

LIGHTWEIGHT AGGREGATE FIBER REINFORCED CONCRETE

ЛАКОАГРЕГАТНИ БЕТОНИ АРМИРАНИ ВЛАКНИМА

Ivana Perčić¹
Danica Goleš²
Ljiljana Kozarić³
Arpad Čeh⁴

UDK: 666.973
DOI: 10.14415/JFCE-879
CC-BY-SA 4.0 license

Summary: Because of the increasing use of lightweight aggregate concrete as a construction material, the paper gives its classification, as well as a brief summary of its advantages and disadvantages in relation to a normal weight concrete. The addition of fibers has proved efficient at improving the properties of lightweight aggregate concrete, especially in terms of correcting its brittle behavior in tension and bending. Based on the literature review, the influence of the type and amount of fibers on the properties of fresh and hardened lightweight aggregate concrete is presented.

Keywords: Lightweight aggregate concrete, classification, fiber reinforced concrete, concrete properties

1. INTRODUCTION

Thanks to its good mechanical properties, easy application and reasonable price, concrete is the most used construction material. One of the significant shortcomings of structures made of normal weight concrete (NWC) is the large share of its self-weight in the total load of the structure. This is the reason of the increased use of

Резиме: Због све чешће примене лакоагрегатних бетона као конструкцијског материјала, у раду је дата њихова класификација, као и кратак резиме њихових предности и недостатака у односу на бетоне нормалне тежине. Додавање влакана се показало као ефикасан начин за унапређење својстава лакоагрегатних бетона, нарочито у погледу корекције њиховог кртог понашања при затезању и савијању. На основу прегледа литературе приказан је утицај врсте и количине влакана на својства свежег и очврслог лакоагрегатног бетона.

Кључне речи: Лакоагрегатни бетон, класификација, бетон армиран влакнима, својства бетона

1. УВОД

Захваљујући добрим механичким својствима, једноставној примени и прихватљивој цени, бетон је највише коришћен грађевински материјал. Један од значајних недостатака конструкција изведених од бетона нормалне тежине (БНТ) је велики удео сопствене тежине у укупном оптерећењу конструкције. Због овога

¹ Ivana Perčić, mast.građ.inž., PhD student, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: ivanapercic97@gmail.com

² Prof. dr Danica Goleš, dipl.inž.građ., University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e-mail: dgoles@gmail.com

³ Prof. dr Ljiljana Kozarić, dipl.inž.građ., University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e-mail: kozaricljiljana@gmail.com

⁴ Doc. dr Arpad Čeh, dipl.inž.građ., University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e-mail: ceh@gf.uns.ac.rs

lightweight aggregate concrete (LWAC), which can achieve the required load-bearing capacity with significantly lower self-weight, i.e. smaller dimensions of members and lower material consumption compared to NWC members. If the NWC, whose density is about 2400 kg/m^3 , is replaced by a constructive LWAC, density of which is between 1400 and 2000 kg/m^3 , a reduction in the structure self-weight by 15-40% can be achieved.

The main disadvantages of concrete as a construction material - extremely low tensile strength and low toughness, are more pronounced in lightweight than in normal weight concrete. One method to correct these shortcomings is the addition of fibers of different origins to the fresh concrete mix.

Structural LWAC is nowadays used in buildings, for large span bridges [1, 2, 3], tunnels, oil platforms, etc. So far, a large number of reinforced or prestressed LWAC structures have been built around the world [4, 5].

2. LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE CLASSIFICATION

Lightweight aggregates are divided by origin into natural and artificial (expanded) - Table 1. Aggregates originating from recycled materials or from plant waste are also increasingly used.

Unlike NWC, which is classified according to the characteristic compressive strength, lightweight concrete is additionally classified according to the density. EN 206-1 [6] and *fib* Model Code 2010 (MC 2010) [7] classify lightweight concrete based on its density in the fully dry state (Table 2).

се све више примењују лакоагрегатни бетони (ЛАБ), који потребну носивост могу постићи са знатно мањом сопственом тежином, односно мањим димензијама елемената и утрошком материјала у односу на елементе од БНТ. Ако се БНТ, чија запреминска маса износи око 2400 kg/m^3 , замени конструктивним ЛАБ запреминске масе између 1400 и 2000 kg/m^3 , може се постићи смањење сопствене тежине конструкције за 15-40%.

Основни недостаци бетона као конструктивног материјала - изузетно ниска чврстоћа при затезању и мала жилавост, израженији су код лаких него код бетона нормалне тежине. Један од начина да се ови недостаци коригују је додавање влакана различитог порекла у свежу бетонску мешавину. Конструктивни ЛАБ се данас примењују у зградарству, за мостове великих распона [1, 2, 3], тунеле, нафтне платформе итд. До сада је широм света изграђен велики број објеката од армираног или преднапрегнутог ЛАБ [4, 5].

2. КЛАСИФИКАЦИЈА ЛАКОАГРЕГАТНИХ БЕТОНА

Лаки агрегати се по пореклу деле на природне и вештачке (експандиране) - табела 1. Све чешће су у примени и агрегати пореклом од рециклираних материјала или од биљног отпада порекла.

За разлику од БНТ, који се класификују према карактеристичној вредности чврстоће при притиску, лаки бетони се додатно деле и према запреминској маси. EN 206-1 [6] и *fib* Model Code 2010 (MC 2010) [7] класификују лаке бетоне на основу њихове запреминске масе у потпуно сувом стању (табела 2).

