

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Основи конструисања

Број индекса: 94/2009

Никола Б. Лазаревић

Олакшане конструкције

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Ненад Марјановић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да размотри проблематику конструисања и описати развој машинског конструисања. Треба дати увод у олакшане машинске конструкције и објаснити шта је то заправо. Даље у раду кандидат треба разматрати разне факторе који утичу на масу конструкције. Ради смањења концентрације напона треба извршити анализу о рационалном конструисању (нпр. шупље вратило). На крају рада кандидат треба дати практичне мере за смањење масе конструкције правилним избором конструкционе шеме и правилним избором материјала за израду, и на самом крају рада дати закључак о олакшаним конструкцијама и погодности олакшања машинских конструкција.

Препоручена литература:

- [1] Јовичић С., Марјановић Н., Основи конструисања, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2011.
- [2] Орлов П., Основи конструисања (Fundamentals of machine design), Научна књига - машинство, Москва, 1976.

Крагујевац, септембар 2012. год.

ментор:

Резиме:

У оквиру рада, извршено је прикупљање, систематизација и анализа података везаних за олакшане конструкције. Описан је развој конструкција уопште, и детаљно објашњен принцип, односно суштина олакшаних конструкција. Приказани су практични примери олакшања конструкција, као и рационалније конструисање машинских елемената. Дат је пример уштеде у материјалу и самим тим олакшање конструкције коришћењем шупљих вратила. Као веома важане ствари описани су фактори утицаја на теоријску масу конструкције и објашњено је како их искористити у смањену масе конструкције.

Кључне речи: Олакшане конструкције, смањење масе, својства материјала

Abstract:

In this work, there were collected, systematized and analyzed data related to the lightened constructions. The work described the development of structures in general, and explained in detail the principle and essence of lightened constructions. There are practical examples of lightening of the constructions, and also, more rational designing of machine elements. There is an example of material savings and therefore, lightening of the construction, by using hollow shafts. As very important facts, there are described factors of influence on the theoretical weight of construction and explained how to use them in reducing the weight of the construction.

Key words: Lightweight constructions, weight reduction, material properties

Садржај

Увод	6
1. Увод у олакшане конструкције	
1.1. Тежина и садржај материјала	10
2. Фактори утицаја на теоријску масу конструкције	13
2.1. Утицај општих услова	16
2.2. Утицај профила	19
2.2.1. Затезање	21
2.2.2. Савијање	21
2.2.3. Увијање	24
2.2.3. Извијање	25
2.3. Утицај материјала	25
3. Рационални делови машина	27
3.1. Уштеде у материјалу коришћењем шупљих вратила при увијању	29
3.2. Утицај пречника на масу елемента	32
3.3. Утицај броја обртаја на масу конструкције	33
3.4. Просторни облик и напонско стање	34
4. Практичне мере за смањење масе конструкција	38
4.1. Пример олакшања полуге	39
4.2. Неке од метода олакшања планетерних носача	40
4.3. Олакшање кућишта машина.....	40
4.4. Олакшања помоћу увођења прелазних радијуса и прелаза под нагибом.....	41
4.5 Деловање оптерећења у правцу осе симетрије машинских делова - рационално оптерећивање.....	41
4.6. Смањење масе конструкције правилним избором конструкционе шеме	42

4.6.1. Смањење масе конструкције смањењем броја веза у механизму.....	42
4.6.2. Смањење масе конструкције применом рационалног размештаја делова	44
5. Избор материјала.....	45
5.1. Карактеристике материјала за различита напрезања.....	45
5.1.1. Затезање	46
5.1.2. Савијање	47
5.1.3. Увијање	48
5.1.4. Извијање	48
5.2. Легирани челици	48
5.3. Лаки метали	49
5.3.1. Алуминијумске легуре	49
5.3.2. Магнезијумске легуре.....	51
5.3.3. Лаке легуре са титанијумом.....	51
5.4. Нарочите одлике делова сачињених од лаких.....	52
5.5. Неметали	53
5.6. Сумирање утисака у вези избора материјала.....	54
5.7. Занимљивости лаких метала	54
6. Методе израде лаких конструкција.....	57
6.1. Конструисање лаких одливака.....	58
6.1.1. Одливци од лаких метала.....	59
6.2. Заваривање лаких конструкција.....	59
Закључак	60
Литература.....	62

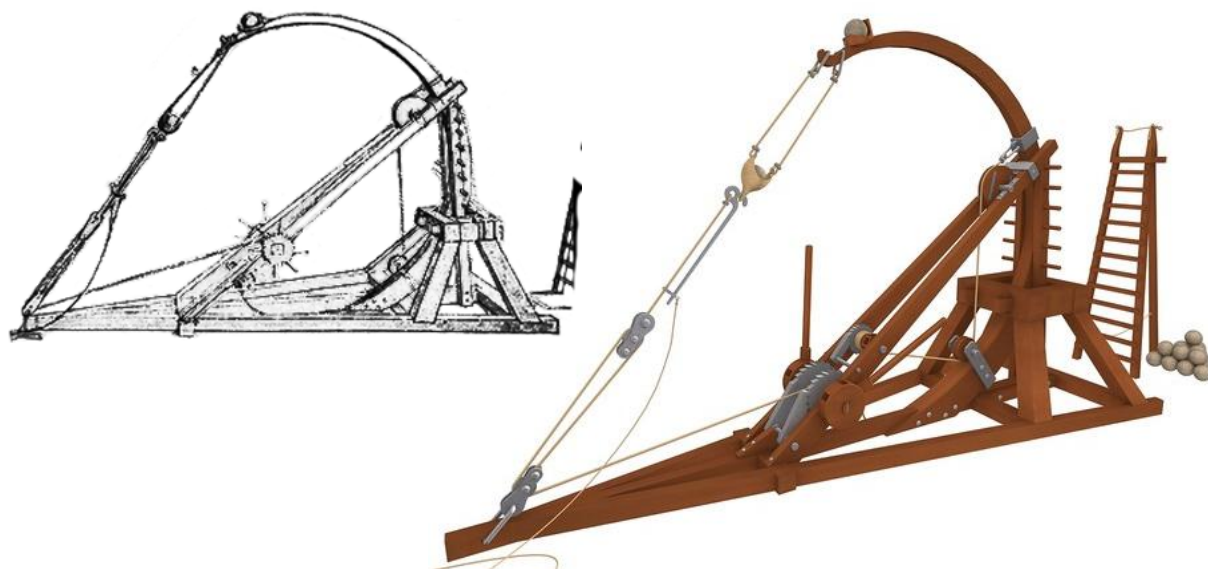
Увод

Конструисање је у суштини креативна човекова активност усмерена ка развоју, осмишљавању и обликовању предмета и мењања природе у циљу да се олакша рад човека и побољша његова ефикасност. Историјски почетак такве активности може се везати за настајање људског друштва. Сматра се да је људско друштво почело да се формира отприлике пре 10 000 до 40 000 година и да је у том периоду дошло до првог прилагођавања природе човеку, односно до обликовања и употребе простих оруђа за рад и сакупљање хране.

Развој праисторијског човека трајао је веома споро. Први скок у погледу развића човека настао је пре отприлике 4 000 година, у време када човек почиње да припитомљава животиње и да се бави земљорадњом прилагођавајући и обликујући оруђа за нове намене. Обликовање оруђа и производа уопште заснива се тада на правилима о томе шта треба учинити да се успешна решења сачувају да би се њихово извођење могло поновити. Са развојем старих цивилизација Египта, Средњег и Далеког истока и коначно Европе (Грка и Римљана) долази до развоја науке као најкреативније људске делатности. Човек у то доба учи како да употребљава енергију животиња, воде и ветра за своје потребе. Обликовање направа и уређаја добија тада свој пуни замах и значај. Тродимензионално приказивање направа тог доба бива допуњено приказима у равни. Међутим, пошто још није била разрађена теорија перспективе, графичко приказивање направа извођено је у тзв. слободној перспективи (није се водило рачуна о пропорцији). Приказиван је рад механизма, као и начин њиховог покретања, тако да су на истим цртежима поред механизма учртаване животиње и људи.

Средњи век доноси застој, па чак и назадовање у свим областима наука као и у области конструисања направа. Затим се у доба ренесансе у науци појављују многи познати великани, међу којима је чувени италијански научник, уметник и инжењер Леонардо да Винчи. Он је у својим техничким пројектима користио тзв. конични

перспективу за приказивање направа. На слици (сл. 1) приказан је поглед из коничне перспективе Леонардове конструкције катапулта за избацивање ђулади, као и модел истог.



Слика 1 - Конструкција и модел катапулта Леонарда да Винчија

У 17. веку уводи се ортогонална пројекција, а у 18. веку приказивање у размери, као и словно означавање делова конструкције. Тада се први пут у приказивању делова машина користе пресеци, уводи их француски конструктор Шарл Плуме 1776. године.

У 18. и 19. веку по целом свету настају велики број машинских конструкција. Тако је на пример 1877. године Г.Б.Селден конструисао и патентирао прву "путну машину" (сл. 2).



Слика 2 - Конструкцијски изум Г.Б.Селдена - "путна машина"

У првој половини 19. века уводи се појам дозвољеног напона који у спрези са до тада познатим Хуковим законом материјала даје основе тзв. теорије димензионисања. Тиме су ударени темељи за прорачун чврстоће машинских конструкција. Међутим, још дуго времена конструисање машина и механизма ће бити засновано на индивидуалној вештини и сналажљивости искусних проналазача и конструктора.

Крајем 19. и почетком 20. века долази до оснивања конструкционих бироа, као неопходне потребе за развој технике и индустрије. Нагомилавањем искустава, све више почиње да се осећа одсуство опште методологије, која би објаснила теорију и праксу конструисања машинских система. Намеће се потреба за развојем основних метода, принципа и правила конструисања машинских система, које ће довести до побољшања основних карактеристика машинских система. Тако се на пример степен корисног дејства мотора СУС повећао од око 0,23 у 1913. години до око 0,40 у 1980. години. Прве парне турбине достизале су снагу од око 200 kW, а данас се производе турбине снаге и до 1 200 MW. За последњих 50 година маса мотора по јединици снаге смањила се код дизел мотора око 10 пута, код електромотора мале снаге око 20 пута, а код авионских мотора и до 50 пута. Такође је и облик конструкције временом напредовао, тако на пример савремени облик конструкције аутомобила (сл. 3) много је погоднији у поређењу са патентом путне машине из 1877. године (сл. 2).



Слика 3 - Облик савременог аутомобила (BMW)

Машински системи које у будућности треба конструисати одликоваће се високим квалитетом и поузданошћу у поштреним условима рада, смањењем потрошње енергије, економичношћу у погледу материјала, снижењем цене израде и цене експлатације, модерним естетским изгледом, смањеном тежином конструкције итд.

На савременом степену развоја друштва машинско конструисање постаје област базирана на низу фундаманталних, општетехничких и специјализованих научних

дисциплина. На слици (сл. 4) шематски је приказана веза машинског конструисања са осталим научним дисциплинама.



Слика 4 - Шематски приказ веза машинског конструисања са осталим дисциплинама

Конструисање представља низ активности, чији је крајњи циљ обликовање и креирање машинске конструкције. У почетној фази конструисања врши се концепирање, што подразумева разраду појединих варијанти могућих конструкцијских решења конструкције и избор најповољније варијанте. На бази усвојене концепције приступа се њеној разради. Процес разраде конструкције има за циљ да уобличи коначно решење конструкције, полазећи од њене целине, па до ситних детаља. Разрада конструкције обухвата правилан избор облика, димензија и материјала, као и повезивање машинских делова. Успешна машинска конструкција одликује се таквим особинама које ће будући машински систем учинити сврсисходним, прилагођеним и корисним у свим фазама његовог века.

1

Увод у олакшане конструкције

1.1. Тежина и садржај материјала

Под појмом лаке конструкције подразумева се мала маса конструкције у односу на њене функционалне карактеристике. Лаке конструкције подразумевају примену принципа смањења масе машинских делова, правилног избора материјала и оптимизације главних параметара конструкције према усвојеним техничким и економским критеријумима (променом облика и димензија конструкције) , али треба водити рачуна о напонским стањима у њој. Да би конструкција била боља, јефтинија и конкурентнија на тржишту мора се водити рачуна о важним правилима рационалног конструисања.

Маса је важан параметар машине, па посебно велики значај лаке конструкције имају у градњи транспортних и саобраћајних машина, а наручито у авијацији и ракетној техници, где сваки килограм претеране масе умањује корисну носивост, брзину и радијус кретања. У класичном инжењерству, смањење масе делова представља смањење потрошње материјала, олакшано руковање, транспортовање, смањење инерцијалних сила, а самим тим лакше убрзавање и кочење покретних делова машина. Не треба никако изоставити да смањење масе делова значи економичност метала и јефтинију производњу. Смањење масе постаје наручито битан фактор под условима масовне производње, јер омогућује да се сачува генерална потрошња материјала. Ово нас ни на који начин не ослобађа неопходности да смањимо масу сваке појединачно направљене машине или оних који се производе у малим количинама, јер њихово укупно представљање чини значајан део у целокупној производњи машина.

Наравно, смањење масе није крај само по себи. Цена материјала је такође незаобилазни део укупних трошкова при производњи и коришћењу машина, јер трошкови зависе од корисности и издржљивости машине. Тежња ка смањењу масе метала требало би се одбацити без оклевања ако то умањује параметре машине попут снаге и тврдоће или поузданости, нарочито у класичном инжењерству. Боље је имати чак и мало тежу машину него лакшу која има слабије карактеристике поузданости и издржљивости.

Поред значајних предности постоје и неки недостаци примене лаких конструкција. Наиме, да би се постигла захтевана чврстоћа олакшаних конструкција неопходна је примена скупљих материјала као што су висококвалитетни челици и легуре лаких метала, а у задње време наручито је значајна употреба композитних материјала. Сем тога неопходна је и примена специјалних лаких профила од савијених лимова чија је израда скупља него израда стандардних профила.

Упоредна карактеристика масе машина која се користи за процењивање јесте фактор тежине (q), и који је количник масе машине (m) и главног параметра машине (N).

$$q = \frac{m}{N}$$

Ова карактеристика се рачуна при конструисању машине као и приликом бирања материјала за израду машине (лакких легура, неметала...).

У транспорту, фактор тажине се изражава као однос укупне масе машине и корисне носивости.

Фактор тежине машина за обраду метала изражава се као однос укупне масе машине и номиналне снаге електро-мотора (ово није изражајано јер занемарује степен до кога се користи номинална снага и продуктивност машине).

Пројектовање умањења брзине се процењује при односу масе и момента мотора или односа између његове масе и енергије која се преноси.

Појам запремина метала и маса метала морају се разликовати. Они нису једнаки. Најбоље је то објаснити на примеру. Нека се предпостави да две машине имају идентичне димензије и параметре, али да је једна од њих углавном направљена од тешких метала (челик, гвожђе...), а друга од лакких легура (нпр. алуминијум). Јасно је да је маса друге машине мања од масе прве машине, јер је специфична маса тешких метала углавном два пута већа од лакких легура.

Запремина метала се најбоље може изразити масом металних делова који сачињавају машину. Онда, заједно са фактором тежине, могуће је увести и индекс специфичног садржаја метала, који се изражава као количник запремине металних делова и главног параметра машине. Овај индекс ће увести процену, прво, економичности метала постигнутој у датој машини, и друго, квалитет направе, нпр. рационалност дизајна и форме компоненти машине, без обзира на специфичне масе искоришћених материјала. Како су машине производи метала са углавном различитом специфичном тежином, индекс специфичног садржаја метала ће бити:

$$\nu = \frac{V}{N} = \frac{\frac{\sum m_1}{\rho_1} + \frac{\sum m_2}{\rho_2} + \dots + \frac{\sum m_n}{\rho_n}}{N}$$

,где су : $\sum m_1 + \sum m_2 \dots + \sum m_n$ - укупна маса компоненти машина са одговарајућом густином материјала ($\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$),
 N - главни параметар машине.

Смањење масе, осим смањењем специфичне масе метала, може се постићи разним погодним секцијама и облицима, разумним коришћењем карактеристика материјала, коришћењем квалитетних материјала (високолегираних челика, лаких легура, итд.), елиминисањем претераних безбедносних маргина и замењивањем метала неметалима, где је то могуће.

2

Фактори утицаја на теоријску масу конструкције

Ради анализе утицајних фактора на масу конструкције уводимо појам теоријске масе конструкције који се односи на масу греде константног попречног пресека површине S , дужине L и густине материјала ρ . Па се теоријска маса конструкције може дати изразом:

$$m = S \cdot L \cdot \rho$$

Овај израз може се на погодан начин трансформисати тако да теоријска маса буде изражена као производ три утицајна фактора:

$$m = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

,где је: K_1 - фактор општих услова,

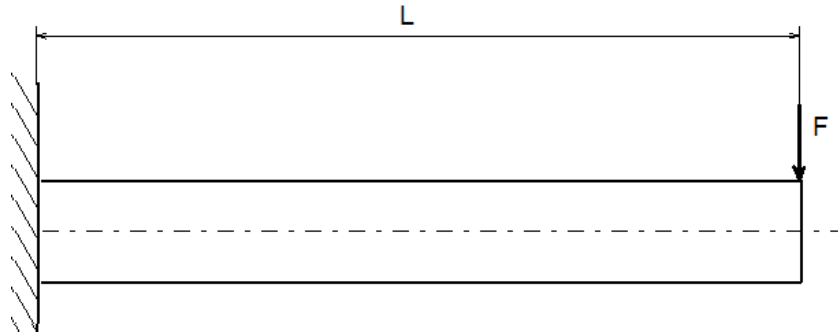
K_2 - фактор профила,

K_3 - фактор материјала.

