



## OSNOVNI PRINCIPI I PRAVILA PRIMJENE LAKOG DIZAJNA U MAŠINSTVU

Aleksija Đurić<sup>1</sup>, Biljana Marković<sup>2</sup>, Srđan Pelkić<sup>3</sup>

*Abstrakt: Kroz ovaj rad biće predstavljeni osnovni principi i pravila primjene lakog dizajna pri konstruisanju mašinskih sistema. Takođe, rad će dati odgovore na pitanja koji je cilj i koje su strategije primjene lakog dizajna, koji se to materijali koriste za izradu i kako na pravi način izabrati adekvatne materijale, a da se kao rezultat dobije, ne samo smanjenje težine konstrukcije, nego i da se ona učini ekološki i ekonomski prihvatljivom. Cilj je da se naučnom, nastavnom i privrednom ambijentu približi ova savremena metoda u konstruisanju mašinskih sistema, koja će, u bliskoj budućnosti, predstavljati ključ za opstanak na svjetskom tržištu za sve kompanije iz oblasti mašinske industrije.*

*Ključne riječi: laki dizajn, novi materijali, savremene konstrukcije*

## BASIC PRINCIPLES AND RULES FOR IMPLEMENTATION OF THE LIGHTWEIGHT DESIGN IN MECHANICAL ENGINEERING

*Abstract: Through this paper the basic principles and rules of the implementation of lightweight design in the construction of mechanical systems will be presented. Also, this paper will provide answers to questions about what is the aim and the strategy for implementation of lightweight design, which material to use and how to properly select appropriate materials, in order to reach the result, not only for reducing the weight of the structure, but also to make it more environmentally and economically acceptable. The aim of this paper is to introduce this modern method of construction of mechanical systems to scientific, educational and economic environment, which will be a key to the survival on the world market for all companies in mechanical industry in the near future.*

*Keywords: lightweight design, new materials, modern construction*

### 1. UVOD

Svakodnevni smo svjedoci da firme iz Bosne i Hercegovine, posebno iz oblasti mašinske industrije, teško opstaju na otvorenom svjetskom tržištu. Krivac za to,

<sup>1</sup>Asistent Aleksija Đurić, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, aleksijadjuric@gmail.com

<sup>2</sup>Dr Biljana Marković, vanredni profesor, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, biljamarkovic@yahoo.com

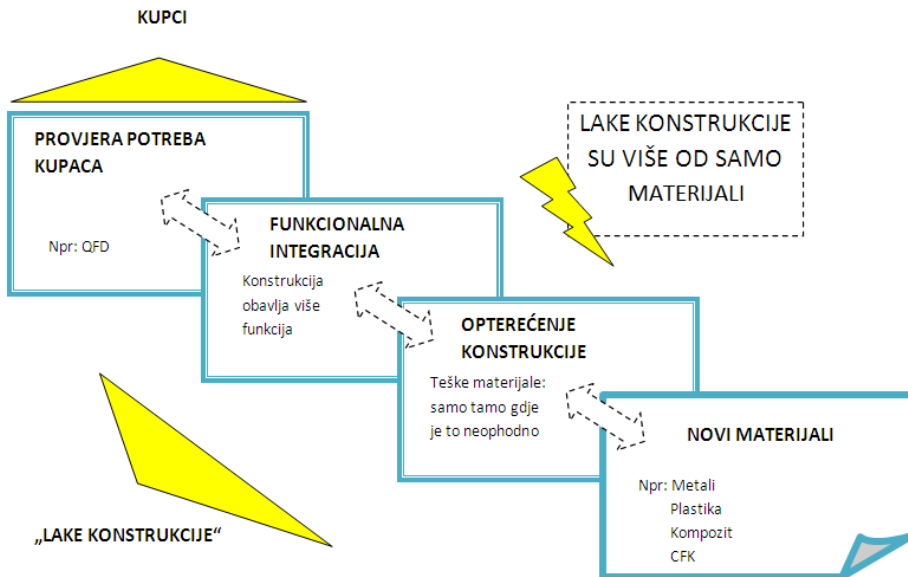
<sup>3</sup>Srđan Pelkić, dipl. inž. maš., Prima IGS Gradiška, pelka1109@hotmail.com