Табела 1 – Врсте лаких агрегата
Table 1 – Types of lightweight aggregate

Порекло/ Source	Представници/ Representatives	Карактеристике/Characteristics
Природан/ Natural	диатомит/diatomite пловућац/pumice вулкански пепео/ volcanic ash вулкански туф/volcanic tuff	<ul style="list-style-type: none"> • велике поре/large pores • велико упијање и скупљање/high absorption and shrinkage • мала примена код конструктивних лаких бетона/low application in structural lightweight concrete • ретко се проналазе у природи/rarely found in nature
Вештачки/ Artificial	експандирани полимери/expanded polymers експандиране глине/ expanded clay лиапор/liapor експандирани перлит/expanded perlite	<ul style="list-style-type: none"> • затворена структура/closed structure • мала запреминска тежина/low bulk density • могу се постићи чврстоће бетона од 8 до 80 МПа/concrete strengths of 8 to 80 MPa can be achieved

Табела 2 – Класа запреминске масе и одговарајуће прорачунске запреминске масе лаког бетона (ЛАБ) у складу са EN 206-1

Table 2 – Density classes and corresponding design densities of LWAC according to EN 206-1

Класа запреминске масе/Density class	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	
Запреминска маса лаког бетона/Density [kg/m ³]	801-1000	1001-1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000	
Прорачунска запреминска маса/Design value of density [kg/m ³]	Неармирани бетон/ Plain concrete	1050	1250	1450	1650	1850	2050
	Армирани бетон/ Reinforced concrete	1150	1350	1550	1750	1850	2150

According to ACI 213R-14 [4], a structural LWAC should have a minimum compressive cylinder strength of 17 MPa, and a density between 1120 and 1920 kg/m³.

For the design purposes, the characteristic values of compressive strength of concrete given in EC 1992 [8] and MC 2010 can be adopted. The lowest strength class of LWAC according to MC 2010 is LC8, and according to Eurocode 2 LC12 (Table 3). f_{ick} is the characteristic compressive cylinder strength, and $f_{ick,cube}$ represents

Према ACI 213R-14 [4] конструктивни ЛАБ мора да има чврстоћу цилиндра при притиску најмање 17 МПа, и запреминску тежину између 1120 и 1920 kg/m³.

За потребе прорачуна могу се усвојити карактеристичне вредности чврстоће бетона при притиску дате у EC 1992 [8] и MC 2010. Најмања класа чврстоће ЛАБ према MC 2010 је LC8, а према Еврокоду 2 LC12 (табела 3). f_{ick} представља карактеристичну вредност чврстоће ЛАБ цилиндра при притиску, а $f_{ick,cube}$

the characteristic compressive *cube* strength of LWAC. Both values refer to samples of age 28 days.

карактеристичну вредност чврстоће при притиску ЛАБ *коцке*. Обе вредности се односе на узорке старости 28 дана.

Табела 3 – Класе и карактеристичне вредности чврстоће ЛАБ при притиску [7]
Table 3 – Classes and characteristic compressive strength values for LWAC [7]

Класа бетона/ Concrete class	LC8	LC12	LC16	LC20	LC25	LC30	LC35
f_{ck} [MPa]	8	12	16	20	25	30	35
$f_{ck,cube}$ [MPa]	9	13	18	22	28	33	38
Класа бетона/ Concrete class	LC40	LC45	LC50	LC55	LC60	LC70	LC80
f_{ck} [MPa]	40	45	50	55	60	70	80
$f_{ck,cube}$ [MPa]	44	50	55	60	66	77	88

3. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF LWAC

When choosing a construction material, it is necessary to know its characteristics, but also their changes over time.

Main properties, advantages and disadvantages of lightweight aggregate concrete are shown in Table 4.

So far, several analyzes of the cost-effectiveness of LWAC versus NWC have been conducted. One example is the Raftsundet bridge in Norway, with a span of 300 m, where LC60 concrete was used. The analysis showed that the application of LWAC achieves savings of 15% in relation to the price of the facility constructed of NWC [2].

Besides the price, which is usually the main criterion when choosing the type of aggregate, emphasis is increasingly placed on environmental protection, reduction of carbon dioxide emissions and problems with waste disposal, in which lightweight aggregate concrete has performed better than normal weight concrete.

3. ПРЕДНОСТИ И НЕДОСТАЦИ ЛАКОАГРЕГАТНОГ БЕТОНА

Приликом одабира конструкцијског материјала неопходно је познавати његове карактеристике, али и њихове промене у току времена.

Битна својства, као и предности и недостаци лакоагрегатног бетона су приказани у табели 4.

До сада је спроведено више анализа економичности примене ЛАБ наспрам БНТ. Један од примера је мост Raftsundet у Норвешкој, распона 300 m, код кога је примењен је бетон класе LC60. Анализа је показала да се применом ЛАЦ постиже уштеда од 15% у односу на цену објекта изведеног од БНТ [2].

Поред цене, која је најчешће главни критеријум при избору врсте агрегата, све чешће се ставља акценат на заштиту животне средине, смањење емисије угљен-диоксида и проблеме са одлагањем отпада, у чему су се лакоагрегатни бетони показали боље него бетони нормалне тежине.

