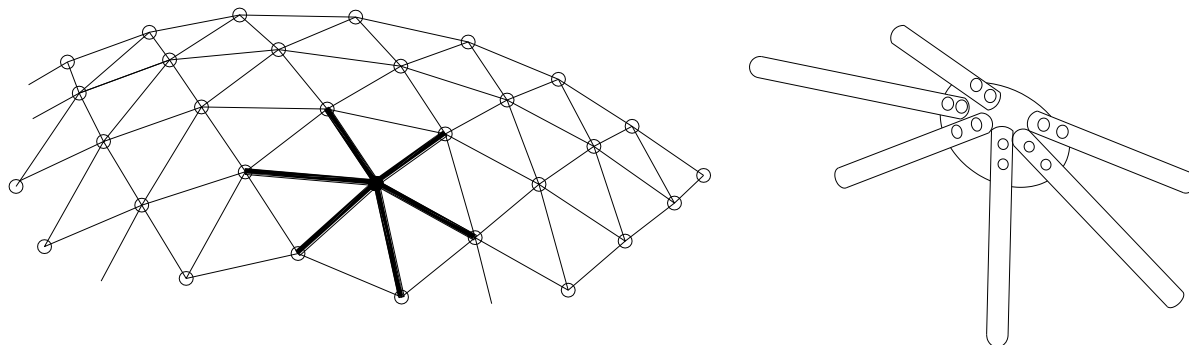
⁶ Енгл. UNIBAT, конструисао га је француз *Stephane du Shatelau*, '70-их година прошлог века

⁷ Енгл. NODUS, представљен јавности 1971. године, од стране *British Steel Corporation*



Слика 17. Склоп НОДУС спојнице

Код конструкција које су намењене за извођење купола, употребљава се спојница (чвор) **МАКОВСКИ**⁸ (слика 18), [1].



Слика 18. Скица куполе и спојнице МАКОВСКИ

Иако постоји велики број различитих патената и решења за спојнице и чворове ПРС, и даље се интензивно ради на њиховом усавршавању и новинама из ове области, како би се задовољили основни захтеви, да буду што економичнији и једноставнији за извођење, да имају што мању тежину, да се максимално умањи утицај момената савијања, и да омогуће што једноставније повезивање елемената штапова раличитих попречних пресека, односно, да буду што универзалнији.

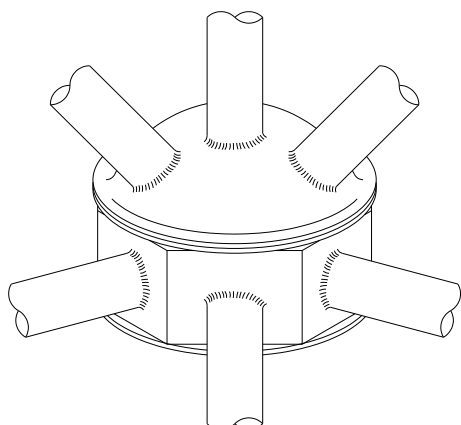
Овде се наводе још неки до сада патентирани типови спојница:

- **СЕГМО** спојница (слика 19), се састоји од једног дела у облику куполе, другог полигоналног дела. Сви штапови који се спајају у чвору секу се попречно и заварују за спојницу. Постоји варијанта овог типа спојнице која се спаја завртњима, при чему се купола и полигонални део склапају у целини преко централног завртња, [1].

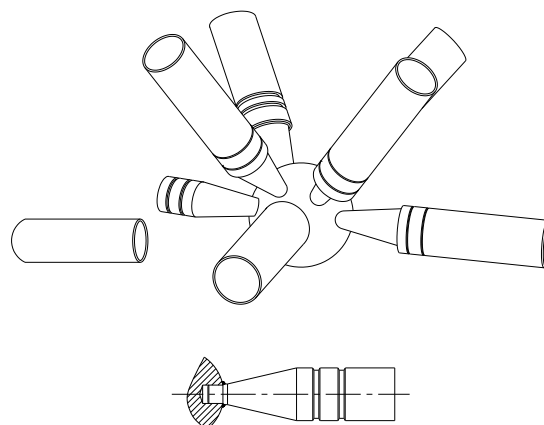
- **ХЕРИСОН**⁹ спојница (слика 20), која се састоји од централне кугле, на којој су заварени профилисани конзолни прикључци са жлебовима, [1]. На прикључке се монтирају цевасти штапови, а затим се помоћу хидрауличних преса врши спајање деформацијом на хладно.

⁸ Енгл. MAKOWSKI

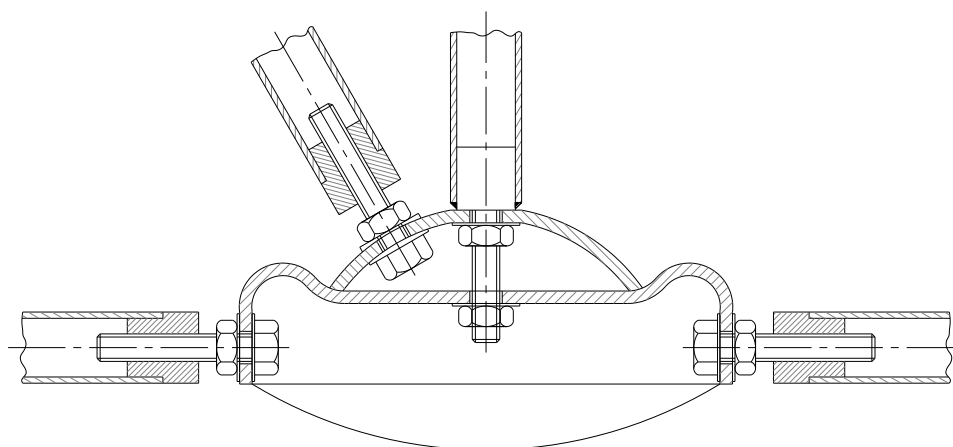
⁹ Енгл. HERISSON, у преводу значи ЈЕЖ



Слика 19. СЕГМО спојница



Слика 20. ХЕРИСОН спојница, модел и детаљ чвора



Слика 21. Вилеројева спојница

Поред **ВИЛЕРОЈЕВЕ**¹⁰ спојнице на слици 21, од познатијих су патентиране још и **ДЕЛКРОЈ**¹¹ спојница, спојница за **ТЕСЕП**¹² систем, **ТРАЈДАМАТЕК**¹³ спојнице и многе друге, [1].

1.2 Примери изведених конструкција

Да би се лакше сагледале могућности које омогућавају ови ПРС, илустративно ће у даљем тексту бити приказани само неки од примера конкретне примене лаких металних конструкција:

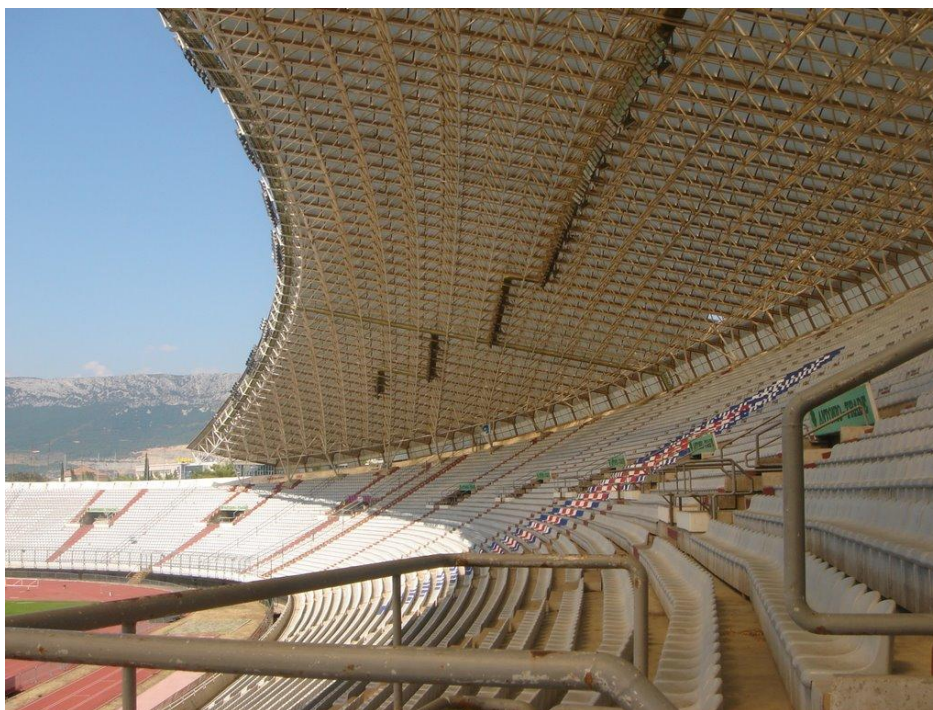
- Кровна конструкција надкривених трибина стадиона *Пољуд* (слике 22 и 23) у Сплиту, Хрватска, изведена је 1979. године у МЕРО-систему, са распоном унутрашњег лука од 202 m и ширином решетке од 44 m. Растојање горње и доње појасне мреже износи 2,3 m, а укупна тежина конструкције је 622t, односно 45,7 Kg/m², [1].

¹⁰ Енгл. VILLEROY

¹¹ Енгл. DELCROIX

¹² Енгл. TESEP

¹³ Енгл. TRIDIMATEK



Слика 22. Конструкција надкривених трибина стадиона Пољуд, Хрватска



Слика 23. Стадион Пољуд, Хрватска

- Једна од реализованих конструкција новијег датума на простору Србије, је заштитна заварена конструкција археолошког националног локалитета *Лепенски Вир*, слике 24, 25 и 26, који се налази у Ђердапској клисури, недалеко од Доњег Милановца. Решеткаста конструкција, пројектована и изведена 2010. године као заштитна лучна конструкција, нагибом прати контуру терена. У основи објекат има издужен и изломљен облик, који највећим делом прати облик археолошког налазишта, па је и сама конструкција изведена у неколико нивоа, слике 27 и 28, [4, 5, 8].



Слика 24. Лепенски Вир, Србија



Слика 25. Лепенски Вир, Србија, унутрашњост конструкције



Слика 26. Лепенски Вир, Србија, унутрашњост конструкције



Слика 27. Лепенски Вир, Србија, спољашњи изглед са Дунава



Слика 28. Лепенски Вир, Србија, 3Д модел конструкције

Једна од до сада највећих изграђених просторно решеткастих конструкција у МЕРО систему, је кровна конструкција за највећи покривени забавни парк на свету, под називом "Свет Ферарија"¹⁴, који се налази у Уједињеним Арапским Емиратима, источно од града Абу Даби, на острву Јас¹⁵, и покрива површину од чак 200 000 m² слике 14, 15, 16. У складу са називом, облик објекта је урађен да из ваздуха подсећа на каросерију познатог Фераријевог ГТ аутомобила.