između ostalog, je usporen politički, ekonomski i naučni razvoj ove zemlje. Ako se posmatra razvoj samo mašinske industrije, može se zaključiti, na osnovu dostupnosti literature prije svega, da se u BiH vrlo malo primjenjuju savremene metode razvoja proizvoda, nove tehnologije proizvodnje, održavanja, kontrole, reciklaže, itd. U većini slučajeva, u BiH se još uvijek proizvodnja i razvoj proizvoda odvijaju na način pri kome se ne pridaje značaj očuvanju životne sredine, uštedi energije i svih raspoloživih resursa. Tendencija ove zemlje priključenju Evropskoj uniji, u posljednje vrijeme, doprinijela je poboljšanju nekih segmenata tehnologije proizvodnje, ali to još uvijek nije dovoljno za opstanak kompanija mašinske industrije na tržištu i mogućnost proizvodnje konkurentnih proizvoda.

Laki dizajn (Lightweight) je jedan od savremenih metoda u konstruisanju mašinskih sistema, koja ima za cilj, prvenstveno, smanjenje težine mašinskog sistema, što direktno utiče i na smanjenje korištenja energije i resursa, te očuvanje životne sredine. Ova metoda razvoja proizvoda tek će naći svoju primjenu u BiH i šire, zato je veoma značajno adekvatno pristupiti njenom izučavanju. Kroz sam rad biće predstavljeni osnovni principi primjene, strategija primjene lakog dizajna, kao i savremeni materijali koji se koriste u mašinstvu, a koji tek treba da budu višestruko zastupljeni korištenjem metoda i principa lakog dizajna.

Laki dizajn ili lake konstrukcije (LW) nastaju kao rezultat potrebe za održivim dizajnom i razvojem proizvoda, te radi potrebe za pogodnim izborom materijala. Na taj način se može smanjiti masa, kako pojedinih elemenata, tako i ukupne konstrukcije, te se shodno tome povećati stepen iskorištenja proizvoda. Ovakav način dizajna veliki broj stručnjaka smatra ključnom tehnologijom u pogledu konkurentnosti na svjetskom tržištu u mašingradnji uopšte, a posebno u automobilskoj, vazduhoplovnoj i svemirskoj industriji. Udruživanje i integracija raspoloživih vještina stručnjaka, preduslov je da se osigura ekspanzija lakih konstrukcija, a samim tim i konkurentnost svih zainteresovani strana, kao i efikasan i brz razvoj [1].

Kada se govori o lakom dizajnu, prvo što treba razmatrati su materijali, mada su lake konstrukcije više od adekvatne primjene materijala, što je prikazano slikom 1.



Slika 1. Put do lakih konstrukcije [2]

## **2. DEFINICIJA, OBLAST I TRENDVI PRIMJENE LAKOG DIZAJNA**

Pojam LW (laki dizajn) je definisan kroz promišljanja različitih autora, koji su problemu olakšanja konstrukcija prilazili na različite načine, zavisno od uže oblasti interesovanja i naučnog koncepta, kojim su se bavili [3]. Tako se u literaturi mogu sresti razne definicije.

Laki dizajn ima zadatak da smanji težinu tehničke konstrukcije:

- na način da distribuira opterećenje ravnomjerno i generalno po cijeloj konstrukciji, koristeći dozvoljene napone, kako bi se stvorila mogućnost dobijanja konstrukcije velike čvrstoće i nosivosti (Schapitz, 1968),
- i to na način da ne ugrožava nosivost i druge strukturne funkcije konstrukcije (Wiedermann, 2007).

Laki dizajn je interdisciplinarna nauka koja se zasniva na poznavanju nauke o čvrstoći materijala, računskoj tehnici, karakteristikama materijala uopšte i proizvodnim tehnologijama (Klein, 2007).

Laki dizajn je potpuni konstrukcioni princip (koncept dizajn) koji ima za cilj da smanji težinu, odnosno masu, tehničkog proizvoda (Degischer i Lueftl, 2009).

Laki dizajn je razvojna strategija koja je napravljena da ostvari, u datim graničnim uslovima, potrebe funkcije kroz sistem minimalnih masa. Laki dizajn, generalno nije cilj sam po sebi, već se mora pridržavati i krovnihi ciljeva, odnosno usaglašavanja troškova i koristi (Albers, 2009).

### **2.1 Oblast primjene**

Laki dizajn svoju primjenu u svijetu je našao u različitim oblastima, a neke od njih su [3]:

- Vazduhoplovna i svemirska industrija,
- Sportska (trkačka) vozila,
- Putnička i komercijalna vozila,
- Željeznička vozila,
- Brodogradnja,
- Građevinske konstrukcije,
- Vjetroelektrane,
- Sportska i namjenska industrija
- Automatizacija i robotika,
- Medicinska tehnika,
- Industrija namještaja.