Зависно од тога шта се узима као меродавно за прорачун, могу се усвојити три приоритетна критеријума и то:

- 1) Критеријум чврстоће по коме је : $m_a = K_{1a} \cdot K_{2a} \cdot K_{3a}$,
- 2) Критеријум крутости по коме је : $m_b = K_{1b} \cdot K_{2b} \cdot K_{3b}$,
- 3) Критеријум деформационог рада по коме је : $m_c = K_{1c} \cdot K_{2c} \cdot K_{3c}$.

На пример, када је у питању савијање разматра се случај греде, теоријске масе, укљештене на једном крају, а на другом крају оптерећена попречном силом F (сл. 5).



Слика 5 - Савијање греде

Трансформисање израза за теоријску масу конструкције тада се врши тако што се води рачуна о томе да фактор профила буде бездимензионалан. Ако је критеријум чврстоће меродаван за прорачун онда се полазећи од израза за аксијални отпорни момент попречног пресека:

$$W = \frac{M}{R_{ms}} = \frac{FL}{R_{ms}}$$

где је: M - момент савијања,

R_{ms} - чврстоћа материјала при савијању, па израз за теоријску масу може се трансформисати у:

$$m_a = S \cdot L \cdot \rho = \frac{S}{W^{2/3}} \cdot W^{2/3} \cdot L \cdot \rho = (F^{2/3} \cdot L^{2/3}) \cdot \left(\frac{S}{W^{2/3}} \right) \cdot \left(\frac{\rho}{R_{ms}^{2/3}} \right),$$

где су: $K_{1a} = (F^{2/3} \cdot L^{2/3}), \quad K_{2a} = \left(\frac{S}{W^{2/3}} \right), \quad K_{3a} = \left(\frac{\rho}{R_{ms}^{2/3}} \right).$

Према критеријуму крутости меродаван за прорачун је угиб испод силе на препусту, f , који зависи од модула еластичности материјала E и аксијалног момента инерције попречног пресека I који се за овај случај може израчунати као:

$$I = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot f}$$

Теоријска маса је тада:

$$m_b = \frac{S}{I^{0,5}} \cdot I^{0,5} \cdot L \cdot \rho = \frac{F^{0,5} \cdot L^{2,5}}{3^{0,5} \cdot f^{0,5}} \cdot \frac{S}{I^{0,5}} \cdot \frac{\rho}{E^{0,5}},$$

па је:

$$K_{1b} = \frac{F^{0,5} \cdot L^{2,5}}{3^{0,5} \cdot f^{0,5}}, \quad K_{2b} = \frac{S}{I^{0,5}}, \quad K_{3b} = \frac{\rho}{E^{0,5}}.$$

Ако је за прорачун меродаван деформациони рад $A = \frac{F \cdot f}{2}$ може се на основу предњих израза за аксијални отпорни момент пресека W и аксијални инерциони момент пресека I наћи однос:

$$\frac{W^2}{I} = \frac{3 \cdot F \cdot f \cdot E}{L \cdot R_{ms}^2},$$

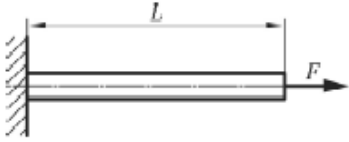
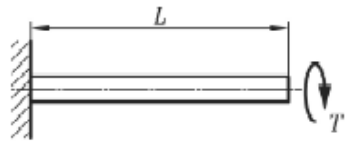
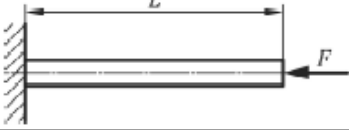
па је теоријска маса конструкције по критеријуму деформационог рада дефинисана за случај напрезања на савијање следећим изразом:

$$m_c = S \cdot \frac{I}{W^2} \cdot \frac{W^2}{I} \cdot L \cdot \rho = 3 \cdot F \cdot f \cdot \frac{S \cdot I}{W^2} \cdot \frac{E \cdot \rho}{R_{ms}^2},$$

а фактор општих услова, фактор профила и фактор материјала су:

$$K_{1c} = 3 \cdot F \cdot f, \quad K_{2c} = \frac{S \cdot I}{W^2}, \quad K_{3c} = \frac{E \cdot \rho}{R_{ms}^2}.$$

На сличан начин коришћењем познатих основних релација у Отпорности материјала могу се добити изрази и за остале врсте напрезања. У доле приказаној табели (таб. 1) дати су изразиси за утицајне факторе на теоријску масу конструкције за напрезања на истезање, увијање и извијање.

Скица напрезања	Фактор општих услова	Фактор профила	Фактор материјала
Истежање: 	$K_{1a} = FL$ $K_{1b} = \frac{FL}{\varepsilon}$ $K_{1c} = FL\varepsilon$	$K_{2a} = 1$ $K_{2b} = 1$ $K_{2c} = 1$	$K_{3a} = \frac{\rho}{\sigma_{de}}$ $K_{3b} = \frac{\rho}{E}$ $K_{3c} = \frac{E\rho}{\sigma_{de}^2}$
Увијање: 	$K_{1a} = T^{\frac{2}{3}}L$ $K_{1b} = \frac{T^{\frac{1}{2}}L^{\frac{2}{3}}}{\psi^{\frac{1}{2}}}$ $K_{1c} = T\psi$	$K_{2a} = \frac{S}{W_0^{\frac{2}{3}}}$ $K_{2b} = \frac{S}{I_0^{\frac{1}{2}}}$ $K_{2c} = \frac{SI_0}{W_0^2}$	$K_{3a} = \frac{\rho}{\sigma_{dt}^{\frac{2}{3}}}$ $K_{3b} = \frac{\rho}{G^{\frac{1}{2}}}$ $K_{3c} = \frac{G\rho}{\sigma_{dt}^2}$
Извијање: 	$K_{1b} = \frac{L^2 F^{\frac{1}{2}}}{\pi}$	$K_{2b} = \frac{S}{I_{min}^{\frac{1}{2}}}$	$K_{3b} = \frac{\rho}{E^{\frac{1}{2}}}$

Табела 1 - Фактори утицаја на теоријску масу конструкције

Значења неких ознака у табели:

ε - релативно издужење,

ψ - угао увијања,

W_0 - поларни отпорни момент попречног пресека,

I_0 - поларни инерциони момент попречног пресека,

R_{mt} - чврстоћа при увијању,

G - модул клизања материјала и

I_{min} - минимални момент инерције попречног пресека.

2.1. Утицај општих услова

Утицај општих услова на теоријску масу конструкције обухваћен је преко фактора општих услова K_1 који зависи од интензитета оптерећења, дужине греде и њених деформација (релативног издужења, угиба или увијања). Начином ослањања и расподелом ослоња може се утицати на растојање између ослоња и места деловања силе, као и на највеће деформације греде. На пример, као што смо и раније помињали, при савијању

греде укупне дужине L највећи угуб греде f зависи од начина ослањања тако да је у општем случају угуб дат преко израза:

$$f = C \cdot \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I},$$

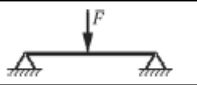
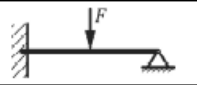
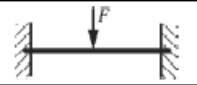
где је: C - фактор ослањања.

Ради смањивања интензитета оптерећења, односно масе греде, на располагању стоје различите могућности, на пример:

- смањивање масе елементима који оптерећују греду, уколико је то значајно,
- смањивање масе покретних делова механизма ради смањивања инерцијалних сила,
- смањивање отпора трења,
- повећање броја обртаја вратила ради смањивања периферних сила,
- прорачунавање елемената не према највећој случајној сили F_{max} , већ према највећој сили у нормалном раду машине $F_{Rmax} < F_{max}$; тада машина или постројење морају бити заштићени од нежељене силе F_{max} , која може угрозити конструкцију.

На дужину L , која такође непосредно и знатно утиче на тежину, обично није лако применити мере које воде ка смањивању масе, али према приликама може се ипак постићи скаћивање дужине елемената, на пример, усвајањем већег броја ослонаца, применом елемената мање запремине и др.

Систем ослањања елемената може знатно утицати на тежину. У табели (таб. 2) дате су вредности фактора ослањања за неколико случаја ослањања. На бази критеријума крутости маса је пропорционална квадратном корену угиба, па је у погледу смањања масе најповољнији случај обострано укљештене конзоле.

Ослањање				
Коефицијент C	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{48}$	$\frac{7}{768}$	$\frac{1}{192}$
Маса	m	$0,25m$	$0,165m$	$0,125m$

Табела 2 - Утицај ослањања на масу греде при савијању

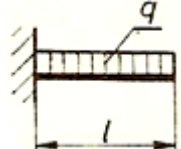
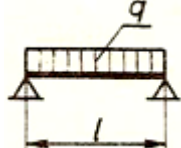
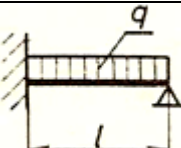
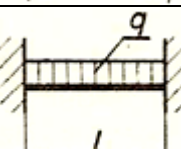
Из горе наведене табеле може се закључити да је маса за случај обостраног укљештења теоријски осам пута мања од референтне масе m греде укљештене на једном крају, а оптерећене попречном силом F на другом крају. Такође из табеле се види да маса обострано укљештене греде и оптерећене на средини четири пута мања од референтне масе m .

За случај извијања штапа важна карактеристика је редукована дужина L_{red} која зависи од начина ослањања. Маса штапа пропорционална је квадрату редуковане дужине. У доле приказаној табели (таб. 3) за четири начина ослањања штапа дужине L , дати су упоредни показатељи њихове редуковане дужине и масе.

Ослањање				
Редукована дужина L_{red}	$2L$	L	$0,5L$	$0,25L$
Маса	$4m$	m	$0,25m$	$0,625m$

Табела 3 - Утицај ослањања на масу штапа при извијању

У табели (таб. 4) налази се преглед величина и односа фактора K_1 за четири система ослањања континуално оптерећених греда (q [kN/cm]).

Редни број	Систем ослоња	K_{1a} [$kN^{2/3} \cdot cm^{5/3}$]	K_{1b} [$kN^{1/3} \cdot cm^2$]	K_{1c} [$kN \cdot cm$]	$\frac{K_x}{K_1}$		
					"a"	"b"	"c"
1		$\frac{q^{2/3} l^{7/3}}{2^{2/3}}$	$\frac{q^{1/2} l}{2^{2/3} f^{1/2}}$	$2 \cdot q \cdot l \cdot f$	1	1	1
2		$\frac{q^{2/3} l^{7/3}}{4}$	$\frac{5^{1/2} q^{1/2} l^3}{8 \cdot 6^{1/2} f^{1/2}}$	$\frac{6 \cdot q \cdot l \cdot f}{5}$	0,4	0,32	0,6
3		$\frac{q^{2/3} l^{7/3}}{4}$	$\frac{q^{1/2} l^3}{185^{1/2} f^{1/2}}$	$\frac{185 \cdot q \cdot l \cdot f}{64}$	0,4	0,21	1,45
4		$\frac{q^{2/3} l^{7/3}}{12^{2/3}}$	$\frac{5^{1/2} q^{1/2} l^3}{8 \cdot 6^{1/2} f^{1/2}}$	$\frac{8 \cdot q \cdot l \cdot f}{3}$	0,3	0,14	133

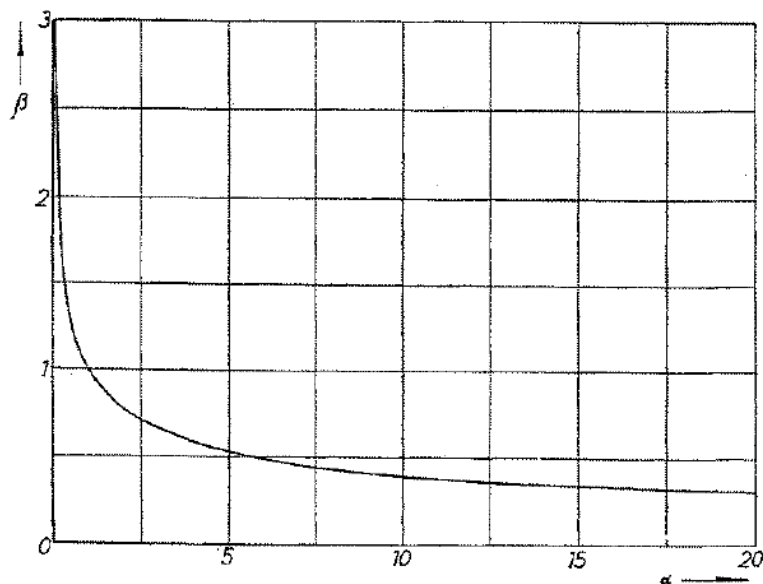
Табела 4 - Фактор општих услова K_1 при савијању (континуално оптерећење)

Када би се упоредили масе концентрисано и континуално оптерећених греда, под једнаким условима и под условом да је $F = q \cdot l$, добило би се за једнострано укљештену греду однос $2^{2/3} \approx 1,6$, односно укљештена гдера оптерећена концентрисаном силом била би тежа за 60%.

Пример 1. - Помоћу фактора општих услова може се одредити однос масе двеју простих опруга дужина l и $l' = \beta l$, изложених савијању под утицајем силе F , односно $F' = \alpha F$. Тражени однос износи:

$$k = \frac{K_{1a}}{K'_{1a}} = \frac{F^{2/3} \cdot l^{5/3}}{(\alpha \cdot F)^{2/3} \cdot (\beta l)^{5/3}} = \frac{1}{\alpha^{2/3} \beta^{5/3}}$$

Услов да масе таквих двеју опруга буду једнаке испуњен је када је $k = 1$; за тај случај крива линија $\alpha^2 \beta^5 = 1$ (сл. 6) представља геометријско место тачака чије координате α и β обележавају односе сила $\alpha = F'/F$ и дужина $\beta = l'/l$ за које су масе простих опруга једнаке.



Слика 6 - Опруге изложене савијању имају једнаке масе када су односи сила $\alpha = F'/F$ и односи дужина $\beta = l'/l$, у складу са датим дијаграмом

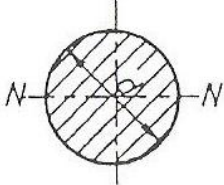
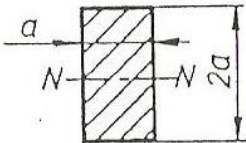
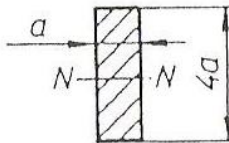
2.2. Утицај профила

Не треба профил елемената за лаке конструкције бирати само на основу захтева за смањење масе. Има и других услова о којима се једноставно мора водити рачуна при усвајању профила. То су на пример:

- цена и могућност набавке,
- погодност профила за израду и обраду, у зависности од броја примерака и од врсте материјала и обраде,
- погодност профила за склапање са другим профилима,

- подобност за одређену функцију што зависи од тога да ли је у питању непокретан или покретан елемент, да ли је кретање праволинијско или кружно, да ли при кретању постоје отпори средине,
- прилагођеност профила напонском стању,
- усклађеност са стандардима, где је то могуће и оправдано.

Утицај профила на теоријску масу конструкције обухваћен је фактором K_2 који карактерише рационалност облика попречног пресека без обзира на његове димензије. Вредности бездимензионог фактора профила (таб. 5) дате су за три различита облика профила при савијању око неутралне осе N-N. Нај неповољнији профил је пуни кружни попречни пресек јер је фактор профила за њега највећи, па је и маса највећа. Од два посматрана правоугаоно пуни попречни пресек повољнији је онај са већим односом страна правоугаоника.

Профил			
Критеријум чврстоће	$K_{2a} = \frac{S / W^{2/3}}{d^2 \pi / 4} = \frac{(d^3 \pi / 32)^{2/3}}{d^2 \pi / 4} = 3,69$	$K_{2a} = \frac{2a^2}{(4a^3 / 6)^{2/3}} = 2,62$	$K_{2a} = \frac{4a^2}{(16a^3 / 6)^{2/3}} = 2,08$
Критеријум крутости	$K_{2b} = \frac{S / I^{1/2}}{d^2 \pi / 4} = \frac{(d^4 \pi / 64)^{1/2}}{d^2 \pi / 4} = 3,54$	$K_{2b} = \frac{2a^2}{(8a^4 / 12)^{1/2}} = 2,45$	$K_{2b} = \frac{4a^2}{(64a^4 / 12)^{1/2}} = 1,73$

Табела 5 - Утицај профила на масу при савијању

У машинству посебно су интересантни кружни прстенасти профили који се користе за вратила, осовине и друге обртне делове. Код прстенастих, обртних машинских делова повећањем спољашних димензија пречника са повећањем истовремено и унутрашње шупљине, повећава се крутост и чврстоћа. У савременом машинству постоји тенденција примене танкозидних конструкција и љуски за све оне делове који треба да поседују тражену чврстоћу и крутост при малој маси. У лакоградњи се данас користе профили добијени савијањем лимова тањих од 1mm, за разлику од ваљаних профила чије су дебљине око 3,5 mm.

2.2.1. Истезање

Фактор профила K_2 за затегнуте елементе је увек једнак јединици без обзира на усвојени критеријум за прорачунавање, па се теоријска маса може изразити као:

$$m = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = K_1 \cdot K_3$$

Према томе, облик профила не утиче на тежину па је свеједно који ће профил бити изабран за елементе изложене затезању. То допушта да се више времена препусти рационалном конструисању профила.