Слика 14. Свет Ферарија, Абу Даби, УАЕ

Покривну решетку трокраког облика са централно постављеним "левком" чине 172 000 основних троугаоних елемената који су међусобно спојени помоћу 43 100 МЕРО спојнице (зглобова), са растојањем горње и доње решетке од 2.2 m.

Левак, слика 17, који је на врху пречника 100 m, а у основи 17m, и има површину од 10 000 m², налази се у централном делу објекта, са функцијом пропуштања дневне светлости, па је у сврху тога прекривен са 2 640 посебних стаклених соларних панела како би у објекту одржавао дневну температуру од 25°.

За комплетну конструкцију која је висока 50 m, било је потребно 12 370 t челика, који је против утицаја ветра, песка, топлоте, влаге и соли, у потпуности заштићен од корозије цинковањем, [6-8]

¹⁴ Енгл. "Ferrari World"

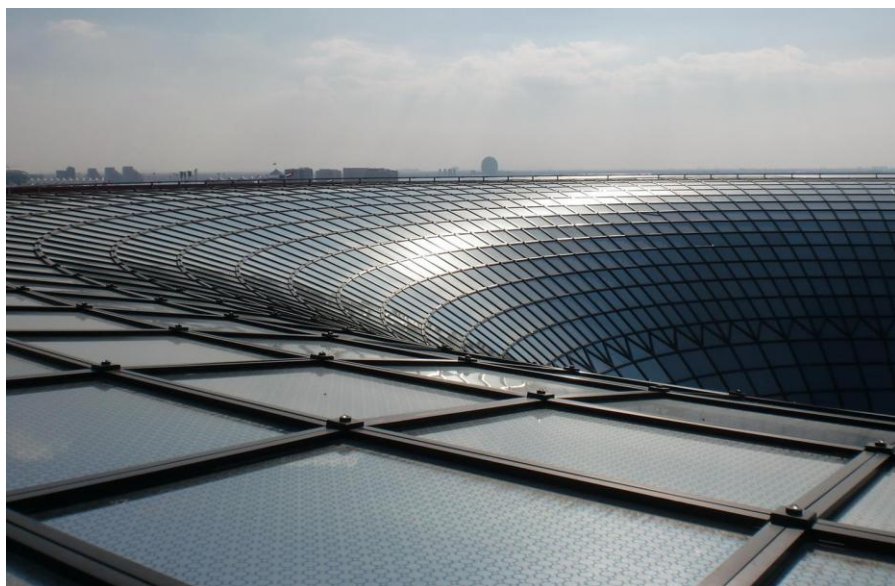
¹⁵ Енгл. Yas Island, површине 25 км², доскорашњи део пустиње, постало је вештачко острво прокопавањем канала и спајањем са Персијским заливом



Слика 15. Свет Ферарија, спољашња конструкција објекта



Слика 16. Свет Ферарија, унутрашња конструкција објекта



Слика 17. Свет Ферарија, спољашњост "левка"

Сви наведени примери изведених решења указују на многобројне креативне могућности извођења лаких конструкција, у зависности од њихове намене, уклапања у средину у којој је конструкција стационарана, и као такве постављају нове стандарде и отварају нова поглавља једне дисциплине која стално тежи надограђивању и усавршавању.



Слика 17. Свет Ферарија, унутрашњост "левка"

2. Предности и недостаци лаких металних конструкција

Конструкције лаке градње у односу на класичну, имају знатне предности, али и недостатке. Предности се огледају у:

- великој крутости при покривању великих површина, без потребе уградње међуослонаца. По потреби се могу поставити ослонци по целој контури – обиму објекта;
- релативно малој висини h конструкције у односу на распон L . Тај однос најчешће износи од $\frac{h}{L} = \frac{1}{15}$ до $\frac{h}{L} = \frac{1}{25}$. На овај начин се добија мања запремина простора за грејање и проветравање. С' обзиром на велике распоне треба очекивати и релативно веће силе у елементима, што директно утиче на избор типа и конструктивног решења система;
- томе што захтевају врло мало машинске обраде (рупе, брушење отвора, попречно заваривање на спојевима);

- већој искоришћености пресека, у смислу мање количине уграђеног челика, а тиме и мањи укупни трошкови у односу на одговарајуће класичне конструкције;
- равномернијој расподели просторних сила, а тиме и већа сигурност и повољнија расподела истих у случају оштећења појединих елемената или њиховог конструкцијског искључивања;
- повољним могућностима за серијску и индустријску производњу унифицираних компатибилних елемената, који се примењују у разним типовима градње, аналогно коришћењу стандардних елемената при изради металних конструкција;
- лакој и брзој монтажи целих изведених секција конструкције независно од атмосферских услова, као и могућност демонтаже и премештања, као и лаке адаптације (прилагођавање новој функцији);
- добрим могућностима за постављање свих врста инсталација – развода у свим правцима кроз саму конструкцију (електричне, телефонске, клима и др.);
- томе што пружају велике могућности конструкторима и архитектама за инвентивну градњу. Видљива носећа конструкција, као на пример код позоришта, биоскопа, пливачких базена и слично, поред естетског изгледа побољшава и акустику;
- већој сигурности и издржљивости код евентуалних пожара, у односу на класичне пуне носаче.

Недостаци су:

- потреба просторног спајања великог броја штапова;
- потреба сталног усавршавања принципа формирања чворова и спојница;
- обавезујућа антикорозивна заштита.

Република Србија је због свог скромног економског и технолошког напретка увозно зависна како за основни материјал челик, тако и за просторне раванске системе, као елементе за градњу лаких металних конструкција. Мали је број приватних фирми које располажу знањем из ове области, имају могућност реализације оваквих просторних система, и већина се своди на варијанте заварених конструкција.

3. Методе прорачуна лаких конструкција

3.1 Метода коначних елемената

Методe за решавање проблема механике се могу поделити у две групе – *аналитичке* и *нумеричке методе*, од којих ове друге, са појавом рачунара налазе све већу примену, поготово за решавање статички неодређених проблема. С тим у вези, развијена је посебна дисциплина, **метода коначних елемената** (МКЕ), као веома успешна метода за решавање линијских и плочастих статичких и динамичких проблема конструкција.

Примена МКЕ код решеткастих система је једноставнија, с обзиром да сваки штап представља један елемент код кога, у разматраним случајевима, спољашње силе делују само у чворовима (спојницама), јер су штапови изложени само аксијалним силама притиска или затезања. Дакле, МКЕ код оваквих система се своди на примену тачне методе деформације за просторне решеткасте системе.

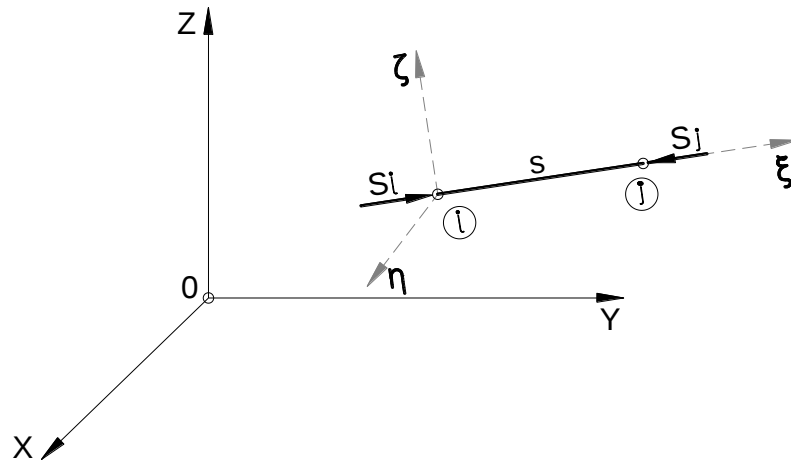
Ако се посматра један штап решеткастог система дужине "s" и чворове "i" и "j", као што је приказано на *слици 18* и ако се замисли покретни координатни систем $\zeta\eta$ при чему се координатни почетак налази на почетку штапа, а оса се поклапа са

правцем штапа, и један непокретни координатни систем OXYZ који је заједнички за све штапове, онда померања чворова "i" и "j" у покретном координатном систему могу да се изразе као:

$$\{u_i\} = \{u_{i\zeta}, 0, 0\}; \quad \{u_j\} = \{u_{j\zeta}, 0, 0\}; \quad (1)$$

а у непокретном координатном систему:

$$\begin{aligned} \{\bar{u}_i\} &= \{\bar{u}_{ix}, \bar{u}_{iy}, \bar{u}_{iz}\} & \bar{u}_{ix} &\equiv \bar{u}_i \\ \{\bar{u}_j\} &= \{\bar{u}_{jx}, \bar{u}_{jy}, \bar{u}_{jz}\} & \bar{u}_{iy} &\equiv \bar{v}_i \\ & & \bar{u}_{iz} &\equiv \bar{\omega}_i. \end{aligned} \quad (2)$$



Слика 18. Штап решеткастог система у покретном и непокретном координатном систему

Силе у чворовима i и j се у покретном координатном систему могу изразити као:

$$\{S_i\} = \{S_{i\zeta}, 0, 0\}; \quad \{S_j\} = \{S_{j\zeta}, 0, 0\}, \quad (3)$$

а у непокретном координатном систему

$$\begin{aligned} \{\bar{S}_i\} &= \{\bar{S}_{ix}, \bar{S}_{iy}, \bar{S}_{iz}\} \\ \{\bar{S}_j\} &= \{\bar{S}_{jx}, \bar{S}_{jy}, \bar{S}_{jz}\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Померања се мењају по линеарном закону, па функција замене може да се напише на следећи начин:

$$u = C_1 \zeta + C_2. \quad (5)$$

Из граничног услова за:

$$\begin{aligned} \zeta = 0 &\Rightarrow u = u_{i\zeta} \\ \zeta = s &\Rightarrow u = u_{j\zeta}, \end{aligned} \quad (6)$$

се одређују константе C_1 и C_2 :

$$\begin{aligned} u_{i\zeta} &= C_2 \\ u_{j\zeta} &= C_1 \cdot s + u_{i\zeta} \\ C_1 &= \frac{u_{j\zeta} - u_{i\zeta}}{s}. \end{aligned}$$

Ако се унесу константе C_1 и C_2 у једначину (5), добија се:

$$u = \frac{u_{j\zeta} - u_{i\zeta}}{s} \cdot \zeta + u_{i\zeta}$$

$$u = \left(1 - \frac{\zeta}{s}\right) u_{i\zeta} + \frac{\zeta}{s} u_{j\zeta},$$

што се може написати и у матричном облику:

$$\{u\} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\zeta}{s} & \frac{\zeta}{s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_{i\zeta} \\ u_{j\zeta} \end{Bmatrix}. \quad (7)$$