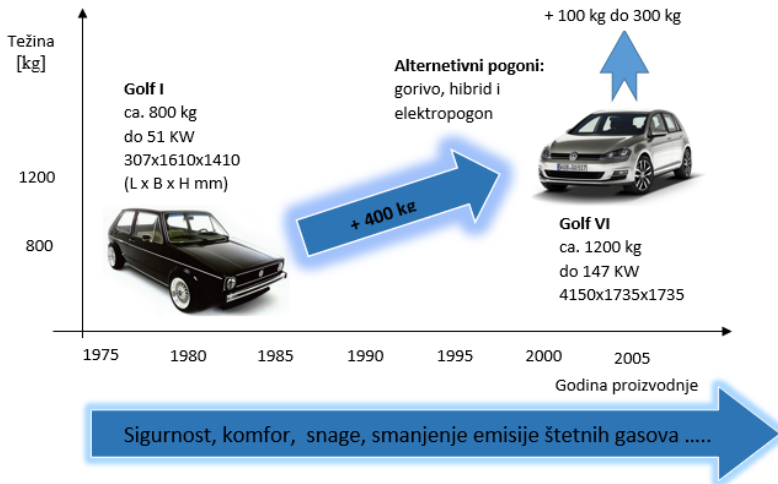
Osnovni motivi za primjenu lakog dizajna su:

- energetska i materijalna efikasnost, radi lakšeg ubrzanja i pokretanja masa,
- optimalno korištenje energije i materijala, uz istovremeno održavanje ekonomskih i ekoloških uslova.

Sami efekti smanjenja težine najprije su u tome što se povećava nosivost i brzina pokretanja masa mašinskog sistema, te smanjuje potrošnja energije i otpor kotrljanju, ubrzanju i penjanju. Laki dizajn se smatra vrlo skupim za određene upotrebe, jer u nekim segmentima zahtjeva primjenu veoma skupih materijala (npr. karbon je duplo lakši od čelika, ali je cijena karbona 5,7 puta veća od cijene čelika).

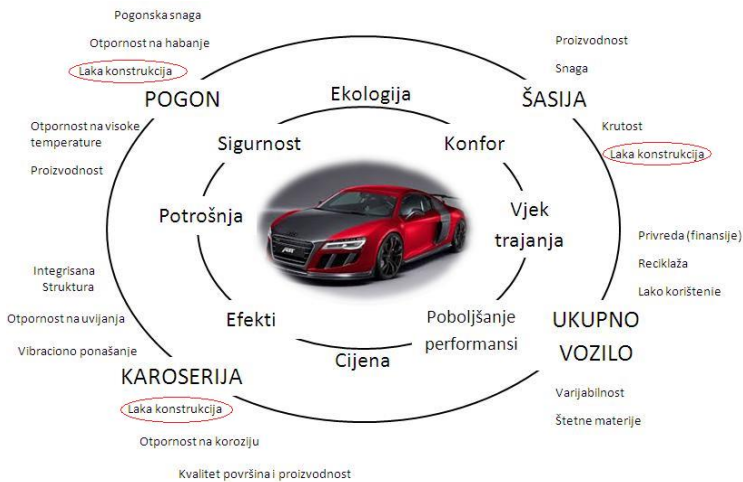
Značaj primjene lakog dizajna u automobilskoj industriji ogleda se u tome što su novije generacije automobila neznatno teže od prvih generacija, a činjenica je da su savremeni automobili sa većim komforom, povećanje sigurnosti, većih dimenzija, zapremine, itd. Na slici 2 prikazano je poređenje težine i ostalih komponenata Golfa I i Golfa IV (VW), gdje se jasno vidi da se težina Golfa VI povećala za 400 kg u odnosu na Golf I. Za sledeće generacije Golfa očekuje se povećanje od 100 do 300 kg,

naravno uz činjenicu da će novije generacije donijeti sa sobom i dosta poboljšanih komponenti i karakteristika.