При затезању свако влакно у материјалу једнако је напрегнуто ($\sigma = \text{конст.}$). Такво напонско стање биће поремећено када је елемент изложен концентрацији напона; концентрацију напона треба избегавати или је што више ублажавати, када је реч о олакшаним конструкцијама.

Исто такво напонско стање влада и у елементима изложени притиску, без извијања.

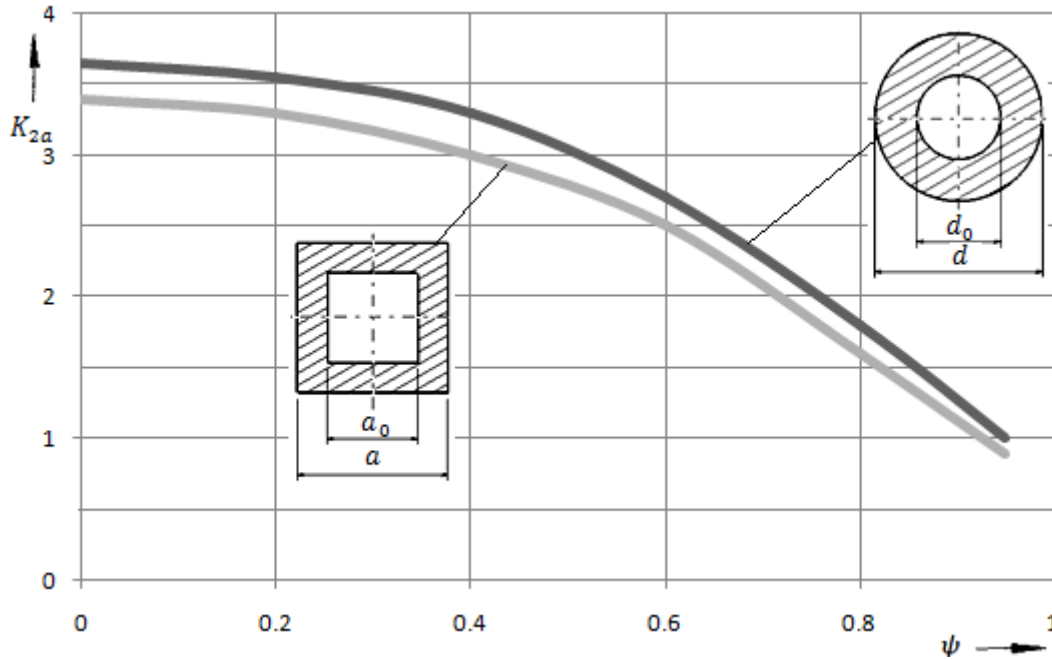
2.2.2. Савијање

За случај савијања по критеријуму чврстоће фактор профила је $K_{2a} = S/W^{2/3}$, где је S површина попречног пресека, а W аксијални отперни момент пресека елемента изложеног савијању. Фактор K_{2a} утолико је мањи, самим тим и маса елемента је мања, уколико профил има већи отпорни момент W при мањој површини попречног пресека S . За сваки попречни пресек елемента може се одредити фактор K_{2a} када су познати S и W .

За кружни прстен (сл. 7) је $S = \frac{\pi(d^2 - d_0^2)}{4}$, а $W = \frac{\pi(d^4 - d_0^4)}{32d}$. Увођењем односа унутрашњег и спољашњег пречника $\psi = d_0/d$, добија се:

$$K_{2a} = \frac{S}{W^{2/3}} = \frac{\frac{\pi d^2}{2} \cdot (1 - \psi^2)}{\left(\frac{\pi d^3}{2^5}\right)^{2/3} \cdot (1 - \psi^4)^{2/3}} = 2^{4/3} \cdot \pi^{1/3} \sqrt[3]{\frac{1 - \psi^2}{(1 + \psi^2)^2}} = 3,68 \sqrt[3]{\frac{1 - \psi^2}{(1 + \psi^2)^2}}$$

Фактор профила зависи од односа ψ и мањи је када је однос ψ већи, када су зидови сразмерно тањи (сл. 7). За пун кружни пресек $\psi = 0$, а $K_{2a} = 3,68$.



Слика 7 - Зависност фактора профила за кружни и квадратни шупљи попречни пресек, при савијању

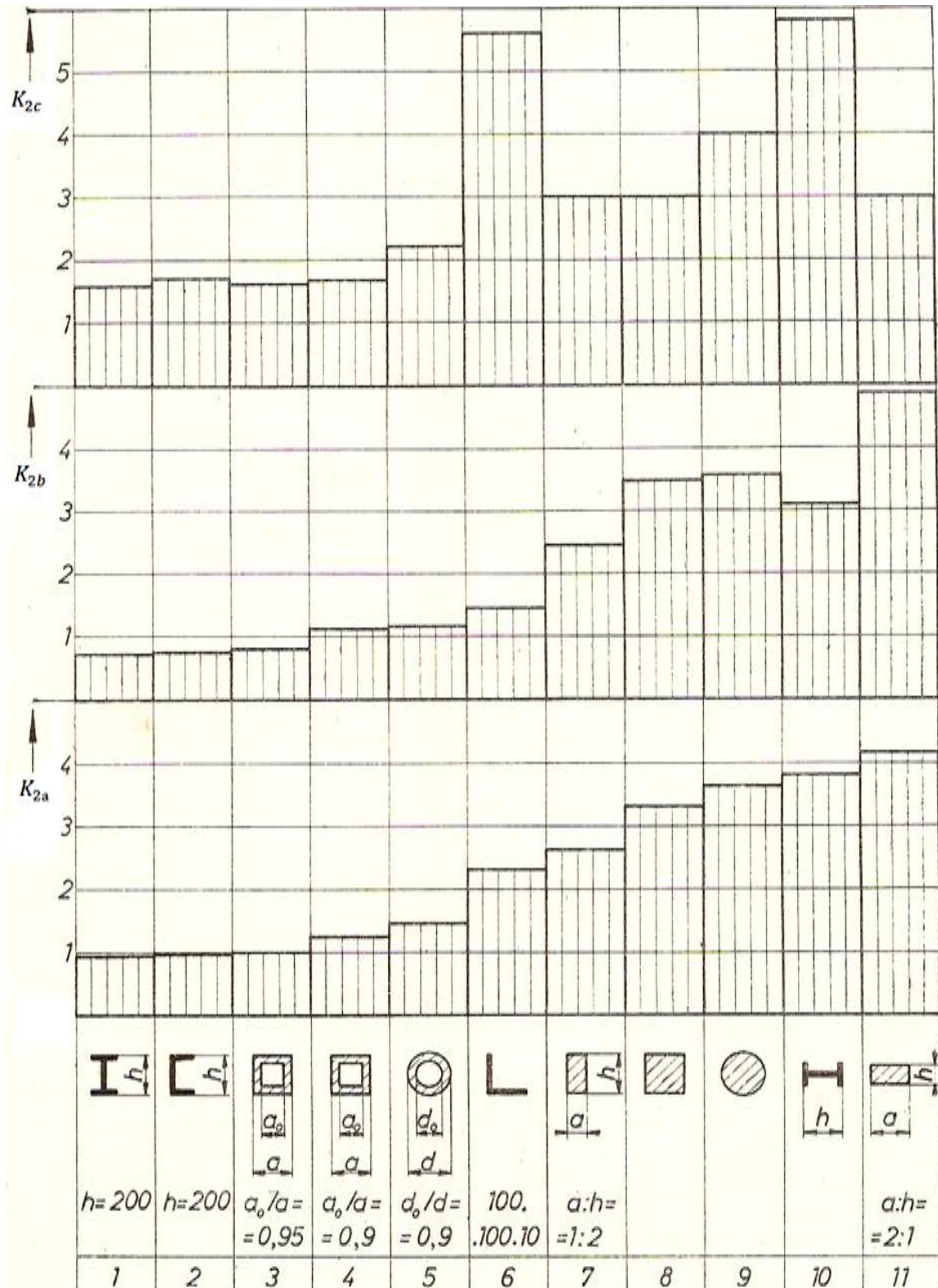
За шупљи квадрат једнаке дебљине зидова (сл. 7) $S = a^2 - a_0^2$, а $W = \frac{a^4 - a_0^4}{6a}$. Увођењем односа $\psi = a_0/a$ добија се:

$$K_{2a} = \frac{S}{W^{2/3}} = \frac{a^2 \cdot (1 - \psi^2)}{\left(\frac{a^3}{6}\right)^{2/3} \cdot (1 - \psi^4)^{2/3}} = 6^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1 - \psi^2}{(1 + \psi^2)^2}} = 3,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{1 - \psi^2}{(1 + \psi^2)^2}}$$

Фактора K_{2a} за пун квадратни пресек ($\psi = 0$) је $K_{2a} = 3,3$.

Поређењем може се утврдити да је шупаљ квадратни пресек повољнији од прстенастог пресека када је у питању маса.

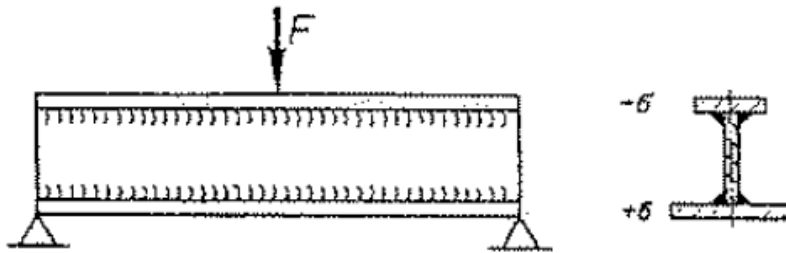
Најповољнији профили у погледу смањења масе за напрезања на савијање јесу профили чије су масе што више удаљене од неутралне осе савијања. То су на пример I профил, шупљи кружни профил са малом дебљином зида. Пуни кружни профили су непогодни за израду лаких профила подвргнути савијању. Међутим, ту предност имају I и [профили, само за случај савијања у једној равни, а сандучасти профили могу бити успешно примењивани и за савијање у две или више равни.



Табела 6 - Упоредни приказ величина фактора профила K_2 при савијању, за неколико уобичајних пресека

Кружни пресеци, пуни и прстенасти, погодни су за елементе који се обрћу пошто у сваком положају имају једнак фактор K_{2a} , а то није случај са другим профилима. За лаке конструкције је умесна примена вратила прстенастог попречног пресека. Цеви танких зидова су такође погодне за лаке конструкције, пошто се одликују сразмерно малом тежином.

Смањивању масе доприносе и профили који имају већи пресек у области затезања (сл. 8); такви облици се лако могу и заваривањем.



Слика 8 - Неједнаки пресеци у областима затезања и притиска, остварени заваривањем

По критеријуму крутости $K_{2b} = S/I^{1/2}$, где је I аксијални момент инерције пресека елемента. Поступак за одређивање фактора K_{2b} сличан је ранијем за K_{2a} . На пример, за кружни попречни пресек је $K_{2b} = 3,55 \sqrt{\frac{1-\psi^2}{(1+\psi^2)^2}}$, а за шупљи квадратни пресек

$$K_{2b} = 3,46 \sqrt{\frac{1-\psi^2}{(1+\psi^2)^2}}.$$

За критеријум прорачунавања деформационог рада фактор је $K_{2c} = SI/W^2$, па је на пример за кружни прстен $K_{2c} = \frac{4}{1-\psi^2}$, а за шупаљ квадрат $K_{2c} = \frac{4}{1-\psi^2}$.

2.2.3. Увијање

При увијању највише су напрегнута спољашња влакна пресека; због тога су лакши они профили којима је највећа маса пресека више удаљена од средишта. То су: шупљи профили (као што су кружни прстем и сандучасти профил), па донекле и круг. За случај увијања фактор профила по критеријуму чврстоће опада са порастом поларног отпорног момента попречног пресека, а по критеријуму крутости опада са повећањем поларног инерционог момента попречног пресека.

За критеријум чврстоће је фактор профила $K_{2a} = S/W_0^{2/3}$, где је W_0 поларни отпорни момент пресека, па је за прстенасти пресек $S = \frac{\pi d^2}{4} \cdot (1 - \psi^2)$, а

$$W_0 = \frac{\pi d^3}{16} \cdot (1 - \psi^4), \text{ односно фактор профила}$$

$$K_{2a} = \frac{\frac{\pi d^2}{4} \cdot (1 - \psi^2)}{\left(\frac{\pi d^3}{2^4}\right)^{2/3} \cdot (1 - \psi^4)^{2/3}} = 2^{2/3} \cdot \pi^{1/3} \sqrt[3]{\frac{1 - \psi^2}{(1 + \psi^2)^2}} = 2,32 \sqrt[3]{\frac{1 - \psi^2}{(1 + \psi^2)^2}}$$

За кружни пресек $\psi = 0,9$ је $K_{2a} = 0,9$, за пун круг $K_{2a} = 2,32$, а за пун квадратни пресек $K_{2a} = 2,85$. Према томе за елементе изложене увијању повољнији је, с' обзиром на масу, кружни попречни пресек од квадратног, а исто тако и кружни шупљи попречни пресек од шупљег квадратног.

Поменути поредак величина фактора K_{2a} задржавају и фактори K_{2b} и K_{2c} , али им се вредности разликују.

Како су код увијања највише напрегнути спољашни делови профила, најпогоднији облици били би прстенасти кружни профил за обртне машинске делове и сандучасти профил за непокретне делове.

2.2.4. Извијање

Фактор профила је $K_2 = S/I^{1/2}$, када је реч о извијању (исто као и за савијање). Према томе, профили су лаки када имају малу површину пресека, а велик момент инерције. То су профили сандучастог облика, па и профил I са широким стопама. Неповољни су пуни профили, нпр. круг, квадрат, правоугаоник.

Фактор кружног прстенастог профила изложен извијању $K_2 = 3,55 \sqrt{\frac{1 - \psi^2}{1 + \psi^2}}$ истоветан је као и за савијање (K_{2b}).

Дужина извијања може се скратити уметањем ребара или укрућења па тиме знатно смањити тежину профила.

2.3. Утицај материјала

Утицај материјала на масу конструкције веома је важан параметар при конструисању и обухваћен је фактором материјала K_3 . За упоређивање погодности појединих материјала у погледу смањења масе обично се користи реципрочна вредност фактора K_3 , као што су:

$$R_m / \rho - \text{јединична чврстоћа,} \quad R_{ms}^{2/3} / \rho - \text{јединична чврстоћа при савијању,}$$

$$R_{p02} / \rho - \text{јединична граница развлачења,} \quad R_{mt}^{2/3} / \rho - \text{јединична чврстоћа при увијању,}$$

$$E / \rho - \text{јединична крутост,} \quad R_{p02}^2 / E\rho - \text{јединична ударна чврстоћа.}$$

Јединични показатељи за поједине материјале (таб. 7):

Материјал	Густина ρ $\frac{kg}{dm^3}$	Основне особине материјала у МПа			Јед. показатељ у $\frac{MPa}{\frac{kg}{dm^3}}$		
		R_m	R_{p02}	E	$\frac{R_m}{\rho}$	$\frac{R_{p02}}{\rho}$	$\frac{E}{\rho}$
Челик	7,85	370	220	210 000	47	28	27 000
		700	420		89	54	
		1200	750		155	96	
Сиви лив	7,25	220	-	100 000	30	-	14 000
Модиф. лив		400	240	150 000	55	33	21 000
Сферо лив		1000	700	170 000	138	97	23 000
Дур Al	2,8	420	265	75 000	150	95	27 000
Mg легуре	1,8	240	160	43 000	133	89	24 000
Ti легуре	4,5	1200	750	115 000	266	166	26 000
Боровина	0,5	83	44	11 000	166	88	22 000
Композит	1,8	600	400	45 000	333	222	25 000

Табела 7 - Јединични показатељ материјала

Када је битније испоштовати критеријум чврстоће елемента, смањење масе можемо остварити коришћењем висококвалитетних челика и лаких легура. Титанове легуре имају велику вредност јединичне чврстоће и јединичне границе развлачења па је њихова примена значајна наручито у ракетној техници. Највеће вредности јединичне чврстоће и границе развлачења имају неке врсте композитних материјала, код којих је основа пластична маса, а армиране су влакнима специјалног материјала па су зато у задње време ови материјали нашли значајну примену у свим конструкцијама где мала маса има приоритетни значај без обзира на цену.

Међутим када је цена битан фактор треба избегавати употребу материјала који се тешко набавља и који је скуп, треба настојати да се избор задржи на јефтином материјалу уколико то дозвољавају услови.

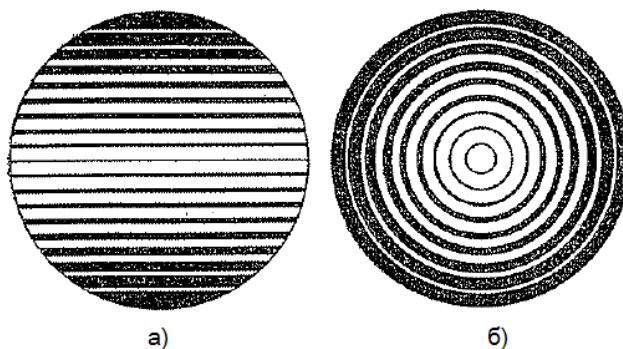
Када је приоритетни критеријум крутост конструкције треба изабрати неки други начин, а не избор материјала, јер већина материјала имају приближне вредности јединичне крутости (таб. 7).