Овом једначином су изражена померања било које тачке елемената преко померања крајњих тачака елемената (чворних померања). Овај израз се може написати и у скраћеној форми:

$$\{u\} = [N] \cdot \{u\}_e, \quad (8)$$

при чему је $[N]$ матрица померања

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\zeta}{s} & \frac{\zeta}{s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Следећи корак је да се и дилатације и напони изразе у функцији чворних померања. У овом случају, специфичне дилатације су:

$$\varepsilon_\zeta = \frac{\Delta s}{s}, \varepsilon_\eta = 0, \varepsilon_\varsigma = 0,$$

односно, специфична дилатација по оси ζ је:

$$\varepsilon_\zeta = \frac{u_{j\zeta} - u_{i\zeta}}{s} = -\frac{1}{s} \cdot u_{i\zeta} + \frac{1}{s} \cdot u_{j\zeta}, \quad (10)$$

која у матричном облику гласи:

$$\{\varepsilon_\zeta\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_\zeta \\ \varepsilon_\eta \\ \varepsilon_\varsigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{s} & \frac{1}{s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_{i\zeta} \\ u_{j\zeta} \end{Bmatrix}. \quad (11)$$

У скраћеној форми ова дилатација може да се напише у облику:

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{u\}_e, \quad (12)$$

при чему је $[B]$ матрица дилатација

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{s} & \frac{1}{s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Према Хуковом закону напон је

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (14)$$

односно

$$\sigma = [E] \cdot \{\varepsilon\} = [E] \cdot [B] \cdot \{u\}_e, \quad (15)$$

где $[E]$ представља матрицу еластичности, и за ове системе она износи:

$$[E] = E \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Потребно је одредити матрицу крутости за за један елемент. При томе се користи принцип виртуелног рада, код кога је рад спољашњих сила једнак раду унутрашњих сила:

$$\delta \omega^z = \delta \omega^u$$

$$\{\delta u\}^T \cdot \{F\} = \int_v \{\delta \varepsilon\}^T \cdot \{\sigma\} dv. \quad (17)$$

Ако се према једначинама (12) и (15) унесе да је

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{u\}_e \quad \text{и} \quad \sigma = [E] \cdot [B] \cdot \{u\}_e$$

добива се

$$\{\delta u\}^T \cdot \{F\} = \int_v ([B] \cdot \{\delta u\})^T \cdot ([E] \cdot [B] \cdot \{u\}_e) dv. \quad (18)$$

На десној страни $\{\delta u\}$ не зависи од променљиве интеграла, па може да се изведе испред интеграла

$$\{\delta u\}^T \cdot \{F\} = \{\delta u\}^T \int_v ([B]^T [E] \cdot [B] dv) \cdot \{u\}_e, \quad (19)$$

$$\{F\} = \left(\int_v [B]^T [E] \cdot [B] dv \right) \cdot \{u\}_e, \quad (20)$$

$$\{F\}_e = [k]_e \cdot \{u\}_e. \quad (21)$$

Једначина (21) представља једначину равнотеже елемента. Матрица $[k]_e$ се назива матрица крутости елемента и на основу израза (20) она се пише као:

$$[k]_e = \int_v [B]^T [E] \cdot [B] dv. \quad (22)$$

За одређивање матрице крутости једног штапа решеткасте конструкције, потребно је да се у једначини (22) замене једначине (13) и (16), и тада се добијају следећи изрази:

$$[k]_e = E \int_{\zeta} \int_{dA} \begin{bmatrix} -\frac{1}{s} & 0 & 0 \\ \frac{1}{s} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{s} & \frac{1}{s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} dA \cdot d\zeta,$$

$$[k]_e = E \int_{\zeta} \int_{dA} \begin{bmatrix} \frac{1}{s^2} & -\frac{1}{s^2} \\ -\frac{1}{s^2} & \frac{1}{s^2} \end{bmatrix} \cdot dA \cdot d\zeta = \frac{E \cdot A}{s} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

При том се за матрицу крутости једног елемента добија да је:

$$[k]_e = \frac{E \cdot A}{s} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

односно, уопштено:

$$[k]_e = \frac{E \cdot A}{s} \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} \\ k_{ji} & k_{jj} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Једначином (21) уједно је успостављена зависност између сила у чворовима и померања у чворовима решетке. Ова зависност је успостављена помоћу крутости елемената.

Све ове величине које су одређене у покретном координатном систему $\zeta\eta\zeta$, треба трансформисати и у непокретан OXYZ координатни систем. Значи, треба одредити матрицу крутости у непокретном координатном систему $[\bar{k}]_e$, а затим и везу између чворних померања и чворних сила (једначину равнотеже) у истом координатном систему. Чворна померања са *слике 18* се могу изразити на следеће начине:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ix} &= u_{i\zeta} \cdot \cos(x, \zeta) & \bar{u}_{jx} &= u_{j\zeta} \cdot \cos(x, \zeta) \\ \bar{u}_{iy} &= u_{i\zeta} \cdot \cos(y, \zeta) & \bar{u}_{jy} &= u_{j\zeta} \cdot \cos(y, \zeta) \\ \bar{u}_{iz} &= u_{i\zeta} \cdot \cos(z, \zeta) & \bar{u}_{jz} &= u_{j\zeta} \cdot \cos(z, \zeta), \end{aligned} \quad (25)$$

или написано у матричној форми:

$$\{\bar{u}\}_{x,y,z} = [T_0] \cdot \{u\}_{\zeta,\eta,\zeta}, \quad (26)$$

где се $[T_0]$ назива основна трансформаторска матрица, и има облик:

$$[T_0] = \begin{bmatrix} \cos(x, \zeta) & 0 & 0 \\ \cos(y, \zeta) & 0 & 0 \\ \cos(z, \zeta) & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l & 0 & 0 \\ m & 0 & 0 \\ n & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

На исти начин се трансформишу и силе:

$$\{\bar{F}\}_{x,y,z} = [T_0] \cdot \{F\}_{\zeta,\eta,\zeta}. \quad (28)$$

Ако су познате силе у OXYZ координатном систему, онда могу да се одреде и силе у координатном систему $O\zeta\eta\zeta$, као

$$\{F\}_{\zeta,\eta,\zeta} = [T_0]^T \{\bar{F}\}_{x,y,z}. \quad (29)$$

Иста једначина се може написати и у следећем облику:

$$\begin{aligned} \{F\}_{x,y,z} &= [\bar{k}] \cdot \{\bar{u}\}_{x,y,z} \\ \text{За} \quad \{F\}_{\zeta,\eta,\zeta} &= [k] \cdot [T_0]^T \cdot \{\bar{u}\}, \end{aligned} \quad (30)$$

односно, за један елемент:

$$\begin{Bmatrix} S_i \\ S_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [k_{ii}] & [k_{ij}] \\ [k_{ji}] & [k_{jj}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [T_0]^T & 0 \\ 0 & [T_0]^T \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{u}_j \end{Bmatrix}, \quad (31)$$

одакле се добија:

$$\begin{aligned} \{S_i\} &= [k_{ii}] \cdot [T_0]^T \cdot \{\bar{u}_i\} + [k_{ij}] \cdot [T_0]^T \cdot \{\bar{u}_j\} \\ \{S_j\} &= [k_{ji}] \cdot [T_0]^T \cdot \{\bar{u}_i\} + [k_{jj}] \cdot [T_0]^T \cdot \{\bar{u}_j\}. \end{aligned} \quad (32)$$

Матрица $[T_0]$ је реда 3×3 . Ако је било који вектор састављен од 6 или више компонената, онда се формира дијагонална трансформаторска матрица, састављена од основне трансформаторске једначине као подматрице:

$$[T] = \begin{bmatrix} [T_0] & 0 \\ 0 & [T_0] \end{bmatrix}_{6 \times 6}. \quad (33)$$

Слично се може трансформисати и једначина (21), $\{F\}_e = [k]_e \cdot \{u\}_e$, и када се помножи трансформаторском матрицом $[T]_e$, добија се:

$$[T]_e \cdot \{F\}_e = [T]_e \cdot [k]_e \cdot \{u\}_e.$$

Из једначине (26) се добија:

$$\{u\} = [T]^T \cdot \{\bar{u}\},$$

што се замени у предходну једначину, и добија се:

$$[T]_e \cdot \{F\}_e = [T]_e \cdot [k]_e \cdot [T]^T \cdot \{\bar{u}\},$$

односно, ова једначина се може написати у сличној форми као и једначина (21)

$$\{\bar{F}\}_e = [\bar{k}]_e \cdot \{\bar{u}\}_e. \quad (34)$$

Према томе, матрица $[\bar{k}]_e$ представља матрицу крутости елемента трансформисану у непокретном координатном систему и износи:

$$[\bar{k}]_e = [T]_e \cdot [k]_e \cdot [T]^T, \quad (35)$$

односно:

$$[\bar{k}]_e = \begin{bmatrix} [T_0] & 0 \\ 0 & [T_0] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [k_{ii}] & [k_{ij}] \\ [k_{ji}] & [k_{jj}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [T_0]^T & 0 \\ 0 & [T_0]^T \end{bmatrix}$$

$$[\bar{k}]_e = \begin{bmatrix} [\bar{k}_{ii}] & [\bar{k}_{ij}] \\ [\bar{k}_{ji}] & [\bar{k}_{jj}] \end{bmatrix},$$

где су

$$[\bar{k}_{ii}] = [T_0] \cdot [k_{ii}] \cdot [T_0]^T$$

$$[\bar{k}_{ij}] = [T_0] \cdot [k_{ij}] \cdot [T_0]^T.$$

Заменом се добија:

$$[\bar{k}_{ii}] = \begin{bmatrix} l & 0 & 0 \\ m & 0 & 0 \\ n & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} l & m & n \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{E \cdot A}{s}$$

Множењем матрица се добија:

$$[\bar{k}_{ii}] = [\bar{k}_{jj}] = \frac{E \cdot A}{s} \cdot \begin{bmatrix} l^2 & lm & ln \\ ml & m^2 & mn \\ nl & nm & n^2 \end{bmatrix}. \quad (36)$$

$$[\bar{k}_{ij}] = [\bar{k}_{ji}] = -[\bar{k}_{ii}] \quad (37)$$

Ако се уведе ознака за матрицу:

$$[T_{pp}] = \begin{bmatrix} l^2 & lm & ln \\ ml & m^2 & mn \\ nl & nm & n^2 \end{bmatrix}, \quad (38)$$

онда се матрица крутости елемената може написати у следећем облику:

$$[\bar{k}]_e = \frac{E \cdot A}{s} \cdot \begin{bmatrix} [T_{pp}] & -[T_{pp}] \\ -[T_{pp}] & [T_{pp}] \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Значи, једначина равнотеже једног елемента у непокретном координатном систему ће бити:

$$\{\bar{F}\} = [\bar{k}]_e \cdot \{\bar{u}\}_e,$$

односно:

$$\begin{Bmatrix} \{\bar{S}_i\} \\ \{\bar{S}_j\} \end{Bmatrix} = \frac{E \cdot A}{s} \cdot \begin{bmatrix} [T_{pp}] & -[T_{pp}] \\ -[T_{pp}] & [T_{pp}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\bar{u}_i\} \\ \{\bar{u}_j\} \end{Bmatrix}. \quad (40)$$

Овим је успостављена веза између чворних сила и чворних померања у непокретном OXYZ координатном систему.