Slika 2. Poređenje težine i ostalih karakteristika Golfa I i Golfa VI [3]

Ovdje je potrebno naglasiti da automobilska industrija predstavlja reprezentativan primjer primjene lakih konstrukcija. Motivi za primjenu LW dizajna su, najprije, ispunjavanje svih zahtjeva koji se očekuju od vozila novijih generacija. Lake konstrukcije važne su za cijeli automobil, ali je posebno bitna korist u cilju lakog rukovanja, smanjenja potrošnje goriva i za povećanje pokretačke snage. Poznato je da primjena metoda lakog konstruisanja može uticati na masu mašinskih dijelova, kao što su opruge, točkovi, kočioni diskovi i slično. Na slici 3. prikazani su zahtjevi koji se očekuju od novijih vozila, kao i mjesto LW dizajna pri ispunjenju tih zahtjeva. Za sve mjere optimizacije, treba napomenuti da zahtjevi za ispunjenjem bezbjednosti i trajnosti moraju biti beskompromisni.



Slika 3. Zahtjevi koji se očekuju od automobila novije generacije i mjesto lakih konstrukcije u ispunjenju tih zahtjeva [1]

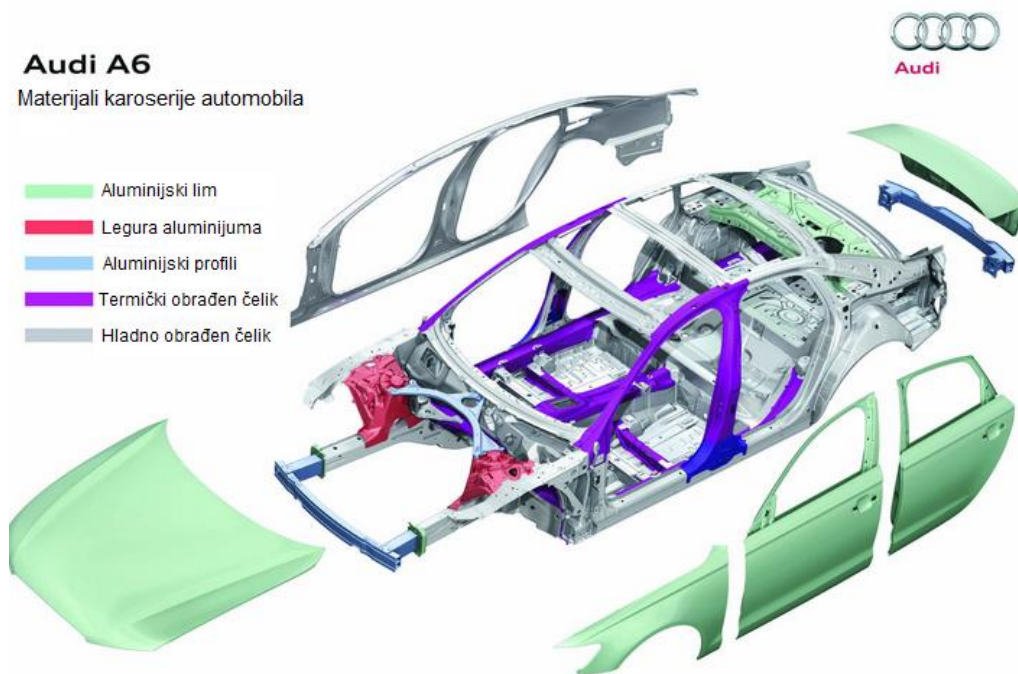
## 2.2 Trendovi u primjeni lakog dizajna

Kada je riječ o trendovima u primjeni lakog dizajna, onda se tu može govoriti o sljedećem:

- Masovna proizvodnja sa uštedama resursa i ekološki kompatibilnim zahtjevima,
- Opterećenje (stres, napon) konstrukcije “prilagođen” osobinama materijala,
- Integralni laki dizajn,
- Multi-materijal dizajn.

Zbog ograničenog prostora u radu će biti samo kratko objašnjen Multi-materijal dizajn. U ovom slučaju, struktura se izrađuje od različitih vrsta materijala kao što su aluminijum, magnezijum, kompozit i čelik, i to nekim od procesa proizvodnje, kao što su kovanje, livenje i presovanje. Adekvatan izbor materijala je neophodan, kako bi se ostvario puni potencijal za lagane konstrukcije, međutim LW dizajn ne uključuje samo izbor materijala i stepen proizvodnje, nego se odnosi i na metode gradnje u ukupnoj strukturi, na nivou sistema.