Табела 4 – Предности и недостаци лакоагрегатног бетона
Table 4 – Advantages and disadvantages of lightweight aggregate concrete

Предности/Pros	Недостаци/Cons
<ul style="list-style-type: none"> • Мања запреминска тежина/Lower bulk density • Мање оптерећење на конструкцију услед сопствене тежине/Less load on the structure due to its own weight • Мање димензије елемената и темеља/Smaller dimensions of members and foundations • Боље термоизолационе карактеристике у односу на БНТ/Better thermal insulation characteristics compared to NWC • Добра отпорност при високим температурама/Good resistance to high temperatures • Еколошки је прихватљивији/More environmentally friendly 	<ul style="list-style-type: none"> • Већа цена лаког агрегата/Higher price of lightweight aggregate • Мала жилавост/Low toughness • Већа опасност од појаве кртог лома у односу на БНТ/Greater risk of brittle fracture compared to NWC • Низак модул еластичности/Small modulus of elasticity • Већа порозност у односу на БНТ/Higher porosity compared to NWC • Веће скупљање у односу на БНТ/Higher shrinkage compared to NWC

The aggregate used in NWC is of natural origin and is not a renewable resource, which is why some countries limit its exploitation. On the other hand, lightweight aggregates can be obtained from recycled material, or as a product of plant waste, which makes them far more environmentally friendly.

The trend of using plant waste as a lightweight aggregate is especially increased in South Asia, where the palm husk is mostly used.

By using the aggregate of a plant waste origin, concretes of lower density can be obtained, which can compete with NWCs in terms of mechanical characteristics. In Malaysia, using the oil palm husk as a lightweight aggregate, LWAC of density between 1870 and 1990 kg/m³ was obtained, whose compressive strength reached values from 43 to 48 MPa [9].

Recycled materials, such as glass, plastic, recycled concrete from old buildings demolishing, etc., are increasingly used as aggregate, solving the problem of construction waste disposal.

Агрегат који се примењује код БНТ је природног порекла и не спада у обновљиве ресурсе, због чега поједине земље ограничавају његову експлоатацију. Са друге стране, лаки агрегати се могу добити од рециклираног материјала, или као продукт биљног отпада, што их чини еколошки далеко прихватљивијим.

Тренд примене биљног отпада као лаког агрегата нарочито је повећан у подручју јужне Азије, где се најчешће користи љуска палме.

Применом биљног отпада као агрегата, могу се добити бетони мање запреминске масе који по механичким карактеристикама могу парирати БНТ. У Малезији је, применом љуске од уљане палме као лаког агрегата, добијен ЛАБ запреминске масе између 1870 и 1990 kg/m³, чија је чврстоћа при притиску достигала вредности од 43 до 48 MPa [9].

Као агрегат се све чешће примењују рециклирани материјали, као што су стакло, пластика, рециклирани бетон настао рушењем старих објеката и др., чиме се решава проблем одлагања грађевинског отпада.

Tests on self-compacting concrete samples, in which 10, 15, 20 and 30% of sand was replaced by recycled plastic showed that replacing 15% of sand with recycled plastic increases the compressive strength by 15% compared to the control sample without recycled plastic [10].

One of the important properties of structural concrete is its behavior in conditions of high temperature and fire. The fire resistance of concrete depends on the type of aggregate used. In most heretofore studies, LWAC has shown higher fire resistance than NWC [4]. Good fire resistance makes LWAC suitable for use in multi-story buildings. Due to its composition, LWAC has a lower thermal conductivity and a lower coefficient of thermal expansion than NWC [11], which is why the energy savings can be achieved by its use.

The magnitude of the seismic force is directly proportional to the mass of the facility. Due to its lower mass, the seismic forces in a structure made of LWAC can be significantly lower than in a structure of NWC, which makes LWAC suitable for application in seismically active areas [12]. Vandanapu and Krishnamurthy [12] investigated the models of structure made of LWAC and NWC on seismic actions. The test results showed that in the case of LWAC structure the bending moments are lower by 15%, and the shear forces by 20% in relation to the NWC structure, and that the application of LWAC reduces the steel consumption by 10%.

The modulus of elasticity of LWAC is 50 to 75% lower than the modulus of elasticity of NWC of the same strength class [13, 4]. For this reason, the risk of brittle fracture of LWAC is even higher than of NWC.

Испитивања узорака самоупрадивог бетона, код којег је 10, 15, 20 и 30% песка замењено рециклираном пластиком су показала да се заменом 15% песка рециклираном пластиком постиже повећање чврстоће при притиску за 15% у односу на контролни узорак без рециклиране пластике [10].

Једно од битних својстава конструктивног бетона је његово понашање у условима високе температуре и при дејству пожара. Отпорност бетона на дејство пожара зависи од врсте примењеног агрегата. У већини досадашњих истраживања ЛАБ је показао већу ватро-отпорност него БНТ [4]. Добра отпорност на пожар чини ЛАБ погодним за примену у вишеспратним објектима.

Због свог састава, ЛАБ има нижу топлотну проводљивост и нижи коефицијент термичког ширења него БНТ [11], због чега се његовом применом може постићи уштеда у енергији.

Величина сеизмичке силе је директно пропорционална маси објекта. Захваљујући мањој маси, сеизмичке силе код објекта изведеног од ЛАБ могу бити знатно мање величине него код објекта који је изведен од БНТ, што ЛАБ чини подесним за примену у сеизмички активним подручјима [12]. Vandanapu и Krishnamurthy [12] су испитивали моделе конструкције од ЛАБ и БНТ на сеизмичка дејства. Резултати испитивања су показали да су код конструкције од ЛАБ моменти савијања мањи за 15%, а смичуће силе за 20% у односу на конструкцију од БНТ, те да се применом ЛАБ постиже смањење утрошка челика за 10%.

Модул еластичности ЛАБ је 50 до 75% нижи од модула еластичности БНТ исте класе чврстоће [13, 4]. Из тог разлога је опасност од појаве кртог лома још већа код ЛАБ.