3.1.1 Једначина целе конструкције

Једначине добијене за један елемент, могу да се прошире на целу конструкцију. Ако се претпостави да се конструкција ПРС састоји из n чворова, и ако се означи вектор свих сила са

$$\{\Phi\} = \begin{Bmatrix} \{\bar{F}_i\} \\ \{\bar{F}_j\} \\ \{\bar{F}_k\} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \{\bar{F}_n\} \end{Bmatrix}, \quad (41)$$

(овај вектор садржи и компоненте спољашњих сила и реакције у систему), а вектор померања свих чворова решетке се означи са

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} \{\bar{u}_i\} \\ \{\bar{u}_j\} \\ \{\bar{u}_k\} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \{\bar{u}_n\} \end{Bmatrix}, \quad (42)$$

онда ће једначина за равнотежу целе конструкције гласити:

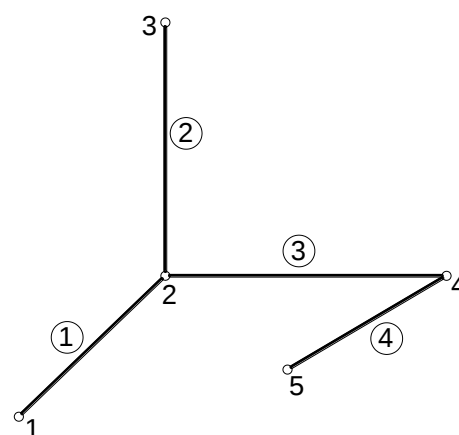
$$\{\Phi\} = [K] \cdot \{U\}. \quad (43)$$

У овој једначини, матрица $[K]$ представља матрицу крутости целе решеткасте конструкције, односно глобалну матрицу:

$$[K] = \begin{bmatrix} [\bar{k}_{11}] & [\bar{k}_{12}] & [\bar{k}_{13}] & ,... , & [\bar{k}_{1n}] \\ [\bar{k}_{21}] & [\bar{k}_{22}] & [\bar{k}_{23}] & ,... , & [\bar{k}_{2n}] \\ \dots & \dots & \dots & ,... , & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [\bar{k}_{n1}] & [\bar{k}_{n2}] & [\bar{k}_{n3}] & \dots & [\bar{k}_{nn}] \end{bmatrix}. \quad (44)$$

Пример за одређивање глобалне матрице, односно матрице крутости за конструкцију која има 4 елемента и 5 чворова, као што је приказано на *слици 19* :

$$[K] = \begin{bmatrix} \bar{k}_{11} & \bar{k}_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{k}_{21} & \bar{k}_{22} & \bar{k}_{23} & \bar{k}_{24} & 0 \\ 0 & \bar{k}_{32} & \bar{k}_{33} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{k}_{42} & 0 & \bar{k}_{44} & \bar{k}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{k}_{54} & \bar{k}_{55} \end{bmatrix}$$



Слика 19. Скица матрице крутости за конструкцију са 4 елемента и 5 чворова

Када се резимира све што је поменуто о решавању ПРС помоћу методе коначних елемената, може се рећи да решавањем линеарних равнотежних једначина (43) изражених у матричној форми, могу да се одреде непознате *унутрашње силе* у штаповима преко вектора ϕ (са претходним одређивањем крутости система), и *померање чворова*. При томе треба увек водити рачуна о граничним условима (начину ослањања и слично).

На основу овог кратког представљања методе коначних елемената (методе деформације), јасно је да је она веома практична за решавање ПРС. Међутим, иако релативно једноставна метода, она итекако захтева велике прорачуне с' обзиром на велики број елемената код оваквих система, што је знатно олакшано употребом рачунара.

3.2 Нелинеарна теорија за прорачун ПРС

Прикупљањем података из досадашњих искустава може се констатовати да су прорачуни просторних решеткастих конструкција са убичајеним распонима и реалним оптерећењима, са довољном тачношћу у пракси уколико се примењује линеарна теорија првог реда, односно уколико су занемарене додатне деформације проузроковане максималним угибима који су релативно мали у односу на висину система. По овој теорији се узима да је угао ротације штапова $\theta \cong 0$. То би била аналогија са танком плочом са угибима код које се усвајају, поред осталих и следеће претпоставке:

- средња раван плоче остаје неутрална при савијању, тј. у овој равни се не јављају деформације;
- нормални напони у плочи се занемарују.

Одавде следи да сви компонентни напони могу да се изразе преко угиба ω плоче, који је функција двеју координата у равни плоче. Ова функција мора да задовољи одређену линеарну парцијалну диференцијалну једначину која потпуно одређује угиб ω . Решење ове једначине даје све податке потребне за прорачун напона у било којој тачки плоче.

Уколико се захтева велика економичност, тј. искоришћење пресека просторне решеткасте конструкције, може се јавити проблем великих угиба у средини система, поготову код великих распона без међуослонаца, па и када постоји потреба олакшавања конструкције одстрањивањем појединих елемената. У оваквим случајевима прорачуна ПРС, при узимању у обзир велике деформације (код још увек линеарног еластичног стања материјала), за прецизне прорачуне би требало да се користе теорије другог и трећег реда. То би била аналогија са поменутом танком плочом са великим угибима у односу на њену дебљину, када се напони и деформације морају узети у обзир при извођењу диференцијалне једначине плоче. Тада се добијају нелинеарне једначине, чије је решење проблема знатно теже и компликованије.

У сваком случају, може се рећи да је овај проблем великих угиба, када се за тачније прорачуне користи нелинеарна теорија, посебно присутан код просторних једнослојних конструкција (на пример куполе се могу извести као једнослојне), просторних решетки и љуски, једнослојних мрежастих конструкција са сајлама, рамова са великим распоним итд.

Значи да се може закључити следеће:

1. За просторне решеткасте конструкције код којих је крутост велика, и где су угиби релативно мали у односу на остале димензије система, са довољном тачношћу се може применити теорија првог реда, према којој се деформације чворних тачака могу прорачунати преко линеарног система једначина (43) и за $[K] \equiv [K_1]$

$$\{\Phi\} = [K_1] \cdot \{U\}, \quad (45)$$

где су:

$[K] \equiv [K_1]$ - матрица крутости целе конструкције у глобалном координатном систему, а према теорији првог реда;

$\{U\}$ - вектор померања чворних тачака;

$\{\Phi\}$ - вектор свих оптерећења (свих унутрашњих и спољашњих сила у чворовима, и реакција).

Одавде се могу одредити и аксијалне силе и напони у штаповима система.

2. У случајевима када су потребнији прецизнији прорачуни или када се деформације не могу занемарити, онда поменути једначина система (43) више није линеарна, и мора се применити нелинеарна **теорија другог** или **теорија трећег реда**, а у зависности од жељене прецизности.

У том случају матрица крутости садржи два дела, матрицу крутости према теорији првог реда $[K_1]$, и матрицу крутости према теорији другог реда $[K_2]$ или према теорији трећег реда $[K_3]$, у којима су узете у обзир и померања ради ротације-отклона штапова за угао θ .

Сада се добијају следеће нелинеарне једначине:

а) према теорији другог реда

$$\{\Phi\} = ([K_1] + [K_2]) \cdot \{U\} \quad (46)$$

б) према теорији трећег реда

$$\{\Phi\} = ([K_1] + [K_3]) \cdot \{U\} \quad (47)$$

Једна од метода за решавање ових нелинеарних једначина је и итеративни прорачун, који се састоји из следећег:

Прво се прорачунавају померања $\{U\} = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$ у чворним тачкама од оптерећења по теорији првог реда. Овим померањима се одређује матрица крутости $[K_2]$ или $[K_3]$, а затим се производ $[K_2] \cdot \{U\}$ или $[K_3] \cdot \{U\}$ одузима од вектора оптерећења $\{\Phi\}$, што би изгледало на следећи начин:

а) према теорији другог реда из

$$\{\Phi\} = ([K_1] + [K_2]) \cdot \{U\} \quad (48)$$

следи

$$\{\Phi\} - [K_2] \cdot \{U\} = [K_1] \cdot \{U\}; \quad (49)$$

б) према Теорији трећег реда из

$$\{\Phi\} = ([K_1] + [K_3]) \cdot \{U\} \quad (50)$$

следи

$$\{\Phi\} - [K_3] \cdot \{U\} = [K_1] \cdot \{U\}. \quad (51)$$

Ово ново оптерећење $\{\Phi\} - [K_2] \cdot \{U\}$ односно $\{\Phi\} - [K_3] \cdot \{U\}$ даје прецизније резултате за померања у чворовима. Итерација се понавља у даљем прорачуну све док важи за свако померање да је

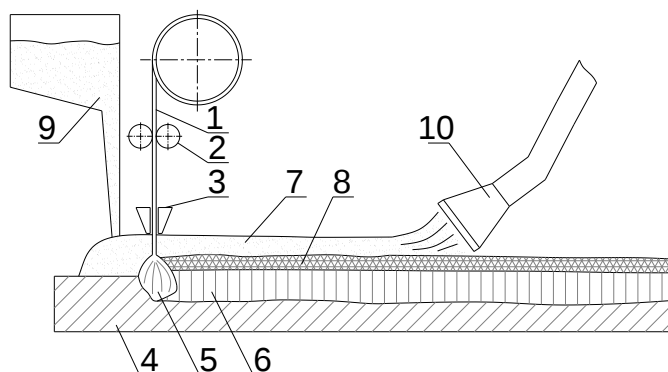
$$1 + \varepsilon > \frac{\Delta_{i,n}}{\Delta_{i,n-1}} > 1 - \varepsilon, \quad (52)$$

где је ε један мали број који одређује тражену вредност прорачуна, а индекс n одређује број итерација, [1].

4.1. Основни појмови

МИГ, МАГ и ТИГ заваривања, стварање нежељених оксида се елиминира заваривањем у атмосфери заштитних гасова (хелијум, аргон, угљен диоксид), а код РЕЛ заваривања заштитна атмосфера се ствара сагоревањем облоге електроде. Код ЕПП поступка заваривања под прахом, заштита растопи од штетног деловања гасова из ваздуха остварује помоћу слоја праха под којим гори електрични лук, на простору испуњеном парам и гасовима под притиском.