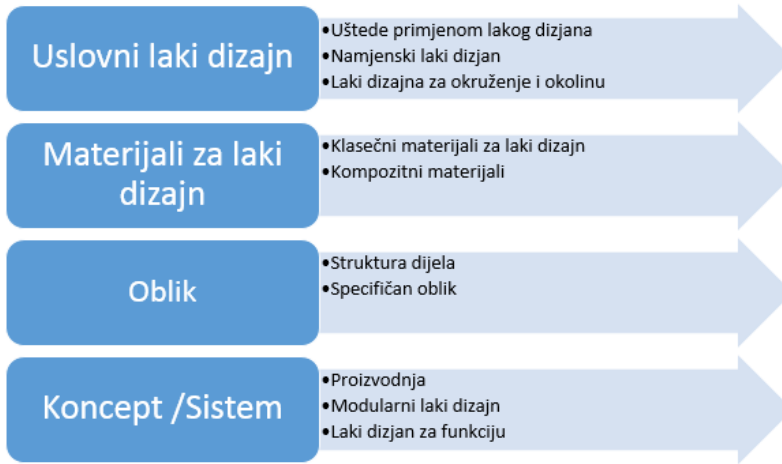
Korištenje različitih materijala zahtijeva korištenje odgovarajućih prikladnih metoda spajanja. Toplotni procesi, poput onih kod zavarivanja i lemljenja, se ne mogu koristiti, pa se najčešće primjenjuju mehaničke metode zakivanja, stezanja, spajanja vijcima ili pak neke hemijske metode, poput lijepljenja. Primjer primjene Multi-materijal dizajna na karoseriji automobila Audi A6 prikazan je na slici 4 [4].



Slika 4. Primjer primjene multi-materil dizajna za izradu karoserije Audiya A6 [4]

### 3. STRATEGIJE LAKOG DIZAJNA

Osnovna strategija lakog dizajna može se podijeliti u 4 osnovne grupe [3], kao što je pokazano slikom 5.



Slika 5. Osnovna strategija lakog dizajna

Objašnjenje prikazanih strategija je dato u nastavku teksta.

Uslovni laki dizajn podrazumijeva:

- Smanjenje težine konstrukcije kroz egzaktnu analizu radnih uslova i pouzdanosti same mašine,
- Ekološki i ekonomski zahtjevi koje konstrukcija treba da ispuni (npr. uslovi definisani zakonom, društvom, politikom, itd.),
- Smanjenje težine je moguće i svrsishodno samo uz iskorištenje cjelokupnog sistema,
- Uštede tokom proizvodnje i obrade materijala, kao i skraćenje procesnog lanca kroz integraciju funkcija.

Pravila strategije upotrebe adekvatnih materijala za laki dizajn su:

- Struktura treba da se postigne korištenjem najlakših materijala, sa visokom krutošću i čvrstoćom,
- Smanjenje težine postiže se zamjenom jednog materijala drugim, manje gustine,
- Zamjena materijala zahtjeva prilagođavanje geometrije i u vezi proizvodnje i u veze montaže,
- Kombinovanje različitih materijala (npr. kompozitni materijali).

Uticaj oblika na laku konstrukciju:

- Geometrija strukture (konstrukcije) treba da bude tako razrađena da se kroz optimalnu distribuciju energije i oblika smanji težina konstrukcije,
- Materijale velike gustine treba koristiti samo tamo gdje je to neophodno,
- Pri optimizaciji oblika, radi smanjenja težine, veoma su važni zahtjevi kao što su opterećenje konstrukcije i proizvodne tehnologije,
- Pri analizi oblika treba upotrebljavati različite savremene konstrukcione metode (npr. MKE metode).

Konceptualni/sistemski laki dizajn:

- Konceptualni, odnosno, sistemski laki dizajn je metod za smanjenje težine ukupne konstrukcije, odnosno dijela konstrukcije, uzimajući u obzir sve integracije u sistemu, kao i opšte tehničke i ekonomske kriterijume,
- Težiti smanjenju konstrukcije kroz sistemsko iskorištavanje komponenata strukture, kao i modula i njihove optimizacije u ukupnom sistemu,
- Materijal, oblik, kao i proizvodne tehnologije, važan su dio sistemskog lakog dizajna,
- Uslovi za obezbjeđenje sistemskog lakog dizajna dati su na slici 6.