У раној фази очвршћавања бетона

Drying shrinkage occurs in the early phase of concrete hardening. Due to the higher porosity of lightweight aggregates, this phenomenon is more pronounced in the lightweight than in the normal weight concrete [14, 5, 4].

4. LIGHTWEIGHT AGGREGATE FIBER REINFORCED CONCRETE

The low toughness of lightweight concrete can be corrected by the addition of fibers, which has a positive effect on the mechanical and dynamic properties of concrete, as well as on its impact behavior.

Metallic, glass, synthetic and fibers of plant origin are used. Because of their wide availability, steel fibers are most often used, but due to the rising price of construction steel and its poor corrosion resistance, alternative solutions are increasingly being chosen, such as glass and synthetic fibers, e.g. polypropylene (PP), polyvinyl alcohol (PVA), polyethylene (PE), basalt, etc.

Fibers of plant origin are most often from hemp, cotton, cellulose, etc. Their mechanical properties often vary within wide limits, which makes it difficult to design a concrete mixture of the required properties.

In order to achieve satisfactory physical and mechanical properties of concrete, several different types of fibers can be combined in one concrete mix.

јавља се скупљање услед сушења. Због веће порозности лаких агрегата ова појава је израженија код лаких бетона у односу на бетоне нормалне тежине [14, 5, 4].

4. ЛАКОАГРЕГАТНИ БЕТОНИ АРМИРАНИ ВЛАКНИМА

Ниска жилавост лаког бетона се може кориговати додатком влакана, чиме се постиже позитиван ефекат и на механичка и динамичка својства бетона, као и на његово понашање при удару.

У употреби су метална, стаклена, синтетичка и влакна биљног порекла. Захваљујући лакој доступности, најчешће се примењују челична влакна, али се због раста цене грађевинског челика и његове слабе отпорности на корозију све чешће бирају алтернативна решења, као што су стаклена и синтетичка влакна, од којих се најчешће примењују полипропиленска (ПП), поливинил-алкохолна (ПВА), полиетиленска (ПЕ), базалтна и др.

Влакна биљног порекла су најчешће од конопље, памука, целулозе и др. Њихове механичке карактеристике често варирају у широким границама, што отежава пројектовање бетонске мешавине захтеваних својстава.

Како би се постигла задовољавајућа физичка и механичка својства бетона, у једној бетонској мешавини се може комбиновати више различитих типова влакана.



Слика 1 – Врсте влакана
Figure 1 – Fibre type

In addition to mechanical properties (Table 5), the choice of fibers is also influenced by their resistance to high temperatures, chemical stability, as well as behavior in the presence of moisture (Table 6).

Steel, basalt and carbon fibers retain their mechanical properties even at high temperatures. They slow down the spread of microcracks and increase the toughness of concrete, which provides longer fire resistance of the structure [17].

Low melting point fibers include PP, PVA and PET fibers. By heating above the melting point, these fibers decompose, which forms channels for the passage of water vapor. This reduces the internal pressure and increases the resistance of concrete to high temperatures [17].

The choice of fibers is also influenced by their chemical stability. Steel fibers

Поред механичких карактеристика (табела 5) на одабир влакана утиче и њихова отпорност на високе температуре, хемијска стабилност, као и понашање у присуству влаге (табела 6).

Челична, базалтна и карбонска влакна задржавају своје механичке карактеристике чак и при високим температурама. Она успоравају ширење микропрлина и повећавају жилавост бетона, чиме се обезбеђује дужа отпорност конструкције при дејству пожара [17].

У влакна са ниском тачком топљења се убрајају ПП, ПВА и ПЕТ влакна. Загревањем изнад тачке топљења долази до њиховог распадања, чиме се формирају канали за пролаз водене паре. На овај начин се смањује унутрашњи притисак и повећава отпорност бетона на високе температуре [17].

are sensitive to corrosion, fibers of plant origin to moisture, which can lead to their decomposition, and glass fibers to alkalis.

На избор влакана утиче и њихова хемијска стабилност. Челична влакна су осетљива на корозију, влакна биљног порекла на влагу, због чега може доћи до њиховог распадања, а стаклена влакна на алкалије.

Табела 5 – Својства влакана [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]
Table 5 – Properties of fibers [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]

Својства/Properties		f_{ts} [MPa]	E_c [GPa]	ρ [g/cm ³]	ϵ [%]
Врста влакана/Fibre type					
Метална/ Metallic	Челик/Steel	200 - 3000	195 - 210	7.50 - 7.85	0.5 - 5.0
Стаклена/ Glass	Силика стакло/ Silica glass	1700 - 4600	72 - 89	2.60 - 2.70	2.0 - 3.5
	Базалт/Basalt	1800 - 4800	72 - 110	2.55 - 2.80	2.0 - 3.5
	Е стакло/E glass	2000 - 4000	72	2.54	3.0 - 4.8
	AR стакло/ AR glass	1500 - 3700	80	2.70	2.5 - 3.6
Синтетичка/ Synthetic	Полипропилен/ Polypropylene (PP)	60 - 760	1.5 - 15	0.90 - 0.95	5.0 - 25.0
	Поливинил- алкохол/Polyvinyl- Alcohol (PVA)	850 - 1620	23 - 41	1.30	5.0 - 8.0
	Најлон/Nylon	300 - 950	3.0 - 5.4	1.13 - 1.15	10.0 - 20.0
	Полиетилен/ Polyethylene (PE)	80 - 690	5.0	0.92 - 0.98	12.0 - 100
	Полиакрилонитрил/ Polyacrylonitrile (PAN)	800	>10	1.20	1.0
	Карбон/Carbon	1500 - 7000	30 - 800	1.40 - 1.90	0.5 - 2.5
	Полиестер/Polyester (PET)	250 - 1200	10 - 20	1.32 - 1.40	10.0 - 50.0
Арамид/Aramid	2000 - 3600	62 - 143	1.40 - 1.50	2.0 - 4.6	
Natural/ Природна	Конопља/Hemp	270 - 900	23.5 - 90	1.50	1.0 - 3.5
	Памук/Cotton	287 - 800	4.0 - 5.0	1.50	3.0 - 10.0
	Целулоза/Cellulose	200 - 500	5.5 - 40	1.20 - 1.50	3.0 - 10.0

f_{ts} – Чврстоћа при затезању/Tensile strength; E_c – Модул еластичности/Elastic modulus; ρ – Специфична маса/Specific gravity; ϵ – Издужење при кидању/Ultimate elongation