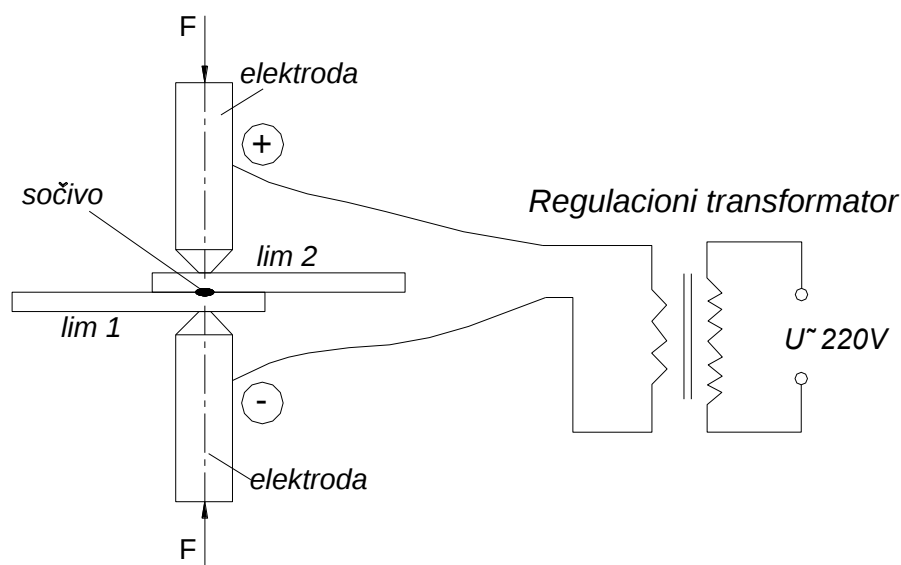
- 1-електродна жица
- 2-погонски ваљци
- 3-електрични контакт
- 4-основни материјал
- 5-електрични лук
- 6-шав
- 7-вишак праха
- 8-троска
- 9-резервоар за прах
- 10-прикупљање вишка праха



Слика 21. Шематски приказ ЕПП заваривања

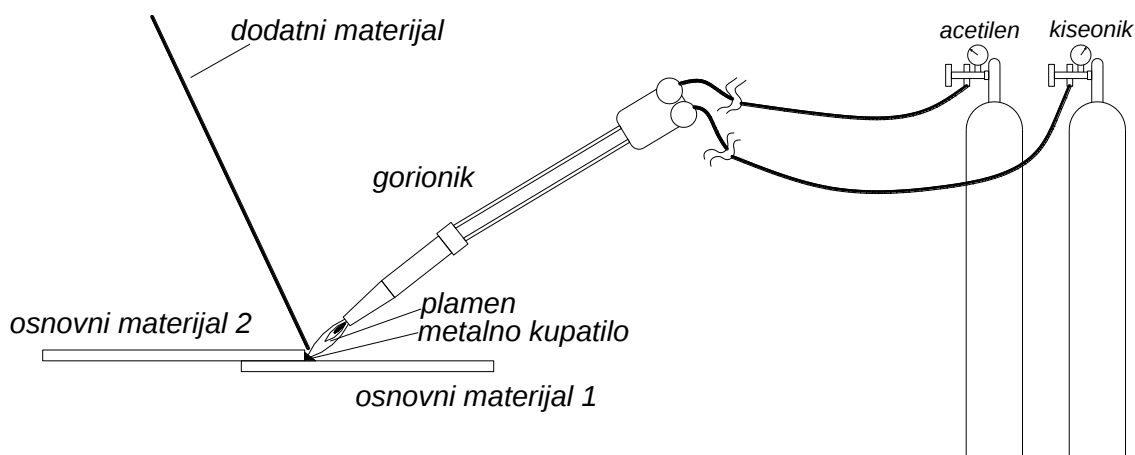
Због сложености апаратуре за заваривање ЕПП поступком, ограничења да предмет заваривања мора бити искључиво у хоризонталном или благо нагнутом положају, и могућности механизације и аутоматизације поступка заваривања, јасно је да је ова технологија искључиво радионичка, па самим тим може послужити у процесу припреме потребних елемената конструкције.

• електроотпорни поступци, *слика 22*, у којима се кроз елементе који се заварују пушта једносмерна струја, тако да због отпора проласку струје долази до локалног загревања у тачкама додира и топљења основног материјала. Елементи који се на овај начин спајају су материјали мањих дебљина и лимови, а овај поступак је посебно заступљен у аутомобилској индустрији и познат је под именом **тачкасто заваривање**. За реализацију ове врсте заваривања је потребно остварити одређени притисак између електрода аноде и катодe.



Слика 22. Шематски приказ електроотпорног заваривања

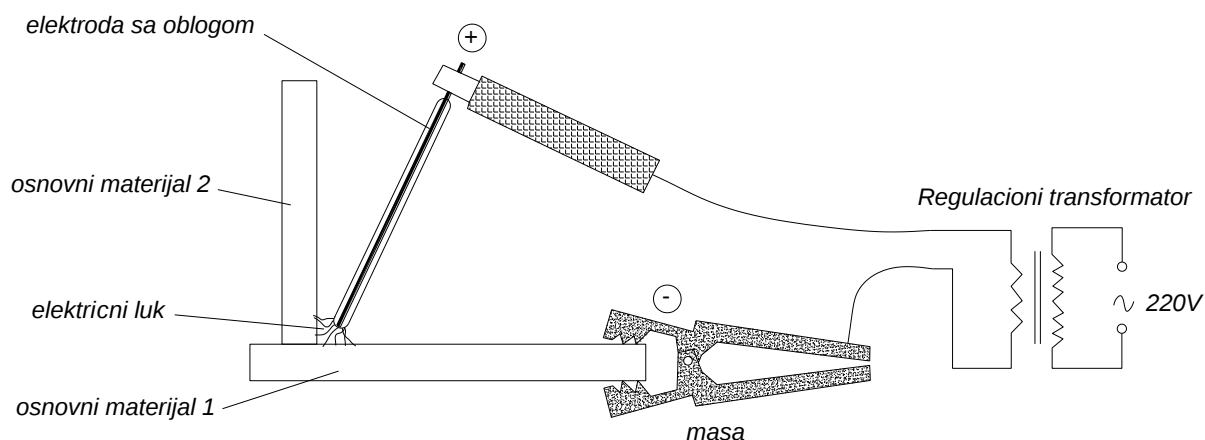
- гасно заваривање, *слика 23*, код кога се гасним пламеном загревају стране основног и додатног материјала образујући метално купатило (језерце), чијим хлађењем и очвршћивањем настаје шав. Ранији назив за овај поступак је био аутогено заваривање, али се данас овај термин избегава.



Слика 23. Шематски приказ гасног заваривања

4.2 РЕЛ поступак

Као што је поменуто, **ручно електролучно заваривање (РЕЛ)** обложеном електродом је поступак спајања метала топљењем обложене електроде и дела основног материјала у електричном луку, који се успоставља и одржава између основног материјала и електроде (*слика 24*). Топљењем језгра електроде се обезбеђује додатни материјал за попуну шав, а топљењем, сагоревањем и испаравањем облоге електроде се обезбеђује заштита металног купатила од гасова из ваздуха. Растопљена облога, због своје мање густине у односу на растопљени метал, испливава на површину и ту очврсне у облику троске, која штити метал шав од утицаја околине и успорава његово хлађење, а након заваривања се уклања механичким путем, најчешће чекићем.



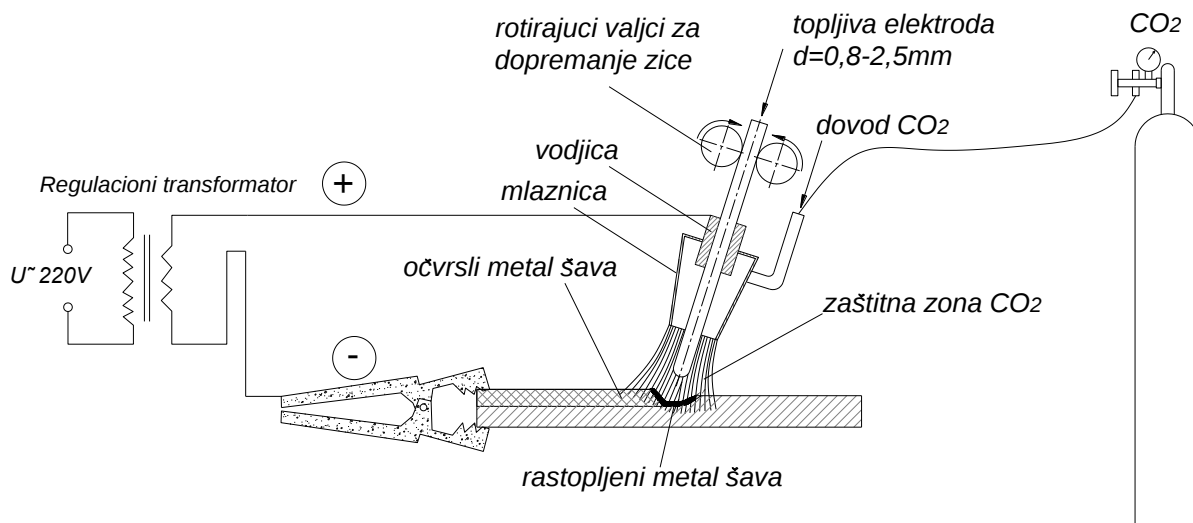
Слика 24. Шематски приказ РЕЛ заваривања

Једноставност у руковању и релативно ниска цена уређаја и додатног материјала, као и добар квалитет споја су главни разлози због чега се овај поступак примењује знатно више од осталих поступака у заваривању. Такође, ограничења у вези са обликом предмета и врстом материјала који се заварује, као и положајима при заваривању су доста мања. Иако је хоризонтални положај заваривања најпожељнији положај код свих поступака, РЕЛ пружа могућност савлађивања и великог броја принудних положаја (вертикални, коси, одоздо), као и његову прилагодљивост месту заваривања, јер је једноставније доћи до неприступачних места челичних конструкција (код мостова, хала, бродова...), резервоара и цевовода, а све захваљујући дугачким и савитљивим проводним кабловима и могућности да извор струје буде независан од градске мреже.

Као главни недостатак РЕЛ заваривања су мања продуктивност због честе замене електрода и уклањања троске, компликованија и дужа обука заваривача, као и утицај умећа заваривача на квалитет шави. Наравно, бљештава светлост при заваривању и гасови који се ослобађају сагоревањем троске су такође штетни.