3

Рационални делови машина

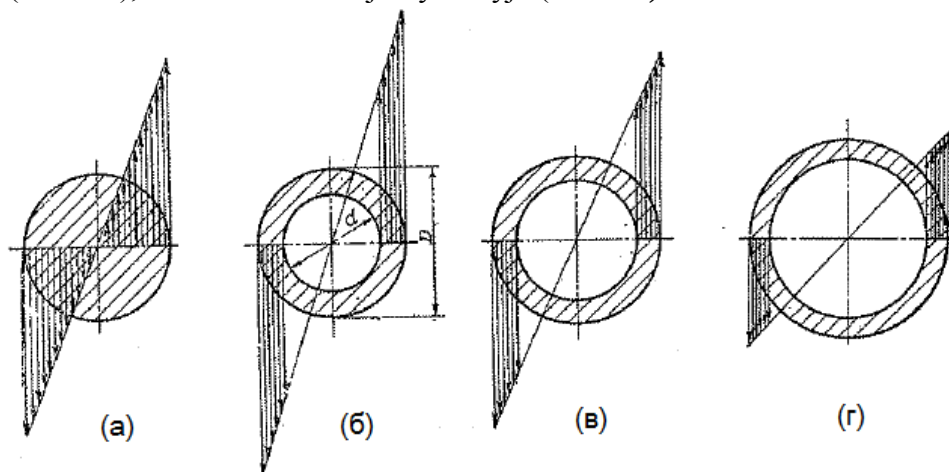
Смањење масе може се постићи и давањем елементима машине једнако оптерећење. Идеални случај био би када би се уздужно оптерећење једнако дистрибуирало на делове машине и на свакој тачки дела. Ово је случај када се једнака снага најпотпуније изражава. Материјал је искоришћен до свог највећег степена корисности, а маса је сведена на најмању могућу. У принципу, овакав случај је могућ само при неколико типова оптерећења, када се оптерећење простира по целом попречном пресеку дела, када је део под компресијом и долимично оптерећен смицањем.

При савијању, увијању и сложеним напонским стањима, унутрашњи напони дуж неког дела се не дистрибуирају једнако. Напони су највећи на крајњим тачкама, а при средини дела може пасти и на нулу (сл. 9). У оваквим случајевима једино је могуће да до приближних услова за изједначавање напона дуж целог дела дође тако што ћемо уклањати материјала са мање оптерећених делова и додавајући га на најоптерећенија места, на периферијама дела.



Слика 9 - Расподела напона на поперечном пресеку цилиндричног елемента под различитим условима напрезања: а) савијање; б) увијање

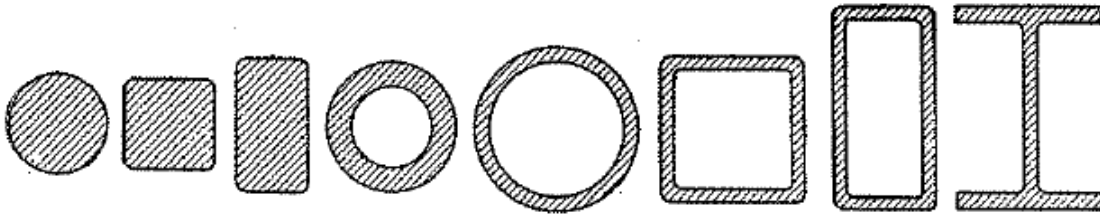
У машинству наручито су интересантни кружни прстенасти профили који се користе за вратила, осовине и друге обртне делове машина. Узмимо, на пример, цилиндрични део подвргнут увијању, унутрашњи напони на поперечном пресеку се расподељују према закону праве линије, пролазећи кроз центар дела (сл. 10 а). Уклањање метала са слабо оптерећене зоне, односно израда прстенастог поперечног пресека (цеви), осигуравају равномернију расподелу унутрашњих напона у остале зоне (сл. 10 б). Што је зид тањи, тј. што је однос d/D већи, расподела притиска је правилнија. Одржавање спољњег пречника непроменљивим проузрокује се повећање притиска на зид; са друге стране, повећање спољашњег пречника лако смањује ниво притиска на пређашње вредности (сл. 10 в), или га чак значајно умањује (сл. 10 г).



Слика 10 - Расподела напона у пуним и шупљим деловима конструкција

Овај принцип, који се може дефинисати као принцип подједнако оптерећених делова, може се користити за делове било ког облика.

Уштеде у материјалу могу се добити у следећим облицима (сл. 11):



Слика 11 - Изглед попречних пресека неких стандардних профила

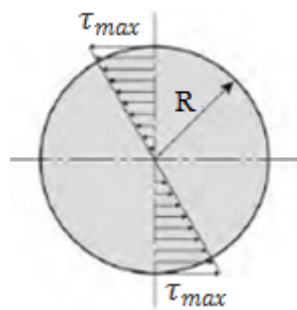
На слици видимо профиле са идентичном површином попречног пресека, самим тим, и идентичном тежином по метру. Најрационалнији облици јесу шупљи и прстенасти профили, зато што су они велике чврстоће и крутости.

3.1. Уштеде у материјалу коришћењем шупљих вратила при увијању

Напон смицања $\tau_z(z)$, при увијању вратила, линеарна је функција од полупречника његовог кружног попречног пресека.

$$\tau_z(z) = \frac{M_t(z)}{I_0(z)} \cdot \rho, \quad \rho \leq 0 \leq R$$

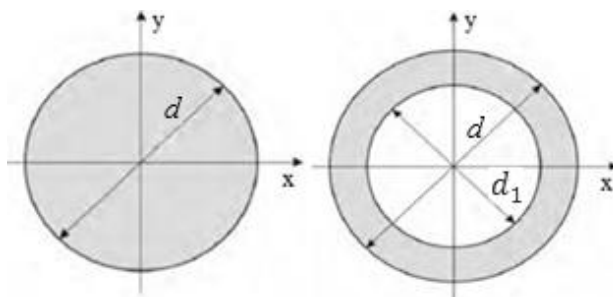
Расподела напона смицања при увијању вратила кружног попречног пресека приказана је графички (сл. 12).



Слика 12 - Расподела напона при увијању вратила

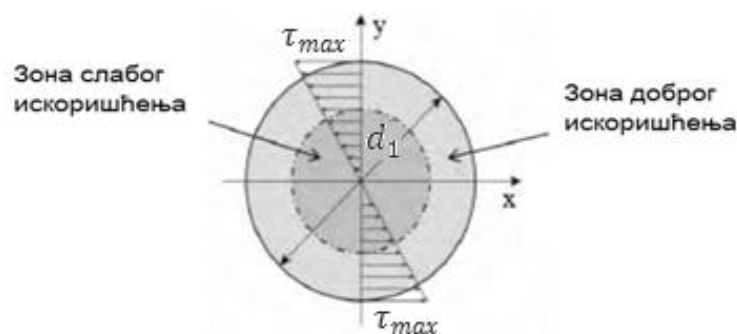
Унутрашњи део вратила је мање напрегнут на увијање од спољашњег дела, уз мало повећање спољашњег пречника и применом кружно-прстенастог попречног пресека остварити уштеду у материјалу.

Посматрамо два вратила од истог материјала, кружног и кружно-прстенастог попречног пресека (сл. 13)



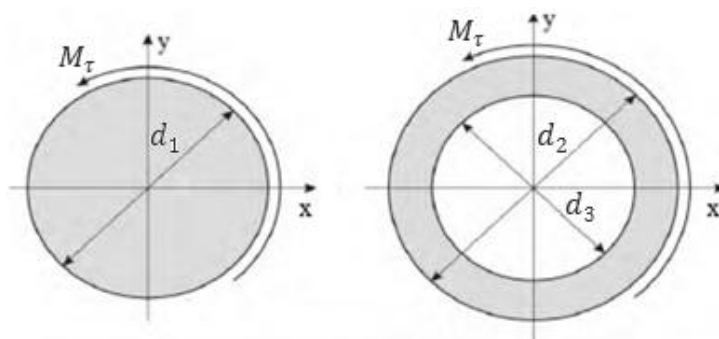
Слика 13 - Вратила пуног и шупљег попречног пресека од истог материјала

Зоне искоришћености материјала (сл. 14):



Слика 14 - Зоне напрезања материјала

Размотримо случај вратила B_1 кружног и вратила B_2 кружно-прстенастог попречног пресека која су од истог материјала, исте дужине и истог момента увијања M_t (сл. 15).



Слика 15- Вратила пуног и шупљег попречног пресека од истог материјала при увијању

Да би вратила B_1 и B_2 имала исту носивост, потребно је да им максимални напони смицања имају исте вредности.

$$\tau_{max}(\theta_1) = \tau_{max}(\theta_2)$$

Користећи ознаке са претходне слике одредимо односе:

Пречника $\frac{d_1}{d_2}$ Тежина $\frac{Q_1}{Q_2}$; Углова увијања $\frac{\theta_1}{\theta_2}$.

Однос пречника, критеријум дозвољеног напона смицања τ_d :

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{\sqrt[3]{\frac{16M_t}{\pi\tau_d}}}{\sqrt[3]{\frac{16M_t}{\pi\tau_d(1-\psi^4)}}} = \sqrt[3]{1-\psi^4} \implies d_1 < d_2 \quad \psi = \frac{d_2}{d_3}$$

Однос тежина (према изразима за израчунавање тежина):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\rho_1 \cdot A_1 \cdot l_1}{\rho_2 \cdot A_2 \cdot l_2} \quad \text{ако је,} \quad l_1 = l_2 \quad \text{и} \quad \rho_1 = \rho_2$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{d_1^2\pi}{4}}{\frac{d_2^2\pi}{4} - \frac{d_3^2\pi}{4}} = \frac{d_1^2}{d_2^2 - d_3^2} = \frac{d_1^2}{d_2^2(1-\psi^2)}$$

ρ_1, ρ_2 - густине вратила B_1 и B_2

l_1, l_2 - дужине вратила B_1 и B_2

A_1, A_2 - површине попречних пресека вратила B_1 и B_2

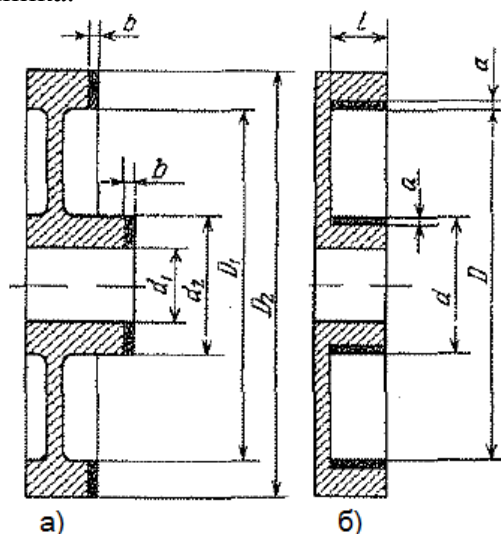
$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt[3]{1-\psi^4}$$

$$\begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(d_1/d_2)^2}{1-\psi^2} &\implies \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt[3]{(1-\psi^4)^2}}{1-\psi^2} = \sqrt[3]{\frac{(1-\psi^2)^2 \cdot (1+\psi^2)^2}{(1-\psi^2)^3}} = \sqrt[3]{\frac{(1+\psi^2)^2}{1-\psi^2}} \\ &\implies Q_1 > Q_2 \end{aligned}$$

Закључак : Са шупљим вратилом је остварена уштеда у материјалу.

3.2. Утицај пречника на масу елемента

Када се материјал скида са цилиндричних компоненти, дискова, точкова, прстенова, треба имати на уму да се највећи ефекат постиже када се помери материјал са њихове приферије, док се знатно слабији ефекат постиже ако се материјал скине са централних делова. Генерално гледано, маса која се ту чува пропорционална је квадрату пречника. На пример, могу се упоредити ефикасност смањења масе када се умањују осне димензије различитих пречника.



Слика 16 - Уклањање материјала са: а) аксијалних површина на центру и на периферији, б) унутрашњих страна елемента и смањење прстенастих запремина материјала у центру и на периферији

Одредићемо уштеду у тежини добијену уклањањем метала дебљине b са обода и главчине диска (сл. 16 а).

Запремина метала уклоњена са обода:

$$V_1 = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) b = \frac{\pi}{4} b D_2^2 \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]$$

Запремина метала уклоњена са главчине:

$$V_2 = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) b = \frac{\pi}{4} b d_2^2 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \right]$$

Однос запремина:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{D_2^2}{d_2^2} \cdot \frac{1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2}$$

Претпоставимо да је зид од обода до главчине исте дебљине и да је $D_1/D_2=0,8$. Са односима датим на слици (сл. 21 а) $d_1/d_2=0,5$ и добијеним односом запремина следи:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{D_2^2}{d_2^2} \cdot \frac{1 - 0,64}{1 - 0,25} = 0,5 \cdot \left(\frac{D_2}{d_2}\right)^2$$

У конкретном случају, када је $\frac{D_1}{D_2} = \frac{d_1}{d_2}$ добија се перфектан квадратни однос:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{D_2^2}{d_2^2} = 9$$

Слика (сл. 16 б) илуструје смањење масе машинског елемента, уклањањем запремине метала у облику прстенова исте дебљине на главчини као и на ободу. У том случају запремина материјала уклоњена са обода ће бити:

$$V_1 \approx D \cdot a \cdot l \cdot \pi$$

Запремина метала уклоњена са главчине:

$$V_2 \approx d \cdot a \cdot l \cdot \pi$$

Однос запремина је директно пропорционалан односу пречника:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{D}{d}$$

Стога, упоредна уштеда у тежини, добијена уклањањем метала са различитих места, зависи од начина отклањања и облика дела. То зависи од варирања пречника у оквирима D/d и $(D/d)^2$.

Радијално смањење дебљине према периферији дискова, прирубница, поклопаца и др, има широку примену, све више зато што овај облик одговара закону радијалне промене напона (трансверзална сила, момент савијања, центрифугална сила и др.).

3.3. Утицај броја обртаја на масу конструкције

Образац за приближно прорачунавање пречника изгледа овако:

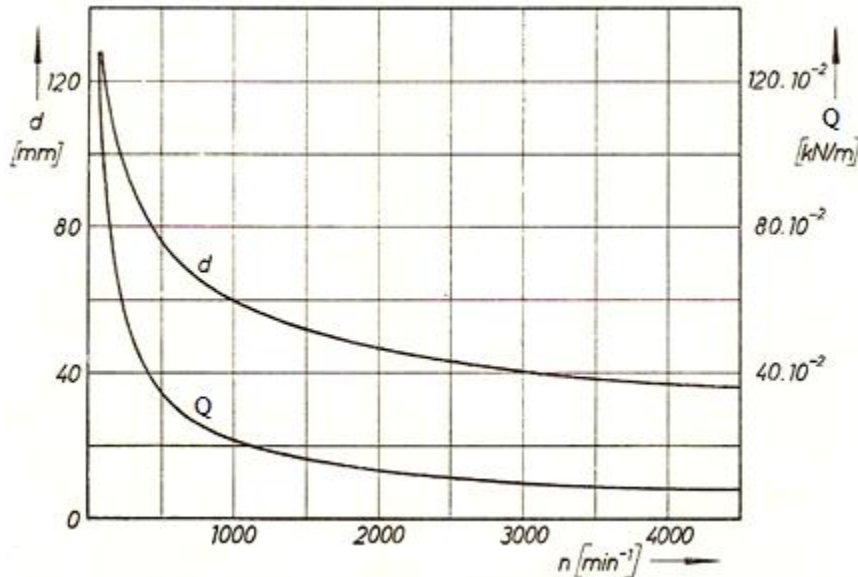
$$d = 12 \sqrt[3]{\frac{P}{n}} [cm],$$

где је $P [kW]$ снага, а $n [min^{-1}]$ број обртаја.

Тај образац сасвим јасно указује на чињеницу да је пречник вратила мањи када му је број обртаја (n) већи. На слици (сл. 17) дат је дијаграм који показује у коликој мери се смањују пречник и тежина вратила са повећањем броја обртаја. Мањи пречник вратила доноси, као последицу, не само смањивање масе вратила већ и смањивање маса свих елемената у склопу са вратилом: лежишта, зупчаника, спојница и др. Према томе, требало би, када је смањивање масе битно, ићи ка повећању броја обртаја, што се посебно корисно одразило на турбомашине.

Међутим повећање броја обртаја s' друге стране ствара нове проблеме у конструисању, па се због тога примењена препорука може применити само у неким сличајевима, уз велику обзирност. Повећањем брзоходности машина може имати, на пример, овакве последице:

- повећање инерцијалних сила у елементима клипног механизма,
- погоршање услова за постизање повољног процеса сагоревања у цилиндрима клипног мотора са унутрашњим сагоревањем,
- повећање лошег утицаја неуравнотежености маса обртних делова машина,
- стварање неповољних услова за рад лежишта уз повећани губитак снаге на трење, и др.

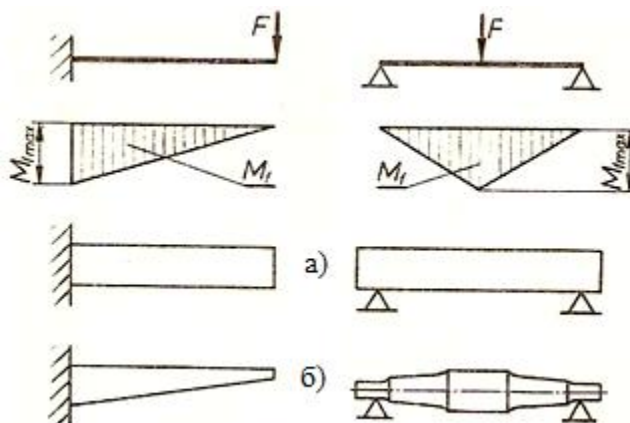


Слика 17 - Зависност пречника вратила d и тежине Q од броја обртаја n , за снагу $P = 125$ [kW]

3.4. Просторни облик и напонско стање

На тежину елемента може се знатно утицати и избором погодног просторног облика (геометријског облика), а не само избором погодног профила (попречног пресека).