Табела 6 – Карактеристике влакана [17, 20, 23, 21]
Table 6 – Properties of fibers [17, 20, 23, 21]

Својства/Properties		Т [°C]	У [%]	Осетљивост /Sensitivity
Врста влакана/Fibre type				
Метална/ Metallic	Челик/Steel	1370	-	Корозија/ Corrosion
Стаклена/ Glass	Базалт/Basalt	1450 - 1700	0	Отпорна/ Resistant
	Стакло/Glass	860	0	Алкалије/ Alkalis
Синтетичка/ Synthetic	Полипропилен/ Polypropylene (PP)	160 - 170	0	Отпорна/ Resistant
	Половинил-алкохол/ Polyvinyl-Alcohol (PVA)	220 - 240	0.1 – 1.0	Отпорна/ Resistant
	Најлон/Nylon	231 - 252	2.5 – 5.0	Отпорна/ Resistant
	Полиетилен/ Polyethylene (PE)	100-130	0	Отпорна/ Resistant
	Полиакрилонитрил/ Polyacrilonitrile (PAN)	245	-	Отпорна/ Resistant
	Карбон/Carbon	> 3000	0	Отпорна/ Resistant
	Полиестер/Polyester (PET)	160	0.2 – 0.6	Отпорна/ Resistant
	Арамид/Aramid	200 - 500	1.2 – 4.0	Алкалије/ Alkalis
Природна/ Natural	Конопља/Hemp	-	85 - 105	Влага/ Moisture

Т – Тачка топљења/Melting point; У – Упијање воде/Water absorption

5. MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH FIBERS

Fibers have a significant influence on the mechanical properties of concrete. Depending on the type, length and amount, fibers can have a positive influence on the behavior of concrete under dynamic loads, its tensile strength and increased toughness. The influence of the type and amount of fibers on the mechanical properties of lightweight aggregate fiber reinforced concrete (LWAFRC) is shown in Table 7.

5. МЕХАНИЧКА СВОЈСТВА ЛАКИХ БЕТОНА СА ВЛАКНИМА

Влакна имају значајан утицај на механичке карактеристике бетона. У зависности од типа, дужине и количине, влакна могу имати позитиван утицај на понашање бетона при динамичким оптерећењима, његову чврстоћу при затезању и повећање жилавости. Утицај врсте и количине влакана на механичка својства лакоагрегатног бетона армираног влакнима (ЛАБАВ) приказан је у табели 7.

Табела 7 – Утицај влакана на механичке карактеристике ЛАБАВ
Table 7 – Influence of fibers on mechanical properties of LWAFRC

	f_c [MPa]	ρ [kg/m ³]	Врста влакана/ Fibre type	V_f [%]	$\Delta f_c/f_c$ [%]	$\Delta E_c/E_c$ [%]	$\Delta f_{st}/f_{st}$ [%]	$\Delta f_r/f_r$ [%]
[25]	34.5	1850	Челик/Steel	0.5 0.75 1.0	+ 6 - 3 - 7	+ 10 - 9 - 13	+ 40 + 46 + 77	-
[26]	76.7	1871	Челик/Steel	0.3	+ 3	+ 0	+ 26	+ 35
				0.6	+ 6	+1.5	+ 46	+ 43
				0.9	+ 12	± 0	+ 61	+ 46
			Карбон/Carbon	0.3	- 5	+ 4	+ 13	+ 5
				0.6	- 6	+ 7	+ 20	+ 53
				0.9	+12	- 10	+ 55	+ 67
[27]	30	-	Базалт/Basalt	0.25	± 0	+ 19%	+ 90	+ 17
[21]	31.4	1808	Базалт/Basalt	0.5	+ 6	-	+ 10	+ 27
				1.0	+ 12	-	+ 21	+ 41
				1.5	+ 14	-	+ 28	+ 50
			Полиакрилонитрил/ Polyacrilonitrile	0.5	+ 1	-	+ 8	+ 17
				1.0	+ 5	-	+ 15	+ 31
				1.5	+ 9	-	+ 23	+ 41
[28]	37	1800	Полиолефин/ Polyolefin	0.5	+ 1	-	-	+ 0.3
				1.0	+ 8	-	-	+ 0.4
				1.5	+ 4	-	-	+ 6.0
				2.0	- 3	-	-	+ 1.0
[29]	40	1805	Макро-микро полиолефин/Макро- micro polyolefin	0.2/0.02	± 0	-5	± 0	-
				0.4/0.02	+5	-8	+21	-
				0.6/0.02	+15	-18	+50	-
[30]	42.9	1939	Половинил-алкохол/ Polyvinyl-Alcohol	0.125	+ 1	+ 2	+ 9	+ 9
				0.250	+ 6	+ 7	+ 11	+ 26
				0.375	+ 9	+ 7	+ 20	+ 28
				0.500	+ 13	+ 10	+ 30	+ 32

f_c – Чврстоћа при притиску/Compressive strength; ρ – Маса узорка у сувом стању/Oven dry density; V_f – Запремина влакана/Volume of fiber; E_c – Модул еластичности/Elastic modulus; f_{st} – Чврстоћа при затезању цепањем/Splitting tensile strength; f_r – Чврстоћа на савијање/Flexural strength