Slika 6. Uslovi za sistemski laki dizajna [3]

#### 4. MATERIJALI ZA LAKE KONSTRUKCIJE

Iako je već rečeno da laki dizajn nije samo upotreba adekvatnih materijala, ipak to igra važnu ulogu u ovom procesu. Za lake konstrukcije najčešće se primjenjuju sljedeći materijali:

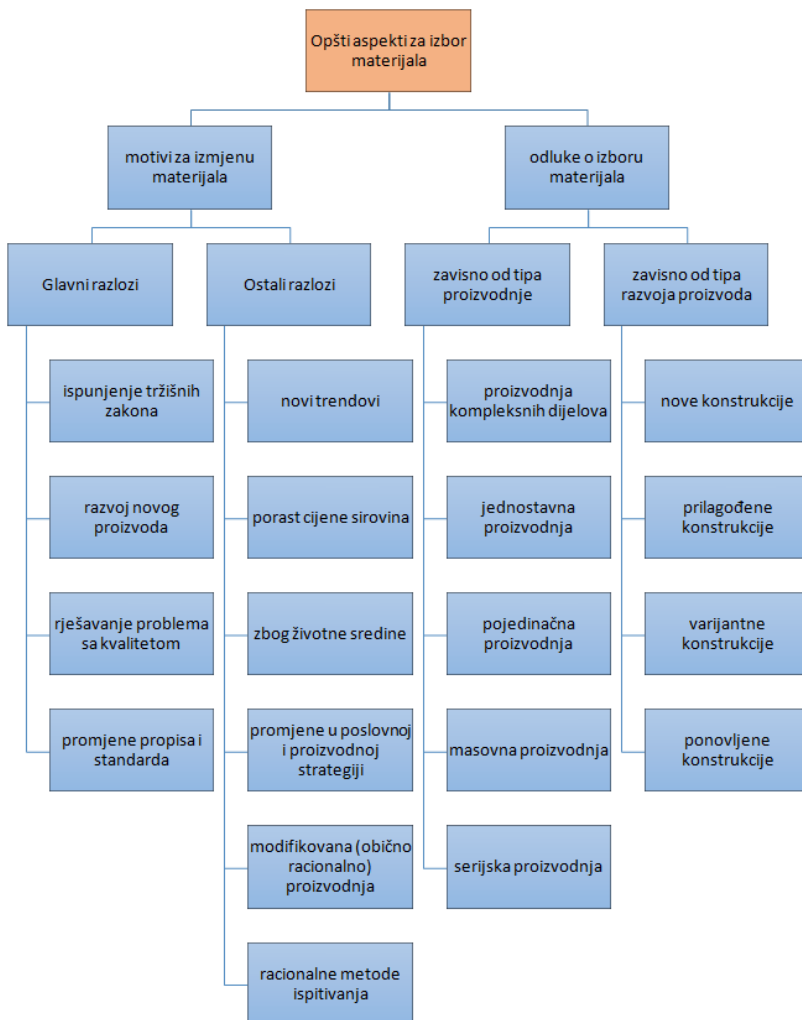
- Metali (čelik, aluminijum, magnezijum),
- Polimeri,
- Kompoziti,
- Keramika,
- Plastična vlakna (CFK),
- Varijabilna aksijalna deponovana vlakna (TFP, FPP),
- Ultra laki materijali (metalne mreže koje se sastoje od 99% vazduha, rešetkasta struktura od nanocjevčica – 1000 puta manjih od ljudske kose),
- Pijenasti polimeri,
- Aluminijumska sendvič pijena (PVC).

Pravilan izbor materijala zahtjeva detaljnu analizu samog procesa razvoja novog ili rekonstruisanja postojećeg proizvoda. Pri izboru materijala treba provjeriti i uporediti osnovna svojstva materijala (fizička, mehanička, tehnološka, upotrebna i ekonomska),

a potom se voditi sljedećim smjernica, ukoliko se teži lakoj konstrukciji:

- dobra svojstva čvrstoće,
- visok modul elastičnosti,
- visoka žilavost materijala,
- nizak koeficijent toplotnog širenja,
- visoka granica zamora materijala,
- dobra tehnologičnost,
- dobra sposobnost zavarivanja i adhezije,
- povoljna cijena po kilogramu.

Opšti aspekti izbora materijala predstavljeni su slikom 7. Zavisno od upotrebne vrijednosti, materijali mogu biti potpuno novi (kada se koriste od početka u procesu izrade određenog proizvoda, još se nazivaju i uvodni materijali), zamjenski materijali (kada se jedan materijal zamjenjuje drugim materijalom) i alternativni materijali (ovo su materijali za koje se zna kako će se ponašati u proizvodnji).