На примеру (сл. 18) нацртани су дијаграми момента савијања M_f за укљештену греду и за греду са два ослоња. Када би се димензионисање греда извршило према највећим моментима савијања M_{fmax} , а задржао непромењен пресек по целој дужини (сл. 18 а), добили би резултате да материјал греде није потпуно искоришћен у пољу у коме су моменти савијања и напони мањи. Одузимањем материјала на тим местима добићемо лакше делове (сл. 18 б) и приближити се идеалним деловима са $\sigma = const$.



Слика 18 - Тежи а) и лакши б) облици елемената изложени савијању

У табели (таб. 8) налази се Клотов (Kloth) преглед тежина укљештених греда, различитих просторних облика и попречних пресека. Уколико су масе материјала више усклађене са величинама напона на појединим местима, уздуж и попречно, утолико је греда лакша. Тежина греде може се знатно смањити ако се у пољима мањих напона, у околини неутралне осе, предвиде отвори (таб. 8 редни бр. 6 и 8).

Када би се уместо конструкционог челика употребио какав други материјал, на пример легура алуминијума за облик под редним бројем 8 било би $Q = 63 [N]$ (4,6 %), а угиб би порастао чак до $f = 28 mm$.

Р. бр.		Q f [N] % [mm]		
		Q [N]	%	f [mm]
1		136	100	6,6
2		120	88	8,25
3		59	43	4,16
4		56	41	6
5		44	32	6,95
6		40	29	7,1
7		25	18	9,5
8		17	12,5	9,6

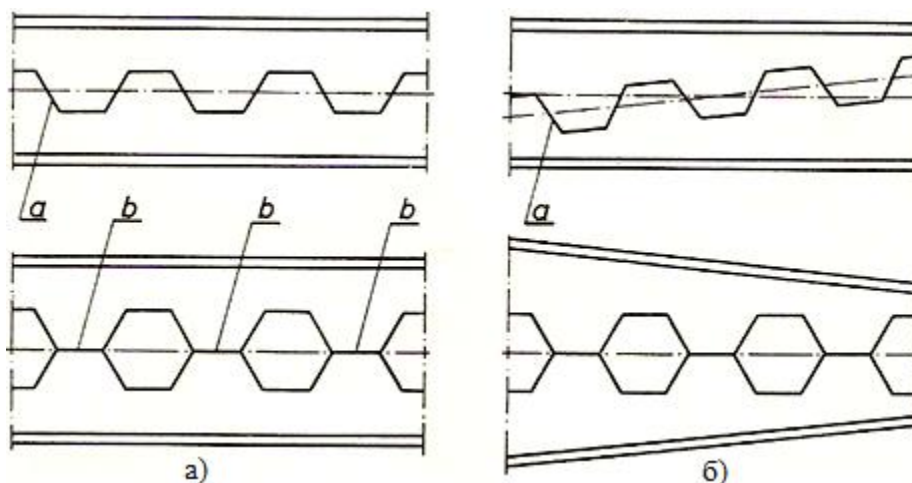
Табела 8 - Упоредни преглед тежина укљештених челичних греда различитих облика

Напомена:

1 - Дужине греда, оптерећења и напони су једнаки за све облике, и износе: $l = 1000 \text{ mm}$, $F = 1000 \text{ N}$, $\sigma_f = 98 \text{ MPa}$ (напон на месту укљештења).

2 - Q је тежина, а f је угиб греде.

Отвори различитих облика могу се лако изградити (сл. 19). Исецањем вертикалног ребра I-носача (сл. 19 а) по линији a , аутогеним сечењем, и стављањем једне половине I профила изнад друге уз бочно померање, па заваривањем половина по ивицама b добија се греда повећане висине и олакшане средине, због отвора. На тај начин је омогућено да се стандардни I профил, једноставним поступком, оспособи за појачану носивост при смањеној тежини.

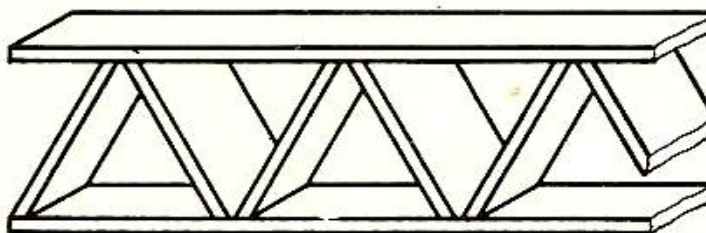


Слика 19 - Претварање стандардних носача у носаче повећане носивости, непроменљиве а) и променљиве б) висине; a - линија сечења, b - заварене ивице

Променљива висина носача, која значи приближавање стању $\sigma = const$, може се остварити ако се исецање профила I обави по линији a (сл. 19 б).

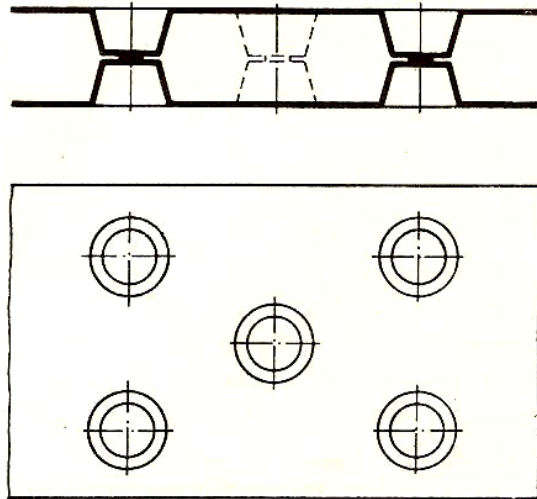
Постоје и низ других могућности да се при смањеној тежини елемената повећавају било носивост, било крутост при савијању или увијању, на пример:

- применом таласастих уместо правих цеви,
- применом љуски, плоча са ребрима или ћелија (сл. 20),



Слика 20 - Системом ћелија постиже се значајна крутост конструкција и велика уштеда у тежини

- применом решеткастих конструкција,
- применом пресованих склопова уместо склопова са клиновима,
- применом елемената изложених претходном напону,
- избегавањем јаких извора концентрације напона, који обично знатно ремете континуитет напона, па могу изазвати тешкоће при решавању расподеле маса материјала,
- применом "сендвич" лимова (лимова са испуном) или наручито пресованих илмова (АТГ-лимови), (сл. 21),



Слика 21 - АТГ-лим, има малу тежину и велику крутост при савијању

- избегавањем или смањивањем момента савијања (сл. 22),
 - применом тањих и финије обрађених елемената, којима је већа издржљивост.
- Међутим, није немогуће да се више може уштедети у тежини и у цени исправним избором погодног профила него избором "лакшег" материјала.



Слика 22 - Полуке облика а) и б) изложене су моментима савијања, а полука облика в) само затезању

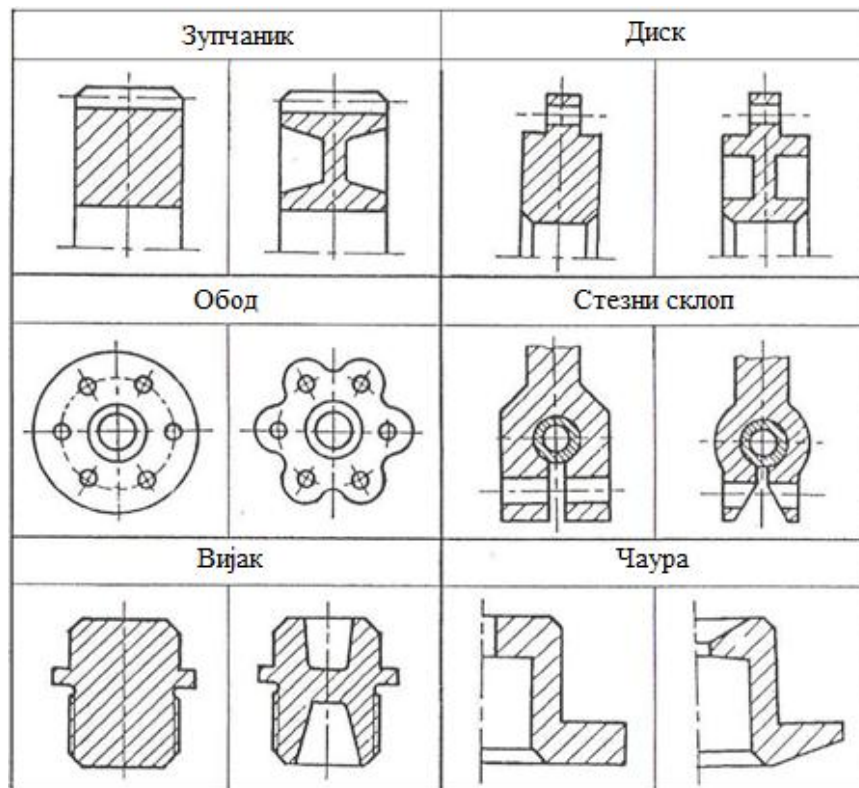
4

Практичне мере за смањење масе конструкција

Код реалних машинских конструкција на смањење масе може се утицати осим фактора општих услова, фактора профила, фактора материјала и на друге на чине као што су:

- обликовање машинских делова тако да су сви пресеци равномерно напрегнути,
- конструкционим олакшањима,
- увођењем кружних прелаза и прелаза под нагибом при спајању зидова,
- рационалним оптерећењем делова у циљу бољег искоришћења материјала,
- усавршавањем конструкционе шеме, итд.

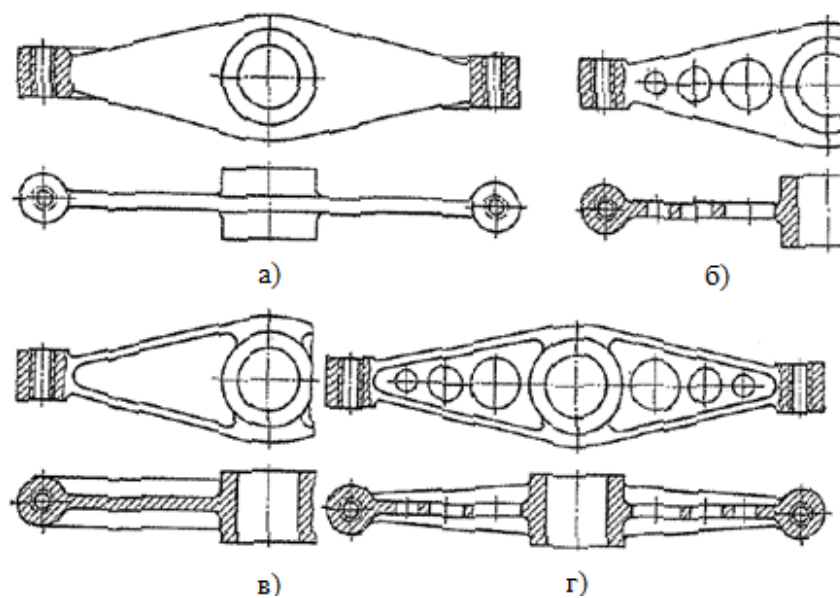
Идеално је када су унутрашњи напони у свакој тачки пресека дуж целог машинског елемента једнаки, али то је веома тешко остварити и то само када цео пресек подједнако прима оптерећење и када нема извора концентрације напона. При напрезању на истезање или притисак све тачке пресека су једнако оптерећене, али при савијању, увијању и сложеним напонским стањима напони су по пресеку неравномерно распоређени. Зато се тражи да максималне вредности напона у појединим попречним пресецима буду једнаки или бар приближно једнаки. Због сложености облика појединих машинских елемената и сложене расподеле напона у њима често је немогуће остварити једнакост максималних напона у различитим пресецима. Тада је корисно вршити конструкциона олакшања делова на местима где се очекују напони смањеног интензитета. Начини конструкционих олакшања неких машинских (сл. 23) делова као што су зупчаник, диск, обод, стезни склоп, вијак и чаура.



Слика 23 - Конструкциона олакшања

4.1. Пример олакшања полуге

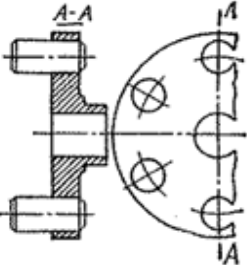
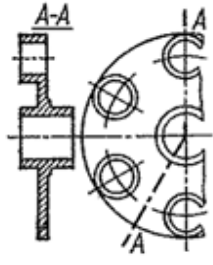
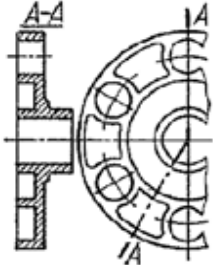
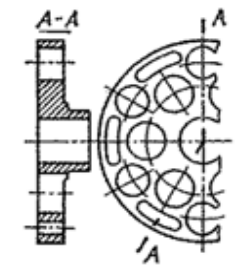
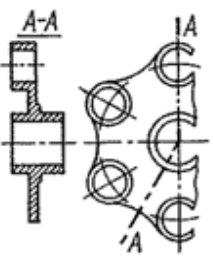
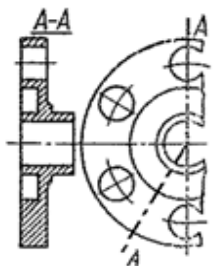
На слици (сл. 24) приказано је могуће решење олакшања полуге. На левој страни слике дате су полазне конструкције полуге, а на десној страни олакшане полуге.



Слика 24 - Олакшање полуга;

а), в) - оригинални делови; б), г) - олакшани делови

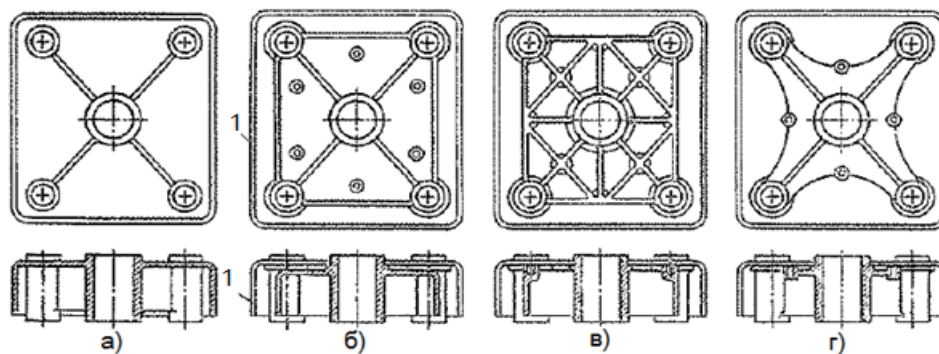
4.2. Неке од метода олакшања планетерних носача

Методы олакшавања планетарних носача					
Скица	Метода олакшавања	Скица	Метода олакшавања	Скица	Метода олакшавања
	Оригинална конст.		Смањење дебљине диска		Фиксирајућа прирубница ојачана са два кружна ребра
	Округли и издужени отвори		Смањење дебљине носача и обликовање удубљења између отвора за причвршћивање		Кружно удубљење између главчине и фиксирајућих отвора

Слика 25 - Методе олакшавања планетарних носача

4.3. Олакшање кућишта машина

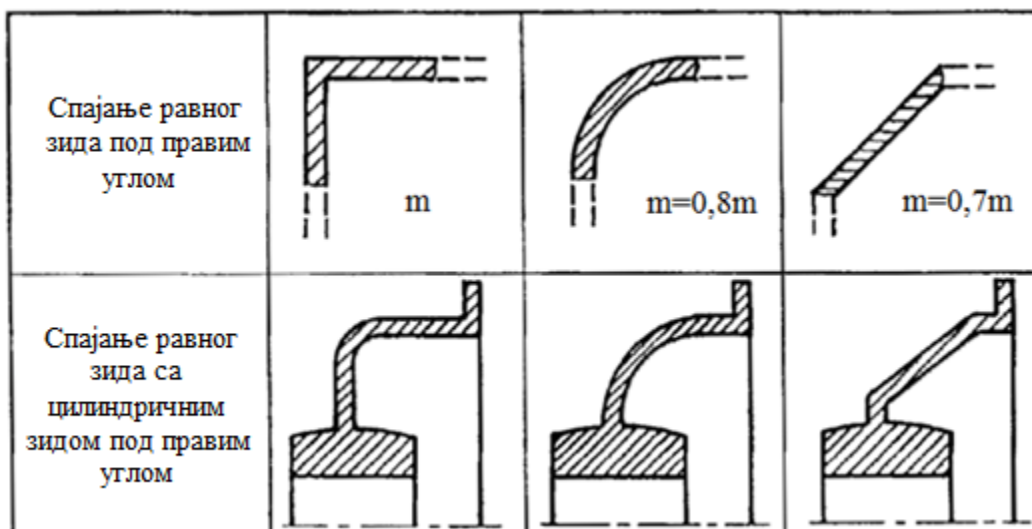
У низу случајева значајна смањења масе кућишта постиже се коришћењем скелетних конструкција (сл. 26). Елементи делова који морају да имају прецизне међусобне позиције (испупчења) се лију и касније повезују тим повезују лаким везама. Скелет се онда облаже лименим материјалом. Оригинална потпуно изливена структура приказана је на слици (сл. 26 а). Алтернатива је приказана на слици (сл. 26 б), она показује први корак олакшања: одливак је умањен, а спољашња функционално неопходна површина је направљена од танког омотача (1). На слици (сл. 26 в), приказани скелетни одливак има отворени решеткасти облик, који међусобно повезује централно и периферна испупчења. Решетка је покривена танким лимом. У другом облику скелетне конструкције (сл. 26 г) централно и периферна испупчења повезана су Т-секцијом (T-section) ребара.