So far, many experimental tests have been performed on the contribution of different fibers to the compressive strength of concrete. In most of these tests, it was concluded that the contribution of fibers is small and that, in some cases, there is even a decrease in strength. On the other

До сада је урађено много експерименталних испитивања доприноса различитих влакана на чврстоћу бетона при притиску. У већини тих испитивања се дошло до закључка да је допринос влакана мали и да, у неким случајевима, чак долази и до смањења чврстоће. С

hand, fibers have a big influence on the flexural strength, as well as on the splitting tensile strength. The contribution of fibers to flexural and shear strength is greater in lightweight aggregate concrete compared to the contribution of fibers in normal weight concrete [24].

6. TOUGHNESS OF LWAFRC

Lightweight concretes, due to lower weight, can be widely used in seismically active areas, but there are limitations due to their low toughness and the risk of brittle fracture. Toughness is the ability of a material to plastically deform before its fracture occurs. In order to increase the toughness, fibers are added to the concrete, which has been justified in most previous tests. Al-Naimi and Abbas [31] confirmed that the addition of steel fibers contributes to increased toughness in the post-crack phase. A similar effect was observed with the use of basalt [27, 32] and polypropylene fibers [33, 34]. It has been observed that steel fibers more significantly contribute to increasing the toughness of concrete than PP fibers [34].

7. SHRINKAGE AND CREEP OF LWAFRC

Time dependent deformations caused by shrinkage and creep of concrete are an important factor in the durability of concrete structure. Previous tests have shown that the shrinkage of concrete is higher in LWC than in NWC. The rate of shrinkage is inversely proportional to the modulus of elasticity of aggregate, thus the shrinkage of concrete with aggregate of lower modulus of elasticity is higher. Shrinkage leads to the appearance of microcracks in the early phase of concrete hardening, which can affect the durability of the structure in service. In many studies so far, the

друге стране, влакна имају велики утицај на чврстоћу при савијању, као и на чврстоћу при затезању цепањем. Допринос влакана на чврстоћу при савијању и смицању је већи код лакоагрегатних бетона у односу на допринос влакана код бетона нормалне тежине [24].

6. ЖИЛАВОСТ ЛАБАВ

Лаки бетони због своје мање масе могу имати велику примену у сеизмички активним подручјима, али се појављују ограничења због њихове мале жилавости и опасности од кртог лома. Жилавост представља способност материјала да се пластично деформише пре него што наступи његов лом. Да би се повећала жилавост, бетону се додају влакна, што се показало оправданим у већини досадашњих испитивања. Al-Naimi и Abbas [31] су потврдили да додаток челичних влакана доприноси повећању жилавости у фази након појаве прслина. Сличан ефекат је примећен код примене базалтних [27, 32] и полипропиленских влакана [33, 34]. Примећено је да челична влакна значајније доприносе повећању жилавости бетона него ПП влакна [34].

7. СКУПЉАЊЕ И ТЕЧЕЊЕ ЛАБАВ

Временски зависне деформације настале услед скупљања и течења бетона представљају важан фактор трајности бетонске конструкције. Досадашња испитивања су показала да је скупљање бетона веће код ЛАВ него код БНТ. Величина скупљања је обрнуто пропорционална величини модула еластичности агрегата, па бетони са агрегатом нижег модула еластичности имају веће скупљање. Скупљање доводи до појаве микропрслина у раној фази очвршћавања бетона, што се може одразити на трајност конструкције у

fibers have shown a positive effect on the strength in the early stages of concrete hardening, which can reduce cracks caused by shrinkage.

It has been observed that PP fibers decelerate the spread of cracks caused by shrinkage of concrete [35]. Similar behavior was observed in concrete reinforced with plastic fibers. The best effects were obtained by using a combination of plastic and steel fibers or steel and PP fibers [36]. Similar observations were made by Zheng et al. [37], who tested lightweight concrete with 0.5, 1 and 2% steel fibers. Less shrinkage was observed in concrete containing fibers compared to plain concrete.

8. WORKABILITY OF LWAFRC

The addition of fibers adversely affects the workability of fresh concrete. The properties of fresh concrete with the addition of fiber are influenced by many factors, such as:

- characteristics of the aggregate,
- water-to-cement ratio (w/c),
- type of fibers,
- fiber length,
- length-to-diameter ratio of fibers,
- amount of fiber,
- the amount of water absorbed by the fibers.

Tests of concrete with recycled lightweight aggregate and the addition of steel fibers in the amount of 1 and 2% of the total weight of concrete showed a decrease in workability compared to plain concrete [32]. Similar observations were made by Yew et al. [31] by testing lightweight concretes with the addition of PVA fibers in the amount of 0, 0.125, 0.25, 0.375 and 0.5% of the total weight of concrete. Fiber reinforced concretes had 5, 7.5, 22.5 and 40%, respectively, lower workability than plain concretes.

експлоатацији. Влакна су у многим досадашњим испитивањима показала позитиван утицај на чврстоћу при затезању у раној фази очвршћавања бетона, чиме се могу смањити прслине настале услед скупљања.