4.3 МАГ/МИГ поступак

Електролучно заваривање топљивом електродном жицом у заштити гаса је поступак спајања метала топљењем и очвршћавањем дела основног метала и додатног метала, при чему се за заштиту растопљеног метал шави користе инертни и активни гасови. У зависности од врсте заштитног гаса који се користи, овај поступак може бити **МАГ** (Метал Активни Гас), или **МИГ** (Метал Инертни Гас), при чему се код МАГ поступка користи угљен диоксид (CO_2), а код MIG поступка аргон, хелијум (Ar , He).



Слика 25. Шематски приказ МИГ/МАГ заваривања

Предности овог поступка заваривања се огледају у великој брзини заваривања, релативно једноставнијој обуци заваривача код заваривања нелегираних и нисколегираних челика, могућности механизације и аутоматизације поступка, могућности заваривања у принудним положајима, као и мањи инвестициони трошкови.

Као основне недостатке овог поступка заваривања треба навести опасност од грешака при спором заваривању због истицања течног метала испред електричног лука, компликованију обуку заваривача код заваривања високолегираних челика и обојених

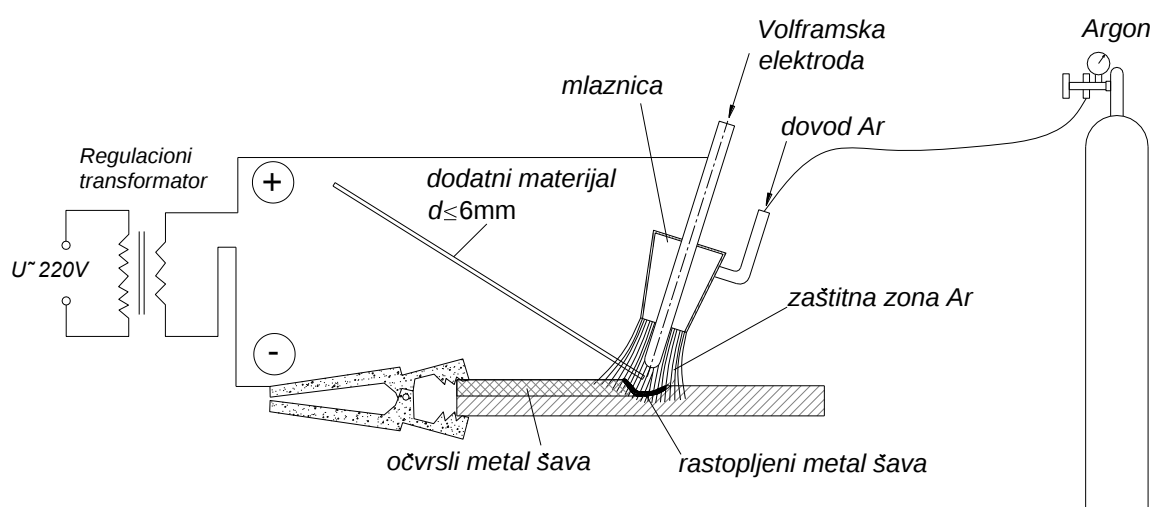
метала, и тешкоће при заваривању на отвореном, које настају услед струјања ваздуха који "испира" и односи активан/инертан гас, па је квалитет таквог шавва незадовољавајућег квалитета, јер не постоји заштитни гас који штити растопљени метал шавва кад је то најнеопходније. Такође, мобилност ове апаратуре је доста смањена, јер уз апарат мора да се налази и боца са гасом, а и дужина црева кроз које пролазе електродна жица и гас не може бити велике дужине, и треба избегавати његово савијање, јер се тиме повећава отпор проласку жице кроз црево, и може доћи до заглављивања. За разлику од РЕЛ поступка код кога није неопходно одстранити апсолутно све нечистоће у зони заваривања, овде је од великог значаја за квалитет шавва управо добра механичка припрема.

Приближно 60% светске потрошње додатног материјала отпада на електродне жице за МАГ/МИГ поступак, и управо је то показатељ да овај поступак има широку примену у металској индустрији, металним конструкцијама, бродовима, посудама под притиском, моторним возилима, [3].

4.4 ТИГ поступак

Назив **ТИГ** (Tungsten-Inert gas) (слика 26) потиче од назива материјала електроде која се користи у овом поступку заваривања. Специфичност овог поступка је у томе што се електрични лук остварује и одржава између нетопљиве волфрамске електроде и основног материјала. Рубни шавови се добијају стапањем повраћених страница завариваних лимова, а остали шавови уз помоћ додатног материјала у виду шипке, чија максимална дебљина може бити $d \leq 6 \text{ mm}$. Овај поступак се може аутоматизовати помоћу посебних аутомата за довођење додатне жице пречника до $d \leq 2,5 \text{ mm}$.

ТИГ поступком се заварују сви заварљиви материјали, али се због високе цене највише заварују високолегирани челици, нежелезни метали и њихове легуре, а нарочито алуминијум и његове легуре, код кога имамо катодно чишћење алуминијум триоксида (Al_2O_3). Ефекат катодног чишћења се састоји у разбијању и уклањању скраме тешкотопљивог оксида Al_2O_3 из металне купке, или са њене површине, дејством електрона који се крећу од основног материјала према електроди, чиме се спречава таложење оксида у дну метала шавва, и омогућава заваривање алуминијума.



Слика 26. Шематски приказ ТИГ заваривања

Електрични лук се код савременијих уређаја успоставља помоћу високофреквентних јонизатора (посебних извора струје високог напона), а остваривање

лука је могуће и додиром врха електроде са основним материјалом, али се тиме електрода прља и убрзава се њено трошење.

Код основних карактеристика аргонског заваривања имамо изузетан квалитет споја (без грешке), не постоји распрскавање, јер се додатни метал топи у металном купатилу (не преноси се кроз лук), могуће је заваривање у свим положајима до 10мм дебљине (што за дебље материјале није случај), не постоји троска. За заваривање челика се користи једносмерна струја директног поларитета (негативна електрода Е-), а наизменична за алуминијум и његове легуре, [3].

Овај поступак заваривања је тренутно једини начин спајања склопова од којих се својом концепцијом и избором материјала захтева што мања тежина конструкције.

4.5 Технологија заваривања

Технологија заваривања код свих поступака заваривања обухвата припрему основног материјала, избор параметара и врсту заваривања, избор врсте електроде.

Код припреме основног материјала најважније је припремити адекватан облик шавва, обликовати га, а понекад је потребно и чишћење околних површина од металног сјаја, оксида и корозије (слика 27). При избору облика и димензија шавва, осим о дебљини основног материјала, треба водити рачуна и о приступачности корену шавва, деформацијама завареног споја, и тежити да утрошак додатног материјала буде што мањи. Код заваривања из више пролаза, посебну пажњу треба обратити на корени вар, јер добро извођење и попуњавање кореног дела шавва гарантује да ће цео шав задовољити неопходне механичке карактеристике, што гарантује намену и сврху целог склопа конструкције. Решење са најмањом масом шавва је по правилу и решење са најмањом деформацијом, јер је у том случају ЗУТ мања (слика 20), [2].

Red. broj	NAZIV	IZGLED ŠAVA	OZNAKA ŠAVA
1	Jednostrani I-šav		
2	Jednostrani V-šav		
3	Jednostrani V-šav sa jednom zakošenom stranicom (½V)		
4	K-šav		
5	X-šav		
6	Jednostrani Y-šav		
7	Jednostrani Y-šav sa jednom zakošenom stranicom		
8	Jednostrani U-šav		
9	Jednostrani U-šav sa paralelnim ili kosim stranicama		
10	Jednostrani J-šav		
11	Potkoreni šav		
12	Ugaoni šav		
13	Šav u otvoru		
14	Tačkasti šav		
15	Linijski šav		
16	Rubni šav između limova sa povijenim stranicama (sa potpunim topljenjem povijenih stranica)		
	Rubni šav sa nepotpunim topljenjem povijenih stranica se označava kao jednostrani I-šav		

Слика 27. Изглед шавова и означавање на цртежима

5. Примери конструисања лаких металних конструкција

Познато је да конструкција теретних и путничких моторних возила полазећи од његове намене захтева што лакше возило, односно сто мању тежину празног, уз истовремено што већу дозвољену носивост. Ово се постиже применом лаких металних конструкција за носеће структуре возила, уз коришћење квалитетнијих материјала, а која се дизајнерски уклапају у комплетан унутрашњи ентеријер и екстеријер возила. Ово се првенствено односи на израду аутобуса, минибуса, фургона итд.

У овој области примене долазе до изражаја лаке металне конструкције које су, зависно од намене возила, специфично обликоване. Данас сви произвођачи правећи склопове возила који се, поред монтажних елемената, најчешће израђују најширом применом свих врста заваривања. Крајњи циљ им је да произведу што лакше наменско возило, које ће тиме и на тржишту бити и ценовно конкурентно.

У том смислу се данас тржишно намеће и потреба да се нека теретна стандардна и серијски произведена возила, допунски надограђују. Овај начин производње обављају специјализовани произвођачи који врше надоградњу уз истовремену промену намене возила од теретног фургона у путнички минибус. Овакав систем рада примењују јер налазе свој интерес зато што постоји тржишна потреба за возила овакве намене.

Наравно, ови произвођачи су дужни да у производњи задовоље и испуне све захтеве који су прописани групом стандарда, а који се односе на возила оваквог типа, као и да одговарају свим захтевима опремања и безбедности на путевима сходно Закону о безбедности саобраћаја (ЗОБС).

У том смислу, оваква возила подлежу проверама и обавезним испитивањима и атестирању од стране надлежне Агенције за безбедност саобраћаја, без чијег се атеста не могу ни регистровати за предвиђену намену, нити користити у саобраћају.