Слика 26 - Могућа ојачања кућишта

4.4. Олакшања помоћу увођења прелазних радијуса и прелаза под нагибом

Још један начин смањења укупне масе јесте увођење прелазних радијуса и прелаза под нагибом при спајању зидова конструкције (сл. 27).

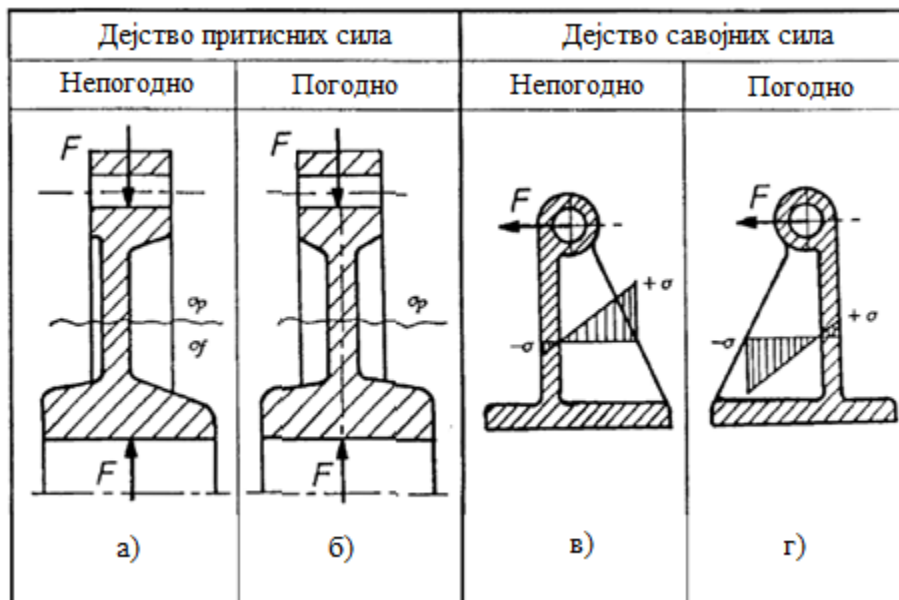


Слика 27 - Спајање зидова конструкција

Као што се види на слици, при спајању равног зида под правим углом смањење масе за случај прелаза у блоку радијуса је за око 20%, а у облику нагиба за око 30%. Слични ефекти се постижу и спајањем цилиндричног и равног зида под правим углом. Пошто су критични попречни пресеци равномерно напрегнути у случају аксијалног напрезања на истезање или притисак треба тежити кад год је то могуће да се савијање замени аксијалним напрезањем. То се постиже решеткастим конструкцијама где су поједини штапови напрегнути на истезање или на притисак.

4.5. Деловање оптерећења у правцу осе симетрије машинских делова - рационално оптерећивање

Потребно је такође водити рачуна о правцу, смеру и месту деловања оптерећења у односу на осе симетрије машинског дела (сл. 28), наиме ако силе делују ексцентрично доћи ће до појаве додатних напрезања. Па то ексцентрично оптерећење може изазвати допунско напрезање на савијање (сл. 28 а). То допунско оптерећење може се отклонити постављањем сила на симетралу машинског дела (сл. 28 б). Приказано је дејство савојних сила и расподела напона од напрезања на савијање у попречном пресеку (сл. 28 в,г). пошто се ради о одливку где материјал за ливење много боље преноси притисак од испезањапогоднија је конструкција са мањим истежућим напонима.



Слика 28 - Рационално оптерећивање

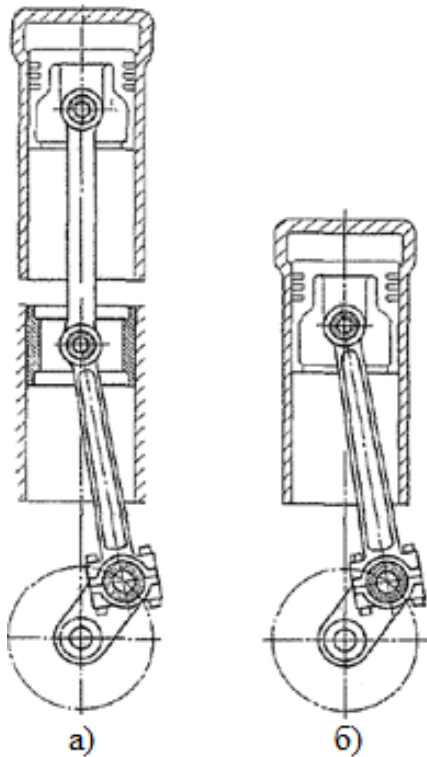
4.6. Смањење масе конструкције правилним избором конструкционе шеме

Смањење масе конструкције постиже се и правилним избором конструкционе шеме, односно острањењем сувишних делова, применом рационалног размештаја делова и смањењем дужина делова и агрегата.

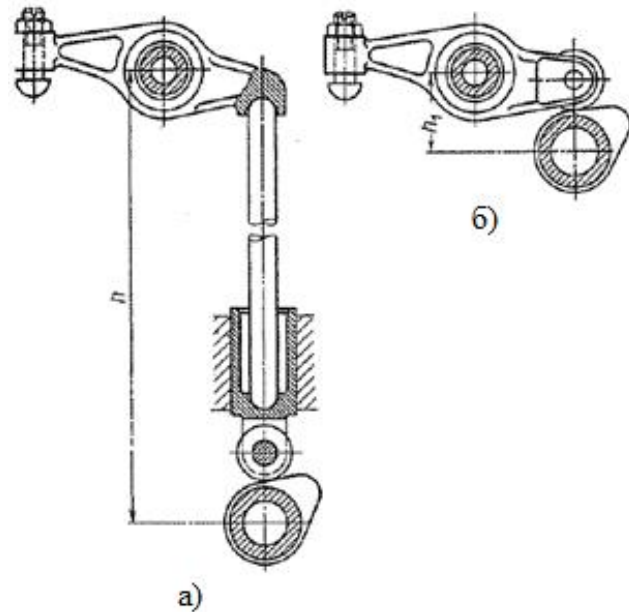
4.6.1. Смањење масе конструкције смањењем броја веза у механизму

Елиминисањем непотребних веза механизма значајно се помаже при смањивању масе машине. Пример за ово је елиминација укрсне главе код клипних механизма (сл. 29 а), која је имала улогу да ослободи зидове цилиндра од од бочних сила изазваних нагињањем клипњаче током ротације радилице. Доказано је да функција укрсне главе може бити испуњена и од стране клипа (сл. 29 б), ако се његова висина повећа и подмазивање буде боље. Висина укупног клипног механизма је тада смањена за готово половину, захваљујући елиминисању укрсне главе.

Механизам дизајниран као што је приказано на слици (сл. 30 б) ради тако што брегаста осовина активира клацкалицу преко подизача. У неким случајева рационалније је пустити да брегаста осовина директно утиче на клацкалицу и тако је помера . Осим мањег броја елемената, и мање укупне величине ова шема омогућује да силе делују ближе. У првој верзији силе су уравнотежене преко кућишта у делу h , што значи да кућиште мора да буде довољно снажно да издржи оптерећење. У другој верзији дужина h_1 је много мања што омогућава даље смањење масе.

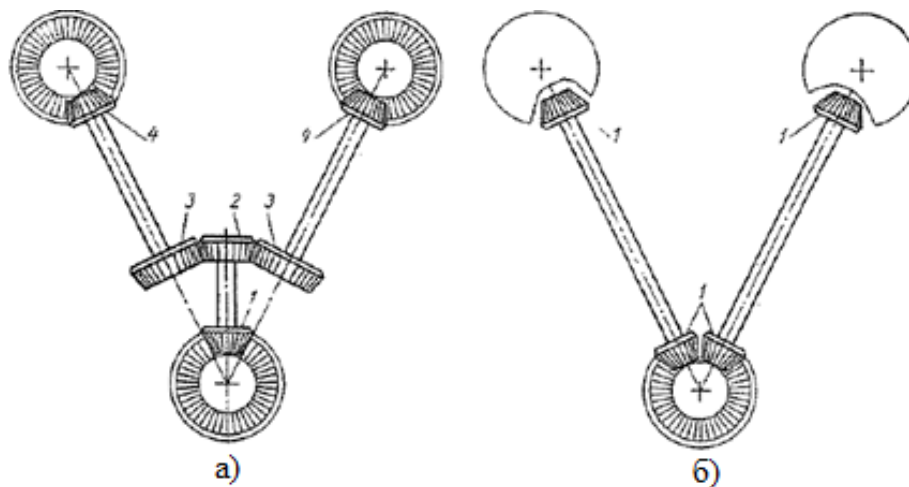


Слика 29 - Елиминација сувишних веза у клипном механизму



Слика 30 - Елиминација сувишних веза код брегастих погона (осовина)

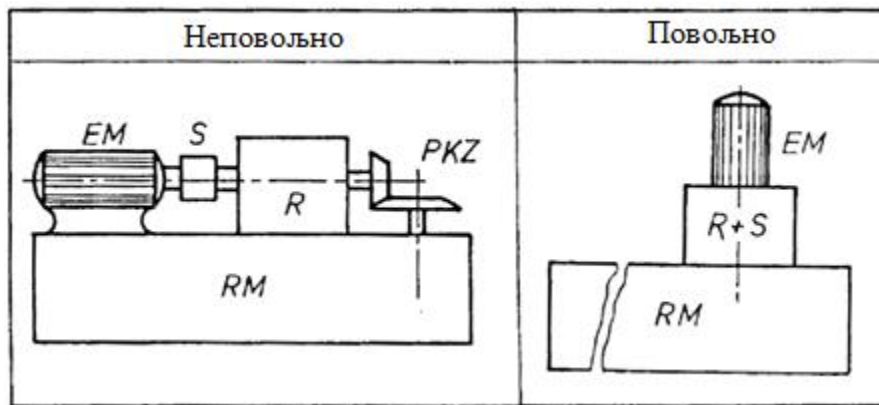
Код угаоних механизма два вратила можемо повезати преко система конусних зупчаника (сл. 31) елиминација сувишних чланова ће умањити тежину конструкције и смањити број типова зипчаника, што појефтињује механизам, са 4 (сл. 31 а) на 1 (сл. 31 б).



Слика 31 - Елиминација сувишних делова код угаоних погона

4.6.2. Смањење масе конструкције применом рационалног размештаја делова

Погон се добија од електромотора ЕМ и преноси преко спојнице S, редуктора R и пара коничних зупчаника PKZ до радне машине RM. Усавршавање се састоји у измени положаја агрегата и ослањању пара коничних зупчаника (сл. 32).



Слика 32 - Усавршавање конструкционе шеме

5

Избор материјала

Као што смо раније нагласили (у одељку 2.3), избор материјала за израду машинских делова веома је важан задатак конструктора при рационалном конструисању. Самим избором материјала конструктор утиче на тежину машинског елемента или конструкције. Да би тај задатак рационалног конструисања био успешан конструктор мора водити рачуна о факторима од којих зависи избор материјала. Основни фактори избора материјала су:

- особине материјала,
- намена материјала,
- начин израде машинског дела за који се бира материјал,
- могућност набавке и залихематеријала и
- цена материјала.

Особине материјала веома су важне за његов избор, неке од њих су: чврстоћа и жилоавост, еластичност и крутост, осетљивост материјала на концентрацију напона, моћ пригушења вибрација, тврдоћа, густина, отпорност на корозију, отпорност на повишене температуре, заваривост и ливкост, динамичка издржљивост, термичка обрадивост, обрадивост пластичном деформацијом и слично.

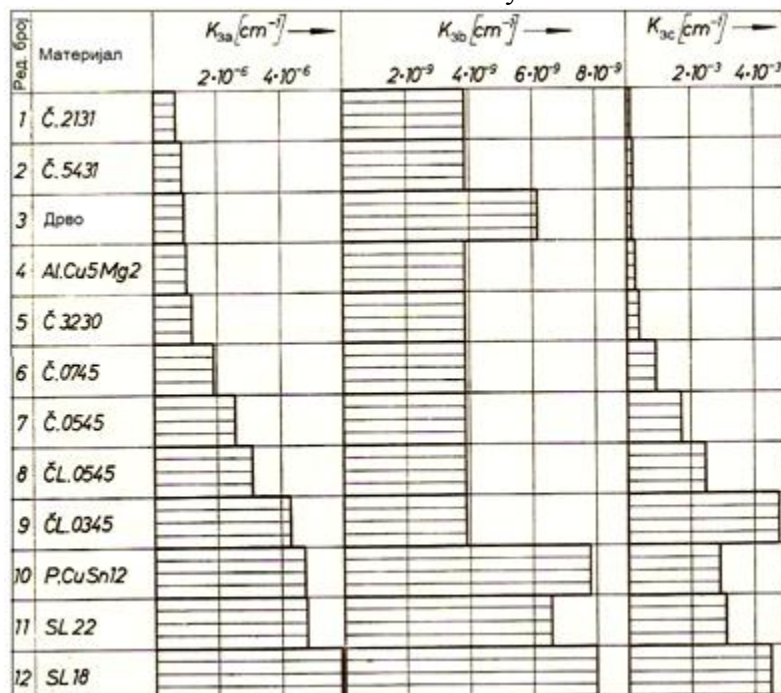
Основна механичка карактеристика материјала је затезна чврстоћа, али треба знати да повећањем затезне чврстоће обично долази до смањења жилавости материјала, тако да при мањим деформацијама долази до лома.

5.1. Карактеристике материјала за различита напрезања

За различите врсте напрезања и у различитим условима користе се и различити материјали.

5.1.1. Затезање

У табели (таб. 9) приказан је дијаграм величина фактора K_3 за неколико врста материјала намењених елементима изложени затезању.



Табела 9 - Зависност фактора материјала K_3 , односно тежина елемената изложених затезању, од изабране врсте материјала

У оквиру критеријума чврстоће (критеријум "а") дати су фактори материјала K_{3a} растућим низом. За челик високе границе развлачења, за легуру алуминијума и за дрво незнатно се разликују величине фактора K_{3a} ; то значи да су елементи од тих врста материјала приближно једнаке тежине под једнаким осталим условима (профил, ослањање, облик), и да су, према ранг листи за K_{3a} , лакши од елемената прављених од других врста материјала, који су наведени у прегледу. Ипак је челик велике чврстоће "најлакши"; у прегледу под редним бројем 1, налази се челик за опруге са $\sigma_F \approx 1100 MPa$, а најјаче врсте челика имају границе развлачења и веће од $1100 MPa$. Ливено гвожђе је на последњем месту; оно је "најтеже" између наведених материјала. Међутим, не треба заборавити да сиви лив има знатно већу чврстоћу при притиску него при затезању, па би на пример за две поменуте врсте сивог лива, када је у питању напрезање на притисак, фактор K_{3a} износио:

- за SL 18 $K_{3a} = 1,6 \cdot 10^{-6} cm^{-1}$
- за SL 22 $K_{3a} = 1,35 \cdot 10^{-6} cm^{-1}$

односно, сиви лив био би у области притиска изједначен са чеником или челичним ливом средње чврстоће.

Када је меродаван критеријум крутости (критеријум "b"), равноправне су све врсте челика и легура алуминијума, и са таквим материјалаом могу се постићи најмање тежине

елемената. Према томе, повољнији је челик мале чврстоће пошто је јефтинији. Сиви лив и бронза су најмање погодни.

Када је меродаван критеријум деформационог рада (критеријум "с"), поредак фактора материјала K_{3c} по величини се разликује од претходна два случаја. И овде су најлакши елементи од челика високе границе развлачења, од легура алуминијума и од дрвета, и приближно једнаки с' обзиром на тежину. Смањивање тежине елемената не може се постићи применом сивог лива, бронзе или челичног лива мале затезне чврстоће.

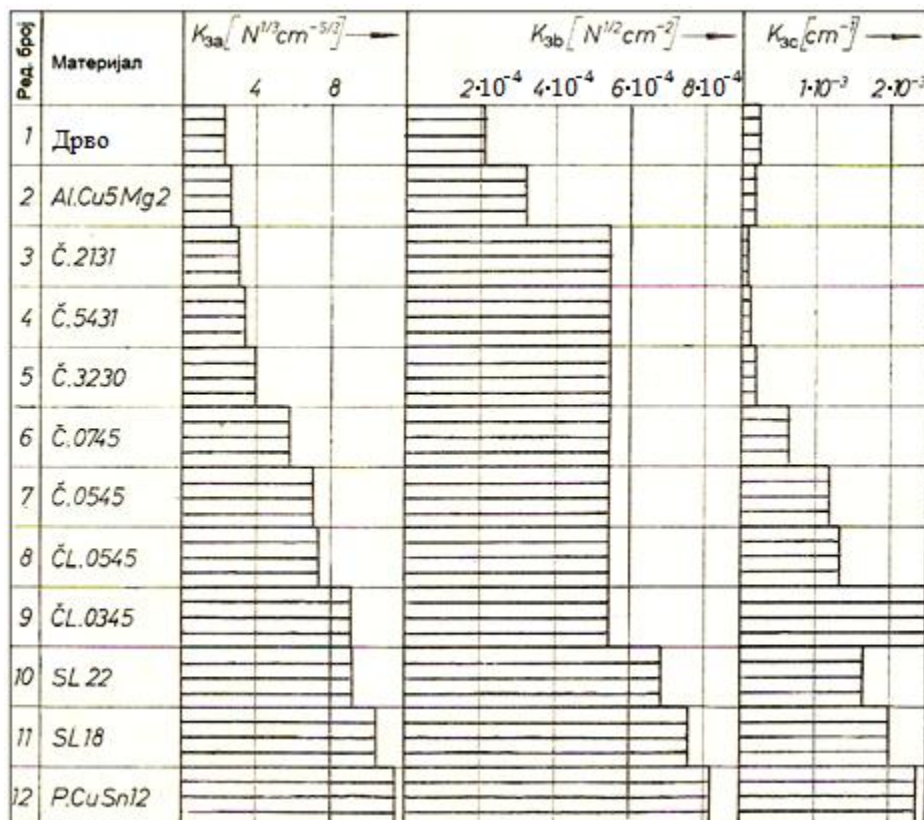
5.1.2. Савијање

У табели (таб. 10) приказан је степенести дијаграм фактора K_{3a} , по величини порђани, за елементе изложене савијању.