Примеђено је да ПП влакана успоравају ширење прслина насталих услед скупљања бетона [35]. Слично понашање је примеђено код бетона армираних пластичним влакнима. Најбољи ефекти су добијени применом комбинације пластичних и челичних влакана или челичних и ПП влакана [36]. Слична запажања су имали Zheng и остали [37], који су вршили испитивања лаких бетона са 0.5, 1 и 2% челичних влакана. Уочено је мање скупљање бетона који садрже влакна у односу на бетоне без њих.

8. УГРАДЉИВОСТ ЛАБАВ

Додатак влакана неповољно утиче на уградљивост свежег бетона. На својства свежег бетона са додатком влакана утиче много фактора, као што су:

- карактеристике агрегата,
- водоцементни фактор (w/c),
- тип влакана,
- дужина влакана,
- однос дужине и пречника влакана,
- количина влакана,
- количина воде коју влакна упију.

Испитивања бетона са лаким рециклираним агрегатом и додатком челичних влакана у количини од 1 и 2% укупне масе бетона су показала пад уградљивости у односу на бетон без влакана [31]. До сличних запажања су дошли Yew и остали [30] испитујући лаке бетоне са додатком ПВА влакана у износу од 0, 0.125, 0.25, 0.375 и 0.5% укупне масе бетона. Бетони са влакнима су имали за 5, 7.5, 22.5 и 40%, респективно, нижу уградљивост него бетон без влакана.

Смањење уградљивости бетонске

Arisoy and Wy [38] have also observed a decrease in the workability of concrete mixes containing PVA fibers. The workability of LWAFRC can be improved by adding more water or additives. In addition to workability problems, segregation is also pronounced in these concretes, which can occur during the vibrating of concrete [38]. Therefore, the vibrating of the lightweight aggregate fiber reinforced concrete is not recommended [38].

9. CONCLUSION

Lightweight structural concretes cannot completely replace NWC, but they can be a better solution for the production of certain structural members, due to their many advantages, primarily lower density. In addition, increasing emphasis is placed on environmental protection and reduction of carbon dioxide emissions, which makes lightweight concretes increasingly attractive.

Adequate selection of aggregates can achieve concrete properties similar to those of NWC. Although the price of LWC is higher than the price of NWC, structures made of lightweight aggregate concrete, by choosing the right composition of concrete, can be made more economical compared to the same structure made of NWC.

Some physical and mechanical concrete properties, primarily its behavior after reaching the ultimate tensile strength, can be improved by fibers addition. Fibers can increase toughness and reduce the risk of brittle fracture.

The invention and development of many types of fibers with different mechanical characteristics, whose application produces concretes of appropriate properties, enable more economical construction of buildings of the requested performance.

мешавине која садржи ПВА влакна приметили су и Arisoy и Wy [38].

Уградљивост ЛАБАВ се може поправити додавањем веће количине воде или адитива. Поред проблема са уградљивошћу, код ових бетона је изражена и сегрегација, до које може доћи при вибрирању бетона [38]. Због тога се вибрирање лакоагрегатних бетона армираних влакнима не препоручује [38].

9. ЗАКЉУЧАК

Лаки конструктивни бетони не могу у потпуности заменити БНТ, али за израду појединих елемената могу представљати боље решење због својих многобројних предности, првенствено мање запреминске тежине. Поред тога, све се већи акценат ставља на заштиту животне средине и смањење емисије угљен-диоксида, због чега су лаки бетони све атрактивнији.

Адекватним избором агрегата могу се постићи својства бетона слична онима код БНТ. Иако је цена ЛАБ већа него цена БНТ, конструкције изведене са лакоагрегатним бетоном се, правилним избором састава бетона, могу учинити економичнијим у односу на исту конструкцију изведену од БНТ.

Неке физичке и механичке карактеристике бетона, првенствено његово понашање након достизања граничне чврстоће при затезању, се могу побољшати додавањем влакана. Влакна могу повећати жилавост и смањити опасност од појаве кртог лома конструкције.

Појава и развој многобројних типова влакана различитих механичких карактеристика, чијом се применом добијају бетони одговарајућих својстава, омогућавају економичније извођење објеката захтеваних перформанси.

ACKNOWLEDGEMENTS

The present work has been supported by The Provincial Secretariat for Higher Education and Scientific Research, Autonomous Province of Vojvodina, Republic of Serbia (Project No. 142-451-2640/2021-01).

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је подржан од стране Покрајинског секретаријата за високо образовање и научноистраживачку делатност, аутономне покрајине Војводине, Република Србија (Пројекат бр. 142-451-2640/2021-01).