Slika 7. Opšti aspekti izbora materijala



Kod izbora materijala za laku konstrukciju veoma je važna gustina materijala  $\rho$  kao i granica tečenja  $R_{p0,2}$ . Uzimajući u obzir prethodne dvije veličine, geometriju i vrstu opterećenja, može se izračunati tzv. vrijednost (veličina) lakoće (LBKz broj). Vrijednost lakoće (LBKz) se može definisati kao odnos spoljašnjeg i unutrašnjeg opterećenja.

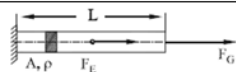
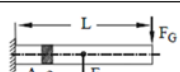
$$LBK_z = F_G / F_E \quad (1)$$

$$\sigma = F_G / A \leq R_e \quad (2)$$

$$F_E = \rho g A L \quad (3)$$

Što je vrijednost lakoće, tj. LBKz broj veći, to je materijal pogodniji za upotrebu u lakim konstrukcijama. Vrijednost lakoće (LBKz broj) za pojedine materijala za uklještena i opterećenje od savijanja i zatezanja, kao i obrasci za proračun LBKz broja za oba slučaja opterećenja dati su u tabeli 1.

Tabela 1. Vrijednost lakoće (LBKz broj) za pojedine materijale i vrstu opterećenja [2]

Materijal	$\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	$R_{p0,2/eH}$ [MPa]	 $LBK_z = \frac{R_{p0,2/eH}}{(\rho \cdot g) \cdot L}$	 $LBK_b = \frac{R_{p0,2/eH}}{6 \cdot (\rho \cdot g) \cdot L^2 / h}$
			LBK <sub>z</sub> za L = 1.000	LBK <sub>b</sub> za $\frac{L^2}{h} = 1.000$
St 52-3 (S355 JO)	7,85	355	4609,88	768,31
AlCuMg 1F 38	2,70	240	9061,05	1510,17
MgAl 6Zn	1,74	220	12888,56	2148,09
Q StE 460 (S 460 NL)	7,85	460	5973,37	995,56
TiCr 5 Al 3	4,50	700	15856,84	2642,81
CFK <sub>II</sub> (0,55)	1,95	900	47047,75	6970,04
CFK <sub>#</sub> (0,55)	1,4	1100	80093,20	13348,87

## 5. ZAKLJUČAK

Pojam lakog dizajna ili olakšanih konstrukcija je relativno nov pojam u opštim mašinskim konstrukcijama, prvenstveno u okvirima primjene na prostoru BiH, ali i bivših YU republika. Da bi se iskoristile sve mogućnosti ovog metoda konstruisanja i razvoja proizvoda, potrebno je poznavati njegovu definiciju, principe primjene, metode primjene, strategije, motive upotrebe, a posebno vrste i karakteristike materijala koje je moguće koristiti, u cilju olakšanja mašinskih konstrukcija. Ovaj rad ima za cilj da pojam LW (lakog dizajna) objasni kroz različite aspekte, ta ga tako približi potencijalnim korisnicima i olakša njegovu primjenu u budućnosti. Konkretni primjeri primjene lakog dizajna, u automobilskoj industriji prije svega, ali i u ostalim oblastima mašinske industrije, se tek očekuju u budućnosti, što će i biti predmet budućih istraživanja autora u ovoj oblasti.

## NOMENKLATURA

- LW* LightWeight  
*CFK* Carbon fiber–reinforced plastic  
*TFP* Tailored Fiber Placement  
*FPP* Fiber Patch Preforming  
*LBKz* Leichtbaukennzahl (LW broj) – vrijednost lakoće  
 $\rho$  gustina materijala  
 $R_{p0.2}$  granica tečenja

## LITERATURA

- [1] Schmid, N., Loogen F. (2012). Leichtbau in Mobilität und Fertigung. *Universität Stuttgart*, Stuttgart.
- [2] Leihbau Philosophie, <http://www.leichtbau-bw.de/leichtbau/philosophie.html>
- [3] Burkardt, N., Majić, N. (2013). Konstruktiver Leichtbau, *KIT –Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe*.
- [4] Audi TechDay: Lightweight Desing, <http://www.quattroworld.com/technology/part-1-audi-techday-lightweight-design-a-core-competence-of-audi/>