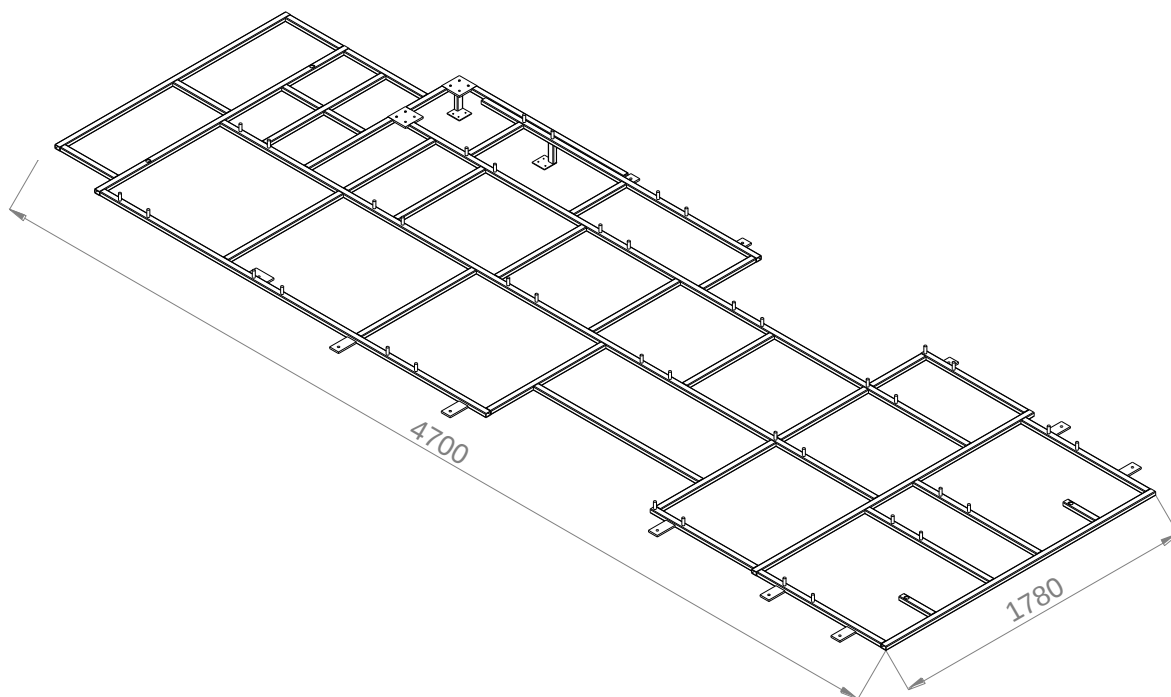
Количина овако надограђених возила су знатно мање од серијске производње основних типских теретних возила. Такође и њихово време израде је знатно краће, и купац за краће време добија возило на коришћење. Из ових разлога, она су и ценовно знатно јефтинија у односу на возила која велике фабрике производе наменски сходно њиховим производно технолошким могућностима.

Примере за њихово коришћење и употребу у најразличитије намене, показашу на надградњи путничког возила минибуса, полазећи од теретног фургона неких водећих европских произвођача.

Пример 1: Минибус за превоз путника-радника (Мерцедес Спринтер 18+1, 4700мм)¹⁸ са фабричким бочним вратима

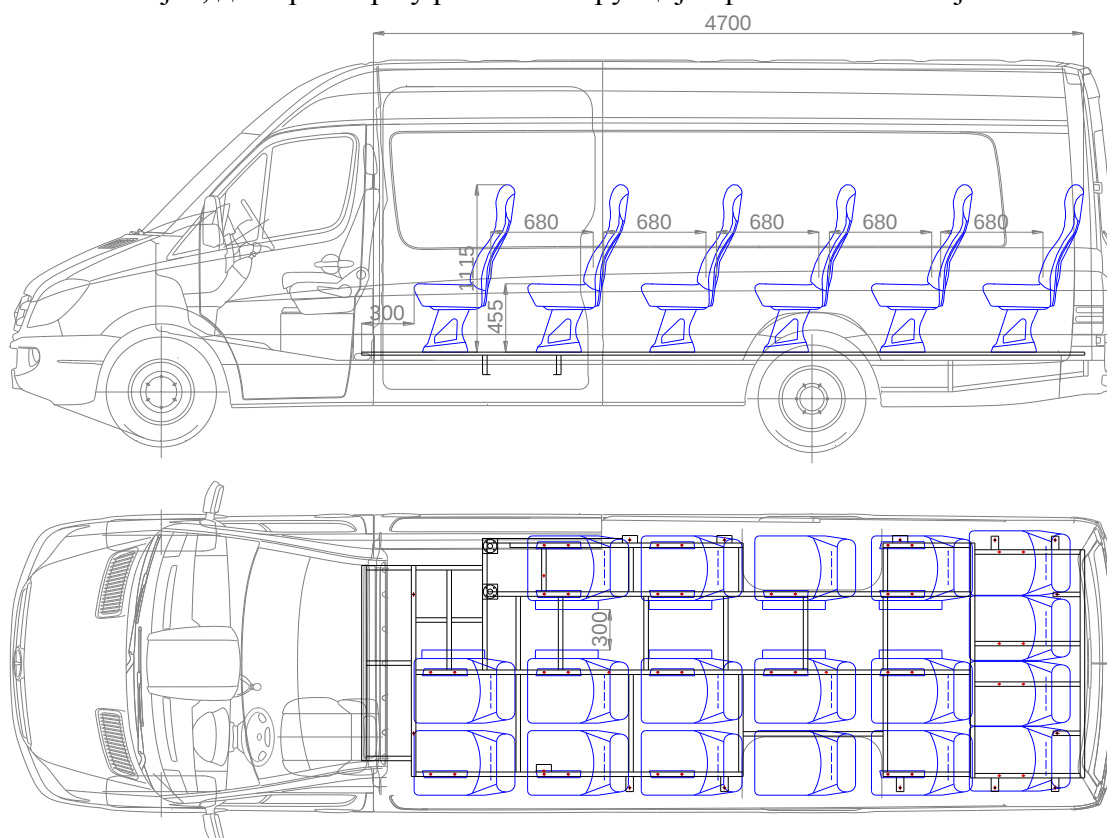
Најосновније потребе које треба да задовољи минибус за превоз радника су максимално искоришћење путничког простора, лако одржавање, и са становишта израде овакво возило представља најједноставнији пример коришћења лаке конструкције (слика 28), с' обзиром да се ради о припреми заварене конструкције која има за циљ да обезбеди основу за вијчану везу седишта минибуса и пода. Вијчана веза седишта и конструкције пода дефинише дефинитивни положај седишта у возилу, а ЗОБС је јасно дефинисана та димензија како би сваки путник имао исти простор на располагању (на слици 29 је то котирано са 680 mm, а у неким случајевима је могуће остварити и до 720 mm, и односи се на растојање задњег дела наслона предњег седишта, и предњег дела наслона наредног седишта).

¹⁸ Купац је предузеће "Јабука" из Панчева, Србија



Слика 28. 3Д модел конструкције пода

У циљу задовољавања овог услова, на местима предвиђеним за везу седишта, а пре монтаже конструкције у возило, врши се бушење и постављање вијака М10, и то тако што се у доњој равни конструкције (која належе на под возила) прави отвор довољан за пролаз главе вијка, док кроз горњу раван конструкције пролази стабло вијка.



Слика 29. Цртеж подне конструкције са положајем седишта у возилу

Заваривањем главе вијка за унутрашњи зид цевастог профила (кроз доњи отвор кроз који је он и постављен) постиже се да доња равна решетка несметано налегне на фабрички под возила, јер глава вијка остаје "заробљена" у унутрашњости профила.

Предност оваквог извођења је што се монтажа седишта може извести само помоћу навртке и једног кључа (заваривањем главе вијка спречено је његово обртање приликом завијања и одвијања), а недостатак је потреба за великом тачношћу и прецизношћу, као и немогућности евентуалног каснијег размештања распореда седишта.

Тако припремљена и антикорозивном бојом префарбана конструкција се учвршћује за под возила преко технолошких (већ постојећих фабричких) рупа, а додатна вијчана веза се остварује у средишњој зони возила, углавном где за то има могућности (због ограничења положајем шасије возила, резервоара, ауспуха, задњег моста).



а)



б)



в)



г)

Слика 30 а), б), в) конструкција пода у возилу, г) завршено возило

За израду овакве конструкције, користе се искључиво стандардни цевasti профили најчешће 30x20x3 mm, металне плочице 100x50x8 mm, док се зваривање врши искључиво ван возила МАГ или РЕЛ поступком (описаним на *сликама 24,25*). Због касније уградње шпер плоче "блажујке" дебљине од $\delta = 18\text{ mm}$ која представља раван газећи слој пода која належе на конструкцију, и да би се избегло кривљење исте, постављање ојачања на конструкцији се практикује у зонама најинтензивнијег проласка путника, а то су коридор, и места између седишта. Узимањем у обзир ове чињенице остварује се значајна уштеда у материјалу, времену израде, и што је најбитније елиминише се беспотребна тежина, која је јако битна у аутомобилској индустрији (*слика 30, а, б, в*)

Од тренутка када се јави потреба реализације оваквог возила, преко процеса конструисања до комплетно завршеног возила (са уграђеним стаклима, клима уређајем, прилагођавањем ентеријера потребама купца), у просеку прође 20-25 радних дана.



а)



б)



в)



г)

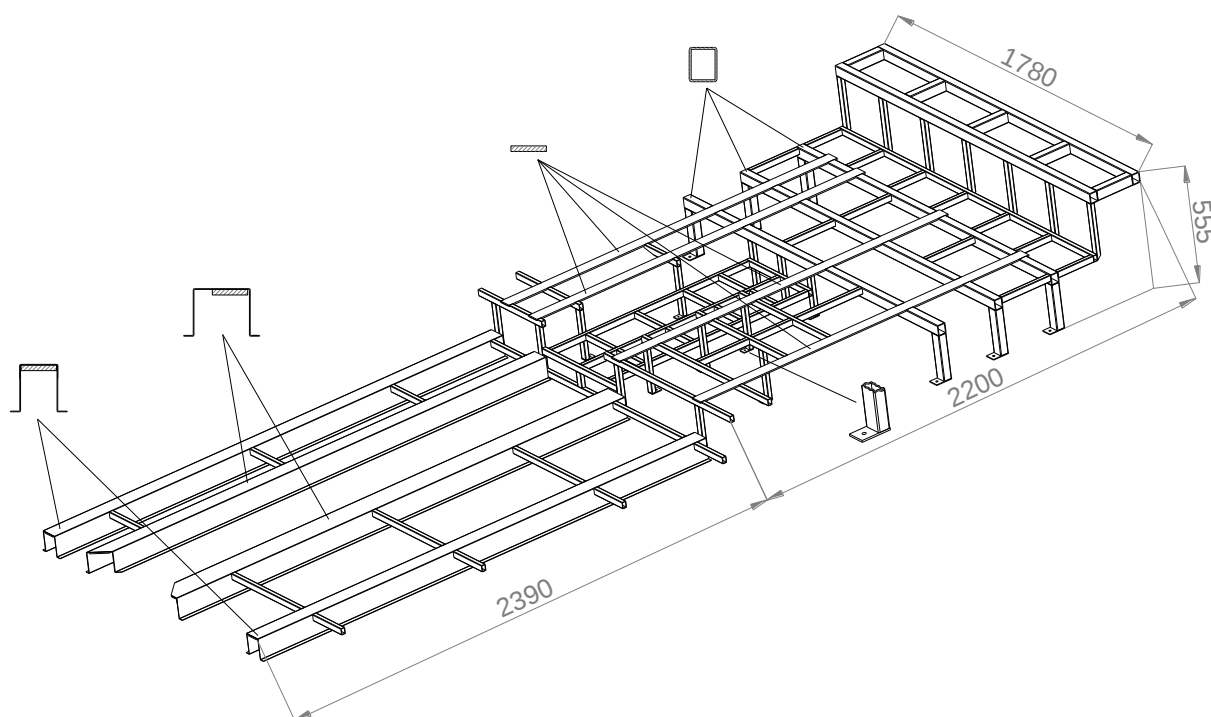
Слика 31 а), б), в), г) Завршено возило

Слика 30 г) и слике 31 приказују завршни производ прилагођен потребама купца. Овако пренаменовано возило се даље упућује на мерење и атест у Ауто Мото Савез Србије (АМСС), после чега овлашћена Агенција за безбедност саобраћаја даје одобрење за регистрацију и употребу возила у саобраћају.