REFERENCES

- [1] Raithby, K., Lydon, F.: Lightweight concrete in highway bridges. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1981., vol. 3, № 2, p.p. 133-146.
- [2] Harmon, K.S.: Norway Bridges Using High Performance Lightweight Aggregate Concrete. *American Concrete Institute Fall Convention*, 2004., vol. 218, p.p. 189-198.
- [3] Paeglitis, A., Sahmenko, G.: Bridges with lightweight aggregate concrete structures. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2006., vol. 1, № 1, p.p. 55-61.
- [4] ACI 213R-14 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, ACI Committee 213, American Concrete Institute, 2014.
- [5] Lazić, M., Romić, S.: *Armironi lakoagregatni beton*, IRO Gradevinska knjiga, Beograd, 1985.
- [6] BS EN 206-1: Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier, CEN European Committee for Standardization, 2006.
- [7] *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2013.
- [8] EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN European Committee for Standardization, 2004
- [9] Shafiqh, P., Jumaat, M.Z., Mahmud, H.: Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 2011., vol. 25, № 4, p.p. 1848-1853.
- [10] Yang, S., Yue, X., Liu, X., Tong, Y.: Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Construction and Building Materials*, 2015., vol. 84, p.p. 444-453.
- [11] Tanyıldızı H.: Post-fire behavior of structural lightweight concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 2014., vol. 68, p.p. 565-571.
- [12] Vandanapu, S.N., Krishnamurthy, M.: Seismic Performance of Lightweight Concrete Structures. *Advances in Civil Engineering*, 2018., vol. 2018, p.p. 1-6.
- [13] Cui, H., Lo, T.Y., Memon, S.A., Xu, W.: Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 2012, vol. 35, p.p. 149-158.
- [14] Bogas, J.A., de Brito, J., Figueiredo, J.M.: Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 89, p.p. 187-195.
- [15] Shafei, B., Kazemian, M., Dopko, M. Najimi, M.: State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*, 2021., vol. 14, № 2, p.p. 409.
- [16] ACI 544.5R Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete, ACI Committee 544, American Concrete Institute, 2010.
- [17] Wu, H., Lin, X., Zhou, A.: A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 2020., vol. 135, p.p. 106117.
- [18] Choi, J. I., Lee, B.: Bonding Properties of Basalt Fiber and Strength Reduction According to Fiber Orientation. *Materials*, 2015., vol 8, № 10, p.p. 6719-6727.
- [19] Wang, A., Lyu, Z., He, Z., Nguyen, K. T.: Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete-A review. *Construction and Building Materials*, 2021., vol. 296, p.p. 123734.
- [20] Li, Z., Wang, X., Wang, L.: Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006., vol. 37, № 3, p.p. 497-505.

- [21] Zeng, Y., Zhou, X., Tang, A. Sun, P.: Mechanical Properties of Chopped Basalt Fiber-Reinforced Lightweight Aggregate Concrete and Chopped Polyacrylonitrile Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete. *Materials*, 2020., vol. 13, № 7, p.p. 1715.
- [22] Poletanovic, B., Dragas, J., Ignjatovic, I., Komljenovic, M. Merta, I.: Physical and mechanical properties of hemp fibre reinforced alkali-activated fly ash and fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials*, 2020., vol. 259, p.p. 119677.
- [23] Shafei, B., Kazemian, M., Dopko, M., Najimi, M.: State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*, 2021., vol. 14, № 2, p.p. 409.
- [24] Balendran, R., Zhou, F., Nadeem, A. Leung, A.: Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete. *Building and Environment*, 2002., vol. 37, № 12, p.p. 1361-1367.
- [25] Mo, K.H., Goh, S.H., Alengaram, U.J., Visintin, P. Jumaat, M.Z.: Mechanical, toughness, bond and durability-related properties of lightweight concrete reinforced with steel fibres. *Materials and Structures*, 2016., vol. 50, № 1.
- [26] Liu, X., Wu, T., Liu, Y.: Stress-strain relationship for plain and fibre-reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 2019., vol. 22, p.p. 256-272.
- [27] Divyah, N., Thenmozhi, R., Neelamegam, M., Prakash, R.: Characterization and behavior of basalt fiber-reinforced lightweight concrete. *Structural Concrete*, 2020., vol. 22, № 1, p.p. 422-430.
- [28] Sedaghatdoost, A., Amini, M.: Mechanical Properties of Polyolefin Fiber-Reinforced Light Weight Concrete. *Civil Engineering Journal*, 2017., vol. 3, № 9, p.p. 759-765.
- [29] Sahoo, S., Selvaraju, A.K., Suriya Prakash, S.: Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres. *Cement and Concrete Composites*, 2020., vol. 113, p.p. 103712.
- [30] Yew, M.K., Bin Mahmud, H., Ang, B.C., Yew, M.C.: Effects of Low Volume Fraction of Polyvinyl Alcohol Fibers on the Mechanical Properties of Oil Palm Shell Lightweight Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015., vol. 2015, p.p. 1-11.
- [31] Al-Naimi, H., Abbas, A.: Ductility of steel-fibre-reinforced recycled lightweight concrete. *Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn 2015)*, 2019.
- [32] Galishnikova, V.V., Chiadighikaobi, P.C., Emiri, D.A.: Comprehensive view on the ductility of basalt fiber reinforced concrete focus on lightweight expanded clay. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2019., vol. 15, № 5, p.p. 360-366.
- [33] Nahhas, T.M.: Flexural behavior and ductility of reinforced lightweight concrete beams with polypropylene fiber. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2013., vol. 1, № 1, p.p. 4-11.
- [34] Libre, N.A., Shekarchi, M., Mahoutian, M., Soroushian, P.: Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice. *Construction and Building Materials*, 2011., vol. 25, № 5, p.p. 2458-2464.
- [35] Daneti, S.B., Wee, T.H., Thangayah, T.S.: Effect of polypropylene fibres on the shrinkage cracking behaviour of lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 2011., vol. 63, № 11, p.p. 871-881.
- [36] Hussein, Z.M., Khalil, W.I., Ahmed, H.K.: Shrinkage and impact strength of fibre-reinforced artificial lightweight aggregate concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020., vol. 671, № 1, p.p. 012118.
- [37] Zheng, X., Ji, T., Easa, S.M., Zhang, B., Jiang, Z.: Tensile basic creep behavior of lightweight aggregate concrete reinforced with steel fiber. *Construction and Building Materials*, 2019., vol. 200, p.p. 356-367.
- [38] Arisoy, B. Wu, H.C.: Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA. *Construction and Building Materials*, 2008., vol. 22, № 4, p.p. 635-645.