У оквиру критеријума чврстоће (критеријум "а") најлакши су челици високе границе развлачења, од легура алуминијума и од дрвета, а најтежи бронзе, сивог лива, челичног лива и челика мале чврстоће.

Када је меродаван критеријум крутости (критеријум "b") најповољнији материјал је дрво и легура алуминијума. Сви челици у овом случају су једнаки, па је најбоља солуција изабрати слабији челик јер је јефтинији. Бронза и сиви лив и овде су најнепогоднију материјали с' обзиром на тежину елемента.

У оквиру критеријума деформације рада (критеријум "с"), најповољнији материјал у погледу тежине је челик високе границе развлачења, а и легуре алуминијума и дрво не заостају.



Табела 10 - Зависност фактора материјала K_3 , односно тежина елемената изложених савијању, од изабране врсте материјала

5.1.3. Увијање

Фактор материјала K_3 за елементе изложене увијању има сличне вредности као и претходни случај (савијање).

5.1.4. Извијање

Пошто је за случај извијања фактор материјала $K_3 = \rho/E^{1/2}$, дакле истоветан са фактором материјала за случај савијања, па закључци донесени о елементима изложеним савијању и овде остају на снази.

5.2. Легирани челици

За одговорне делове конструкције најширу примену имају различите врсте челика. На основне особине челика може се утицати променом хемојског састава и применом одговарајуће термичке и механичке обраде. Како поједини легирајући хемијски елементи утичу на неке од особина челика важних за конструјатора дато је у табели (таб. 11). Намена и примена појединих врста челика широко је обрађена у приручницима и стандардима о материјалима. Главна тенденција у развоју челика је у налажењу начина повећања његове чврстоће, јер се он користи за одговорне делове. Данас се легирањем и адекватном механичком обрадом челика може се повећати његова чврстоћа и до 2000 Мра, у специјалном случајевима и до 3000 Мра.

Особина челика	Легирајући хемијски елементи									
	C	Si	Mn	Ni	Cr	W	V	Mo	Co	Ti
Затезна чврстоћа	++	+	++	+	++	+	+	++	+	+
Тврдоћа	++	+	++	+	++	+	+	++		+
Жилавост	-			+	++	+	+	+		+
Еластичност	+	++	+		+		+	+		+
Ковност	-		+	+			+	+		+
Заваривост	-		+	+			+	+		+
Обрадивост резањем	-	-	+				+	+		
Ударна отпорност	+		+	+	+	+	+	+	+	+
Тврдоћа на повишеним темп.	+	-	-					+		
Магнетичност		-		-	+	++			+	
Легенда: (++) јако појачава особину; (+) појачава особину; (-) умањује особину; () не утиче на особину										

Табела 11 - Утицај легирајућих елемената на особине челика

5.3. Лаки метали

Лаки метали, легуре од алуминијума или магнезијума као главним састојцима, употребљавају се због своје специфичне масе, наручито у лаким конструкцијама, а у последње време све више и у општим машинским конструкцијама. Примењују се за израду: кућишта и склопова машина, полуга маеханизма, елемената мотора са унутрашњим сагоревањем, моторних возила и авиона.

Од обојених лаких метала највише се користе бакарне и алуминијумске легура. У бакарне легуре спадају: месинг, калајне бронзе, алуминијумске бронзе. Месинг се користи за арматуре, окове, чауре, делове вентила, опруге, ваљане вијке и хладњаке. Калајна бронза се примењује за аксијална лежишта, вођице, клизна лежишта, венце пужних точкова, навртке завојних вретена, вијке и опруге. Од алуминијумске бронзе израђују се делови изложени јакој корозији, пужни зупчаници, резервоари, водови, клипњаче и вратила. Алуминијумске легуре користе се за танкозидне одливке, моторе, клипове мотора и друге делове у авијацији, бродоградњи и хемијској и прехранбеној индустрији.

5.3.1 Алуминијумске легуре

Алуминијумске легуре су најшире коришћене легуре. Карактеришу их њихова мала специфична маса и висока проводљивост топлоте, задовољавајућа снага и пластичност, јер су лако остварљиви машинским путем. Многе од њих се могу заваривати коришћењем аргонског лука, када се користе нетопљиве електроде волфрама или путем гасног заваривања водоником, у заштити гасова LiCl , NaCl , KCl , KF . Танки и лимени делови алуминијума електро-отпорно се заварују. У природним условима производње и складиштења, алуминијум и његове легуре се превлаче слојем оксида (Al_2O_3) који их штити од корозије. Ако оксидни слој при заваривању није разорен електричним луком или растворен топитељем, настају грешке заваривања. Доспевши у шав завареног дела заробљени оксиди доводе до снижења опште корозионе постојаности и чврстоће заварених спојева алуминијума и његових легура.

Алуминијумске легуре одолевају корозији у сувим окружењима, отпорне су на утицај база и слабих киселинских раствора, али кородирају у влажним срединама (наручито на моском ваздуху) и неотпорне су на утицај јаких киселина, тада су меке (тврдоћа варира између 60-130 ВН)

Јачина алуминијумских легура убрзано опада са порастом температуре. Иначе, постоје неке легуре алуминијума које задржавају механичке особине и до 250-300°C.

Легуре алуминијума се деле на легуре за гнечење (добијене ковањем, штанцањем и ваљањем) и легуре за ливење. Легуре за гнечење се даље деле на оне које се термички не обрађују и на оне које се термички обрађују. Алуминијумске легуре за гнечење осетљиве су на концентрацију напона, утолико осетљивије уколико им је структура финија. Алуминијумске легуре за ливење знатно су мање остљиве на концентрацију напона, али им је и издржљивост знатно мања.

Легуре Al за гнечење које се термички не обрађују не одликују се високом чврстоћом, али су им пластична својства веома добра. У ову групу легура спадају легуре Al са Mg , чији се садржај креће од 1% до највише 5,8% и Mn , чији је садржај 0,6%. Имају

добру заварљивост, отпорне су према корозији и употребљавају се за израду слабооптерећених делова, за израду пресованих и дубоко извлачених производа, као и за заварене конструкције.

Легуре *Al* за гнечење које се термички обрађују. У ову групу спадају легуре *Al* са *Cu*, *Mg*, *Si*, *Zn* и *Li* (таб. 12). Ова група легура постиже висок ниво механичких својстава тек после одговарајућих термичких обрада.

Легуре	Назив	Ознака	Особине	Примена
Al–Cu–Mg	Дурали	AlCu3Mg AlCu5Mg1 AlCu5Mg2	Rm < 470 МПа 110 НВ А < 17%	За напрегнуте и јако напрегнуте конструкције
Al –Mg–Si	Авиали	AlMgSi	Rm < 330 МПа А < 12%	За средње напрегнуте конструкције, у бродоградњи
Al–Zn–Mg		AlZn5Mg3Cu1	Rm < 520 МПа А < 12,5%	Авио индустрија, грађевинарство, нису корозионо отпорне

Табела 12 - Основне карактеристике легура *Al* за гнечење које се термички обрађују

Дуралуминијум, легура *Al* са *Cu* и *Mg*, има смањену корозиону постојаност, због чега се допунски легира *Mn* (до 0,9 %). Делови од дуралуминијума могу да се заштите од корозије плакирањем чистим *Al*. Штетна примеса је гвожђе зато што смањује чврстоћу и пластичност. Добро се пластично деформише у топлом и у хладном стању. Особине дурала се значајно побољшавају каљењем и старењем.

Авиали имају нижу чврстоћу од дурала, али су им својства пластичности у топлом и хладном стању боља. Користе се за израду лаких конструкција, цеви и шипки.

Легуре *Al* за ливење су бројне и могу се поделити у пет основних група:

f I групу легура чине легуре *Al* са *Si*, познате под именом силумини;

f II групу легура чине легуре *Al* са *Si* и *Cu*;

f III групу легура чине легуре *Al* са *Cu*;

f IV групу легура чине легуре *Al* са *Mg*; са високим механичким својствима и отпорношћу прека корозији; користи се за израду лаких одливака за транспортне машине;

f V групу легура чине легуре *Al* са другим компонентама у које поред набројаних спадају и *Ni*, *Zn* и *Ti*.

Најпознатије легуре *Al* за ливење су силумини, легуре *Al* са *Si* које су нашле велику примену у аутомобилској и авио индустрији. Одликују се добром течљивошћу, отпорне су на дејство корозије, имају задовољавајуће механичке особине и добро се заварују.

Употреба алуминијумских легура пружа значајна смањења у тежини конструкције.

5.3.2. Магнезијумске легуре

Магнезијумске легуре састоје се од Mg (90% или више) и легирајућих елемената Al, Zn, Mn, Ti и др. Карактерише их мања чврстоћа (до $\sigma_M = 300 \text{ MPa}$) и мања издржљивост (до $\sigma_{wf} = 150 \text{ MPa}$) од алуминијумских легура, али и мања специфична маса. Најгора мана магнезијумских легура је њихова слаба отпорност на корозију, наручито у влажним атмосферама. Тако да сви делови од легуре магнезијума би требало да буду адекватно заштићени од корозије. Најлакши начин да се спречи корозија магнезијума је заштита превлачењем, чиме се спречава директан контактоснове и околине. Повећање корозионе отпорности магнезијума и Mg легура могуће је постићи на више начина: електрохемијским поступцима превлачења, наношењем конверзионих превлака, анодизацијом, гасно-фазном депозиционим процесима, ласерско површинским легирањем, наношењем огранских превлака или наношењем других врста превлака, алтернативним поступцима.

Магнезијумске легуре се користе за мање битне делове (футроле, навлаке, поклопце мотора...). Ипак, у појединим случајевима, ове легуре се користе за производњу битних кућишта. Коване магнезијумске легуре се често користе за делове подложне центрифугалним оптерећењима.

Мане магнезијумских легура, наручито њихова слаба отпорност на корозију, ограничава њихову употребу у случајевима када је главни фактор уштеда масе.

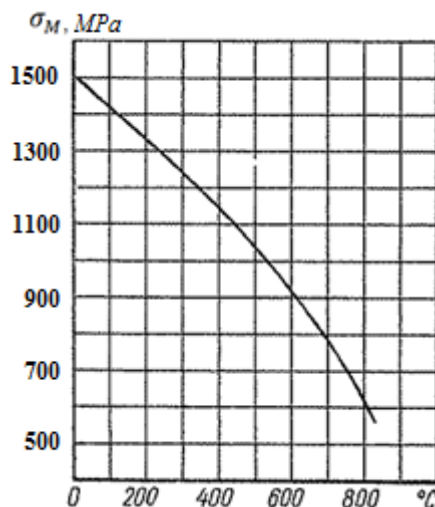
5.3.3. Лаке легуре са титанијумом

Лаке легуре са титанијумом (Ti) као главним састојком, сразмерно су скупе. Главне предности титанијумских легура су комбинација велике чврстоће до $\sigma_M = 1200 \text{ MPa}$ са малом специфичном тежином ($\sim 4,5 \text{ g/cm}^3$), издржљивости до $\sigma_{wf} = 600 \text{ MPa}$ и отпорност на високу топлоту и корозију.

Чврстоћа титанијумских легура је чак већа од челичних легура, њихови антикорозивни квалитети су такође бољи од нерђајућег челика. Поседују изврсне карактеристике при удару и ковању. Ове легуре се теже обрађују резањем од челичних, па захтевају квалитетније и боље алате за обраду. Треба нагласити да се под условима сечења, при великим брзинама титанијумски делови могу запалити и да је прах који настаје приликом резања експлозиван.

Тешко је и лити титанијумске легуре због високе хемијске реакције овог метала, и због његовог лаког мешања са материјалима од којих је начињен калуп за ливење, као и због гасова који се јављају током ливења.

Титанијумске легуре се веома користе у ваздухопловној и ракетној индустрији, када је комбинација велике чврстоће и мале специфичне масе материјала значајна. Ове легуре су неопходне за производњу делова који се подвргавају великим инерцијалним оптерећењима, наручито, за роторе који се крећу великом брзином у којима су напони директно пропорционални специфичној тежини материјала.



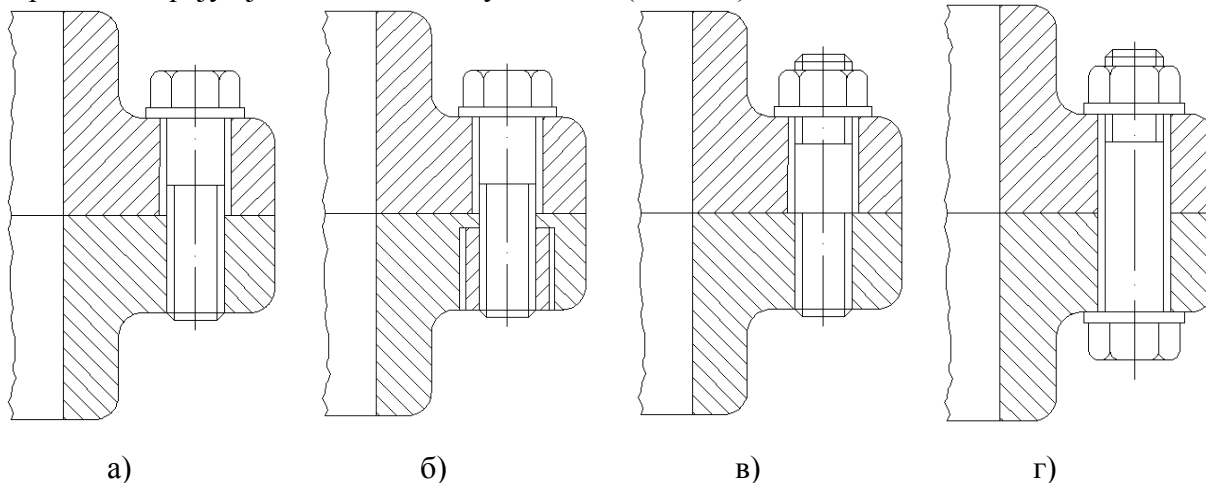
Слика 33 - Затезна чврстоћа легуре титанијума (Т₁₂) у односу на температуру

Висока отпорност на топлоту (сл. 33) и стабилност од корозије чине титанијумске легуре погодним за производњу делова који раде при високим температурама и оптерећењима (лопатице гасних турбина). Титанијумова добра отпорност на корозију омогућује његову употребу у хемијској индустрији.

5.4. Нарочите одлике делова сачињених од лаких

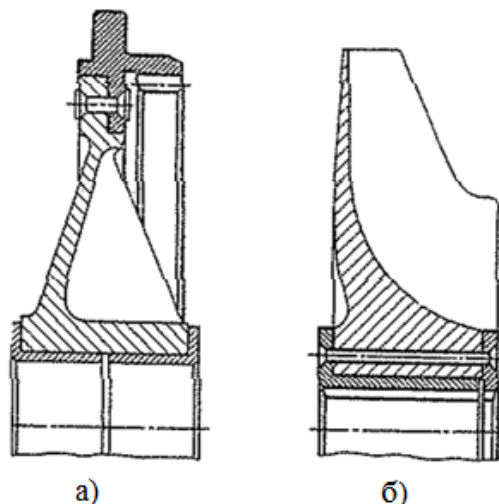
Приликом производње делова од алуминијума и магнезијума неопходно је узети у обзир њихове карактеристике. Тако да је могуће надокнадити слабу чврстоћу и крутост ових легура повећањем њихових попречних пресека, а још боље усвајањем погодних облика конструкције и додавањем ребара за ојачање.

Мекоћа и мала затезна чврстоћа лаких легура забрањују употребу навојних завртњева (сл. 34 а). Уколико ово буде неопходно због неких дизајнерских разлога, тада се отвори за завртњеве морају ојачати челичним уметцима (сл. 34 б).



Слика 34 - Повезивање делова лаких легура

Најбољи причвршћивачи су усадни завртњи (сл. 34 в) или навртка (сл. 34 г) са великим подлошкама постављених између главе завртња и/или навртња и површине дела, иначе би се потпорне површине урушили и излизале чим би се навртка боље затегла.



Слика 35 - Сложене структуре (центрифугални компресор)

Уколико део мора имати одређене квалитете (велика тврдоћа, отпорност на хабање итд.), коју му лаке легуре не могу обезбедити, тада се, да би се део могао употребити, прави од сложених конструкција. Нерадна површина дела може бити начињена од лаке легуре и правилно повезана са оперативним површинама које су произведене од материјала са потребним квалитетима (сл. 35). Слика (сл. 35 а) представља сложену конструкцију чије је тело сачињено од лаких легура, док су обод и унутрашњи погон преносника од ојачаног челика. Обод је закован за тело конструкције. На слици (сл. 35 б) је представљен ротор центрифугалног компресора сачињен од алуминијумске легуре; покретач је ојачан челичним делом, који има унутрашње савитљиве шипке за управљање.