Пример 2: Минибус за превоз путника-туриста (Мерцедес спринтер 19+1, 4700мм)

За разлику од претходног примера у коме је акценат на свакодневном превозу радника углавном на краће релације и кроз све чешће градске гужве, од возила за превоз путника-туриста се на првом месту захтева што већа удобност, могућност одлагања пртљага у за то предвиђен простор, као и одлагање ручног пртљага у самом путничком простору возила. Да би се адекватно одговорило на наведене захтеве, потребно је, у складу са Законом осмислити и реализовати најрентабилније решење, јер је простор на коме све то треба ускладити, доста ограничен.

Основу целе идеје чини управо лака метална конструкција прилагођена ентеријеру теретног возила, помоћу које се врши трансформисање у ентеријер путничког возила. Један од начина извођења ове лаке металне конструкције је приказан на наредној слици 32, а ради се о варијанти возила код кога су поред задње клупе, издигнута и два предзадња реда.



Слика 32. 3Д модел конструкције издигнутог пода

У овом случају имамо лаку металну конструкцију чији габарити досежу до крајњих унутрашњих димензија товарног/путничког простора, а која се директно реализује заваривањем у возилу (слика 33 а и б) јер не постоји могућност њеног накнадног уношења и изношења ван возила. Циљ овако конципираног решења је да издизањем пода створимо предуслове за одвајање пртљажног простора, али и да она обезбеди носивост за све путнике који ће се налазити изнад тог простора.

Треба напоменути да се због оштећења фабричке антикорозивне заштите и прегревања поцинкованог каросеријског лима (који је дебљине $\delta = 0.8 \text{ mm}$) не врши заваривање конструкције за под возила, него се њихова веза остварује монтажном, помоћу вијака и навртки, док се заваривање за унутрашња бочна ојачања на страницама возила практикује, уз обавезну антикорозивну заштиту.



а) б)
Слика 33. Пример заварене конструкције издигнутог пода

Сама конструкција се састоји од стандардних цевастих профила 50x40x4 mm, 30x20x3 mm, и у зони прва три реда седишта (слика 35), челичног лима дебљине $\delta = 1.5\text{ mm}$ савијеног у омега профил ојачан попречним лимовима, као што је приказано на слици 34¹⁹. Целом дужином у унутрашњем делу омега профила се местимичним заваривањем позиционира челична трака дебљине $\delta = 8\text{ mm}$, у коју се после завршених свих радова, на тачно утврђеним растојањима, урезује навој M10x1.25 помоћу кога се седишта фиксирају за подну конструкцију.



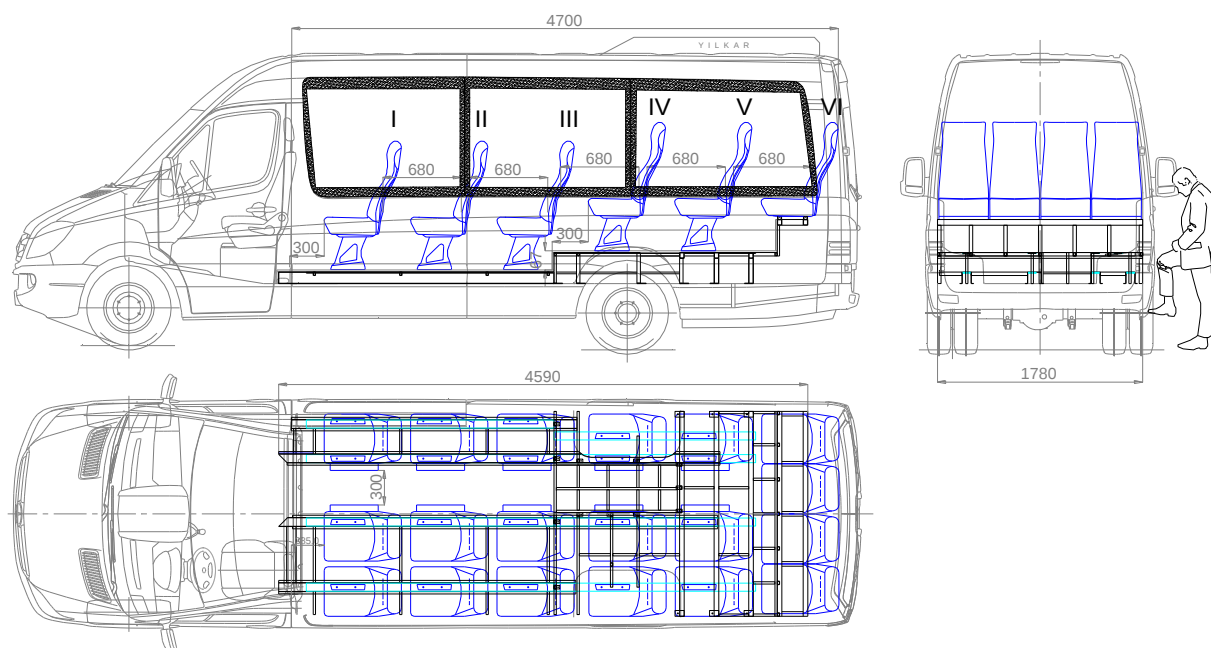
Слика 34. Омега профил са попречним ојачањем

Додатна запремина пртљажника се добија просецањем пода, и уградњом специјалне "каде", у чијем је једном делу у зони иза диференцијала возила простор одвојен преградом за резервни точак (слика 33 б).

Тај део металне конструкције, а посебно у зони четвртог и петог реда седишта (слика 35) представља резултат спајања више корисних карактеристика, као што је поменуто повећање запремине простора за остављање пртљага, али и елиминисање додатних компликација при изради носача који би имали улогу бочног држача седишта у

¹⁹ На слици је приказан принцип ојачања омега профила код другог типа возила, због пропуста у фотографисању конкретного примера.

зони каросеријске калоте блатобрана, било да се ради о возилу са једноструким или двоструким точковима на задњој осовини.



Слика 35. Цртеж подне конструкције са положајем седишта у возилу

Управо из функционалних разлога, укључујући и комодитет путника који ће седети изнад блатобрана, прибегава се додатном "подизању" конструкције, уз постављање ојачања у виду кратких вертикалних цевастих профила, на местима која ће при завршетку конструкције уједно бити и везивна места шпер плоче од 18 mm. Поменути ослонци су у просеку дужине до 230 mm и примају аксијално оптерећење на притисак (што је изразита карактеристика и ПРС обрађених у првом делу овог дипломског рада), и за конструкцију се заварују, док је доњем делу који преноси силу на под возила додирна површина повећана заваривањем равне плочице-стопице, која се монтажно везује за под возила.



Слика 36. Под возила минибуса



Слика 37. Изглед завршеног пода

На сликама 36 и 37 је приказан завршни изглед пода минибуса као финални производ који покрива облик лаке металне конструкције, и један је од репрезентативних примера у овој области аутоиндустрије, а који сликовито објашњава улогу лаких конструкција и начин реализовања на конкретном примеру.

Остале операције, које нису предмет овог дипломског рада, а које свакако треба поменути и без којих не би била могућа реализација пренамене возила из теретног у путнички програм, а које су заједничке за све типове возила су:

- уградња клима уређаја (спољне или унутрашње климе) са пропратним електро и хидро инсталацијама, разводом;
- просецање крова и уградња кровног прозора;
- просецање и уградња бочних стакала (свих врста од обичних стакала до панорамских) са додатним ојачањима или без њих;
- термоизолација комплетног возила;
- финализација ентеријера (бочних и кровних оплата, постављање подолит подлоге, итд.);
- монтирање галерије, седишта, ролбарова.

По завршетку свих наведених операција, возило поприма коначан изглед:



Слика 38.



Слика 39.



Слика 40.



Слика 41.

Слике 38. 39. 40. 41. Екстеријер и ентеријер готовог возила

Код наведених примера може се закључити да се употребом лаких металних и заварених конструкција могу реализовати разни облици одговорних елемената, као основа на којој ће се базирати ентеријер. Од намене возила зависи какав ће се приступ конструисању практиковати, а осим поменутих минибуса за превоз радника и путника (који су и најчешћи захтеви), интензивна је и потреба за возилима за превоз особа са посебним потребама – инвалида, код којих се уграђује и специјална платформа која подиже/спуста лице у колицима.

За разлику од металних конструкција у грађевинској индустрији које су у већини случајева видљиве, и због изложености атмосферском утицају захтевају редовно одржавање и антикорозивну заштиту, овде се конструкција налази у заштићеном и затвореном простору и за време њеног експлоатационог периода није неопходно често одржавање.

Закључак

Посматрајући и анализирајући примену принципа и предности лаких металних конструкција у односу на одговарајуће класичне, може се констатовати да оне стварају једно ново, изузетно значајно поглавље у уметности конструисања које прати савремене потребе данашњице, што у доба експанзије технике и технологије на глобалном нивоу омогућава једноставнију, бржу и сигурнију реализацију. Може се очекивати да ће примена лаких металних конструкција и у наредном периоду одиграти значајну улогу и у нашој домаћој металској индустрији, и допринети већој експанзији извоза.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Георгиевски, В., "Лаке металне конструкције", Грађевинска књига, Београд 1990.
- [2] Николић, Р. и Марјановић В., "Металне конструкције-приручник за прорачуне", Машински факултет, Крагујевац, 1998.
- [3] Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В., "Технологија заваривања-приручник", Машински факултет, Крагујевац, 1996.
Интернет странице:
- [4] <http://www.superprostor.com/centar-za-posetioce-lepenski-vir/2553> /24.02.2016г./
- [5] http://www.amiga.rs/press3_8-9.htm /03.03.2016г./
- [6] <https://www.ferrariworldabudhabi.com/park-overview/history/> /15.03.2016г./
- [7] <https://www.ferrariworldabudhabi.com/en-gb/about-us/construction.aspx> /03.04.2016г./
- [8] <https://www.panoramio.com> /20.04.2016г./