5.5. Неметали

Пластичне масе се све више користе у машинству због своје мале масе, добре изолације струје, лаког обликовања и јефтинији су од метала. Пластичне масе мале затезне чврстоће до 50 Мпа и примењују се за слабо оптерећена места као што су ручице, замајци и слично. Пластичне масе средње чврстоће од 50 до 100 Мпа се користе за израду антифрикционих делова, делова зупчастих пумпи, папуча за кочнице и сл. Армирањем стакленим влакнима затезна чврстоћа се може довести и до 400 Мпа и користе се у градњи каросерија, чамаца, вагонета и сл. Све више се у машинству, лакоградњи, због своје велике чврстоће, а мале масе, користе композитни материјали чија је база пластична маса, док у себи имају уграђена влакна од специјалних метеријала.

5.6. Сумирање утисака у вези избора материјала

Закључак је да се смањивање масе елемената, путем избора материјала, може постићи углавном, или применом челика велике чврстоће или применом лаких легура. Према томе лаке легуре се могу, с' обзиром на материјал, поделити на две основне групе: на лаке конструкције од челика и на лаке конструкције од лаких метала.

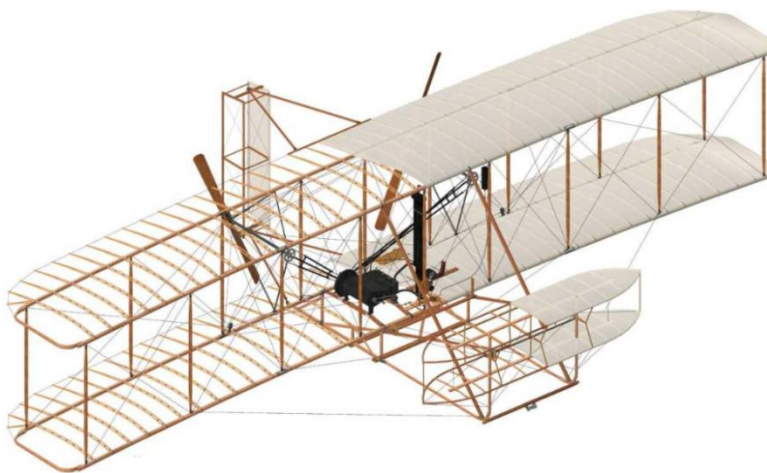
При одлучивању о избору материјала који ћемо користити треба водити рачуна цени и о особинама материјала, односно о томе да, у одређеним приликама, одлике изабраног материјала дођу до пуног изражаја, а да недостаци не буду утицајни. Тако, на пример, одличан челик се тешко обрађује и осетљив је на концентрацију напона, а лаки метали се знатно боље шире на вишим температурама, имају малу тврдоћу, а елементи од лакух метала имају углавном већу запремину од челичних елемената.

Треба напоменути да се лаке конструкције могу комбиновати од елемената од челика, од лаких метала и од ваштачког пластичног материјала. У таквим комбинацијама потребно је да се при конструисању склопова има у виду разлика у физичким особинама материјала (механичка и топлотна истегљивост, тврдоћа, заваривост итд.)

5.7. Занимљивости лаких метала

Алуминијум је после гвожђа највише коришћени метал на свету. Неуобичајна комбинација добрих особина, као што су мала специфична маса, чврстоћа и отпорност на корозију, чине га, за разлику од других метала, незаменљивим за велики број производа.

Модерна комерцијална авио индустрија вероватно не би успела без алуминијума. Први авион браће Рајт (сл. 36) који је полетео 1903. год. имао је четвороцилиндрични аутомобилски мотор модификован са алуминијумским блоком у циљу смањења масе летилице.



Слика 36 - Модел првог авиона браће Рајт

Алуминијум је постепено замењивао дрво, челик, и друге материјале за делове авиона, тако да је већ 1920. год. направљен први авион од алуминијума. Од тада, авиони свих врста и величина израђују се углавном од алуминијума. Стандардни Боинг (Boeing) 747, џамбо џет садржи око 75 000 кг. алуминијума (сл. 37). Чврсте алуминијумске легуре од којих је израђена оплата авиона могу издржати екстремна оптерећења при летовима на

великим висинама, а такође је велики број унутрашње опреме летилице израђена од алуминијума и Al-легура, уз знатна смањења масе.



Слика 37 - Боинг (Boeing) 747, џамбо џет

Употреба алуминијума у аутомобилској индустрији је у последњој деценији направила праву револуцију. На пример BMW Roadstar Z8 је израђен од алуминијума (сл. 38). Алуминијумске каросерије, блокови мотора, цилиндри, кућишта, хладњаци, мењача, фелге и други делови у великој мери смањују тежину аутомобила побољшавајући му притом перформансе, а не умањујући му комфор. Са сваким колиграмом алуминијума који замењује друге теже материјале у возилу, током његовог радног века смањи се емисија угљен-диоксида за око 20 кг. Осим тога алуминијум смањује буку и вибрације и апсоргује кинетичку енергију, тако да при судару највећи део енергије не "приме" путници већ структура аутомобила.



Слика 38 - BMW Roadstar Z8

Око 90% камионских приколица и контејнера израђено је од алуминијумских лимова и профила. Алуминијум не кородира као челик, а такође не реагује са највећим

бројем уобичајних материјала у транспорту, као што су угаљ, различите хемикалије и храна. Заменом класичне камионске платформе од челика и дрвета, која тежи 1 900 кг. алуминијумским профилима, укупна маса камиона се смањи за око 900 кг. То значи да се за толико повећала носивост камиона, или са друге стране отворена је могућност за уштеду 6 000 литара горива и смањење угљен-диоксида за око 20 000 кг. током радног века камиона.

Код путничких аутомобила је само на замени челичне каросерије алуминијумом могуће смањити тежину за око 45%. Ауди је поносам на свој модел А8 израђен од алуминијума који је према извештају обављеном у Wall Street Journal-у октобра 1999.год. проглашен најбезбеднијим аутомобилом (сл. 39).



Слика 39 - Audi A8

Аеродинамично обликовани возови израђени од лаких и издржљивих алуминијумских легура (сл. 40) постижу брзине од око 300 km/h уз оптимално комбиновање комфора, сигурности и потрошње енергије. Тако да на пример путничка кола јапанског "bullet train"- а су за око 25% лакша од конвенционалних.



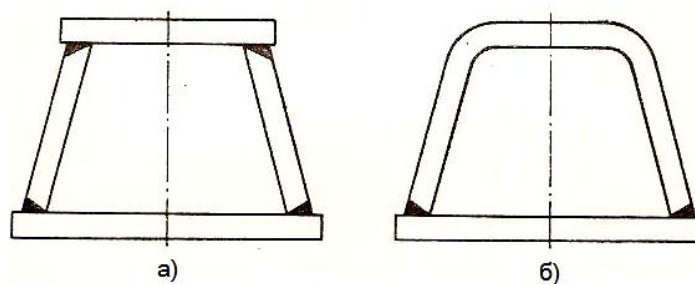
Слика 40 - Јапански воз, "bullet train"

6

Методе израде лаких конструкција

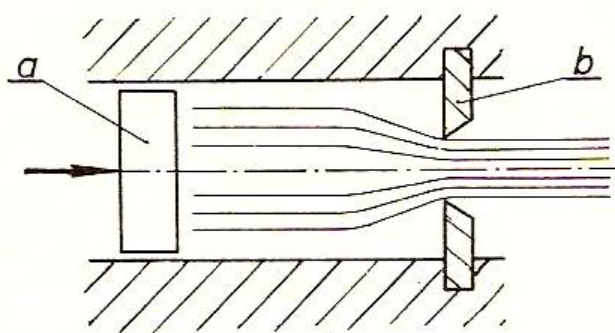
Облици и профили, намењени лаким конструкцијама, израђују се најчешће заваривањем и механичким деформисањем материјала: пресовањем, ваљањем, просецањем, истискивањем, извлачењем, савијањем. Каква ће се метода израде употребити зависи углавном од материјала, облика и броја примерака.

На слици (сл. 41) приказане су две методе израде истог профила: само заваривањем (сл. 41 а) и комбинација савијања и заваривања (сл. 41 б); примена друге варијанте је умеснија када је у питању израда већег броја примерака профила.

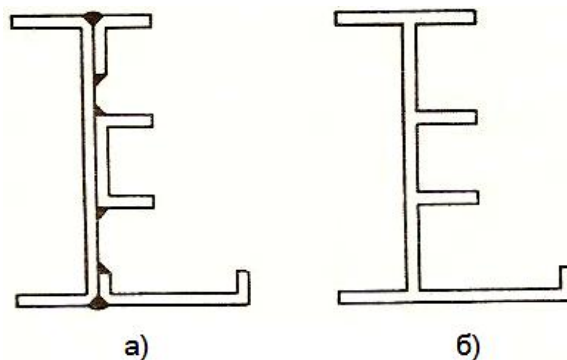


Слика 41 - Профил израђен заваривањем а) или савијањем и заваривањем б)

Веома је добар поступак (сл. 42), према коме се растопљена алуминијумска легура истискује кроз профилисан отвор да би се добио жељени облик профила. Материјал из растопљеног стања прелази у гњечено, са позитивним особинама, на пример без шупљина. Тако се, уместо облика од више делова (сл. 43 а), могу створити једноделни облици (сл. 43 б) жељених особина које задовољавају одређене услове: правилност тока напонских линија, повећана носивост, подобност за склапање итд.

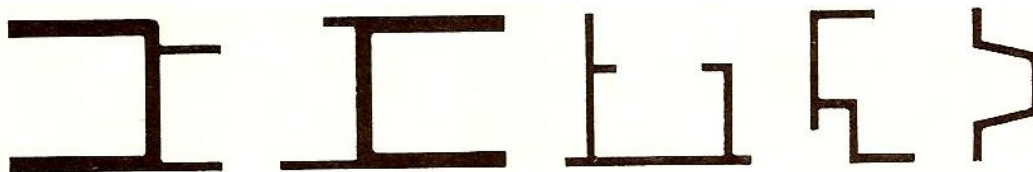


Слика 42 - Уређај за истискивање растопљене легуре кроз профилисани калуп b (a – клип)



Слика 43 - Профил а) израђен заваривањем засебних елемената; исти профил б) израђен по поступку према сл. 38

У градњи лаких железничких моторних кола користе се управо профили направљени описаним поступком истискивања материјала (сл. 44).



Слика 44 - Неколико облика профила израђених по поступку према сл. 38

6.1. Конструисање лаких одливака

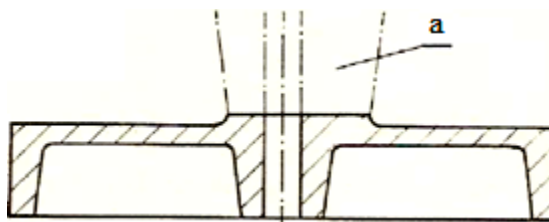
При завршавању ливења (температура материјала око 20°) долази до скупљања материјала. Као последица скупљања растопљеног материјала појављују се шупљине у унутрашњости материјала, прсине у спољашњим слојевима, напони и деформације одловака.

Због скупљања одливака, при хлађењу мора се избегавати свако нагомилавање материјала, наручито обратити пажњу на уједначеност величине пресека, као и на постепеност прелаза између зидова неједнаких дебљина. Зато је, ради постизања потребне отпорности одливка и смањења масе, боље употребити ребра за појачање зидова него повећавати дебљину зидова, па је облик (сл. 45 а) десно, боље решење од облика лево (сл. 45 б). Уопште су повољнији тањи пресеци, на пример, облика Т, I, L, од пуних квадратних или кружних попречних пресека, због повољнијег распореда маса.



Слика 45 - Ребрасти облик има знатно повољнији облик од облика са дебелим зидовима

Такође у олакшавању одливка помаже и конструисање масивне "лажне главе" (сл.42), јер повећава отпорност одливка. У том смислу, варијанта на десној страни је боље решење од варијанте на левој страни (сл.46).



Слика 46 - Облик одливка, на десној половини слике, омогућав да се примени масивнија лажна глава него што то допушта облик на левој страни (а-контура лажне главе)

6.1.1 Одливци од лакких метала

Лаки метали имају мали модул еластичности, па се под утицајем напона од скупљања растопљеног материјала могу у одливцима појавити значајне деформације. Према томе и у овом случају треба избегавати нагомилавање материјала и неуједначене масе пресека, а уместо дебелих зидова предвиђати тање са ебрима за укрућење (сл.8,21).

Најмања дебљина зидова одливка од лакких метала је 3mm (изузетно 2mm), а најповољније дебљине су $4 \div 10$ mm.

6.2. Заваривање лакких конструкција

Заварене конструкције се праве од једноставних, стандардних полупроизвода: лимова, профилисаног челика, шипки па и од отпадака. Технолошки процес заваривања је једноставан, па су стога заварене конструкције сразмерно јефтине.

Заварени делови су лакши од ливених, нарочито када је у питању затезање, због мале чврстоће и издржљивости силвог лива и због ограничене минималне дебљине зидова одливка.

Заварене конструкције су јефтиније и лакше и од закованих.

Готову заварену конструкцију могуће је по потреби, на једноставан начин, појачати, или јој додати нове елементе ради проширења функција и ради ојачања, или је оправити ако се поломи.

Закључак

На основу детаљног описа олакшаних конструкција у овом раду, може се доћи до неколико закључака. Олакшане конструкције се све више користе како у машинству тако и у другим областима, због тога све више обраћа пажња на њих и све више се развијају и усавршавају. Могу се остварити различитим начинима, као што је и описано у раду. Савремено машинство тежи конструкцијама што мање масе, па су олакшане конструкције ту веома задовољавајуће. Олакшањем машинске конструкције која врши неки рад постижу се бољи услови у експлатацији, с' друге стране машинске конструкције које су непокретне олакшаним конструкцијама добијају мању тежину и економичније су. При олакшању конструкција променом облика мора се водити рачуна о унутрашњим напонима, тада је корисно вршити конструкциона олакшања делова на местима где се очекују напони смањеног интензитета. Конструкцијска олакшања се врше на машинским деловима као што су зупчаник, диск, обод, стезни склоп, вијак и чаура, итд.

Применом олакшања уз смањење масе конструкције долази и до уштеде материјала што је веома важно у економском смислу.

У раду су дати и фактори утицаја на масу конструкције, као што су: утицај општих услова, утицај профила, утицај материјала, које смо анализирали и утврдили колико утичу на масу конструкције. Зависно од тога шта се узима као меродавно за прорачун, могу се усвојити три приоритетна критеријума и то: критеријум чврстоће, критеријум крутости и критеријум деформационог рада.

Код машинских конструкција практичне мере за смањење масе, као што је правилан избор конструкционе шеме, су јако корисне, наиме острањењем сувишних делова, применом рационалног размештаја делова и смањењем дужина делова и агрегата значајно се смањује маса машинског система.

Избор материјала веома је важан задатак конструктора при олакшаним машинским конструкцијама. Самим избором материјала конструктор утиче на тежину машинског елемента или конструкције. Да би конструкције била што лакше, а опет са друге стране задовољавајућих механичких карактеристика, конструктор мора водити рачуна о карактеристикама самог материјала, јер за различите врсте напрезања и у различитим условима користе се и различити материјали. За одговорне делове конструкције највише се примењују легирани челици који имају задовољавајуће механичке особине.

Лаким металима најбоље се постижу жељене карактеристике конструкције у погледу маса-механичке карактеристике. Примењују се за израду: кућишта и склопова машина, полуга маеханизма, елемената мотора са унутрашњим сагоревањем, моторних возила и авиона.

Закључак је да се смањивање масе елемената, путем избора материјала, може постићи углавном, или применом челика велике чврстоће или применом лаких легура. При одлучивању о избору материјала који ћемо користити треба водити рачуна цени и о особинама материјала, односно о томе да, у одређеним приликама, одлике изабраног материјала дођу до пуног изражаја, а да недостаци не буду утицајни.

Алминијум као један од лаких метала је после гвожђа највише коришћени метал на свету. Модерна комерцијална авио индустрија вероватно не би успела без алуминијума, он је постепено замењивао дрво, челик, и друге материјале за делове авиона, да би се у садашње време потпуно усталио у изградњу авиона.

Олакшане машинске конструкције израђују се најчешће заваривањем и механичким деформисањем материјала (пресовањем, ваљањем, просецањем, истискивањем, извлачењем, савијањем), тј. избегавањем непотребних делова ко што су закивци и вијци, а све у циљу смањења масе.

Литература

- [1] Јовичић С., Марјановић Н., Основи конструисања, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2011.
- [2] Витас Д., Основи машинских конструкција II, Научна књига, Београд, 1975.
- [3] Орлов П., Основи конструисања (Fundamentals of machine design), Научна књига - машинство, Москва, 1976.
- [4] <http://www.scribd.com/doc/85391079/Otpornost-materijala-KNJIGA-2011>
- [5] <http://www.scribd.com/doc/78263349/12/Tehnika-G-zavarivanja>
- [6] http://www.duzs.org.rs/casopis_files/abstracts/2006/2006-01_abs/13-01-2006.pdf
- [7] http://www.duzs.org.rs/casopis_files/abstracts/2004/1-2004/17-1-2004.pdf
- [8] <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/Obojeni%20metali%20i%20legure.pdf>
- [9] <http://www.turbosquid.com/3d-models/maya-catapult-leonardo-da/642699>
- [10] <http://www.kcstudio.com/selden.html>
- [11] [http://147.91.212.195/ZM/2006\(4\)/ZM_47_4_51.pdf](http://147.91.212.195/ZM/2006(4)/ZM_47_4_51.pdf)
- [12] <http://www.scribd.com/doc/69585032/Masinski-materijali-prezentacija-1>