

Александар ЦВЕТАНОВИЋ, Горан МЛАДЕНОВИЋ, Марко ОРЕШКОВИЋ

ИНОВАТИВНИ МАТЕРИЈАЛИ И ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗА ИЗГРАДЊУ ПУТЕВА

INOVATIVE MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR ROAD CONSTRUCTION

др Александар ЦВЕТАНОВИЋ, дипл. **инж. грађ.**
редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду

др Горан МЛАДЕНОВИЋ, дипл. грађ. инж.
ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду

др Марко ОРЕШКОВИЋ, мастер инж. грађ.
доцент Грађевинског факултета Универзитета у Београду

Резиме

У раду је дат приказ неколико иновативних технолошких решења чија се примена може очекивати у будућности у контексту све оштријих захтева у погледу саобраћајног оптерећења и услова околине, имајући у виду специфичан утицај климатских промена на путну инфраструктуру, а поштујући принципе одрживог развоја.

Посебно су приказане могућности модификације битумена и асфалтних мешавина са отпадном гумом и пластиком, производња и уграђивање асфалтних мешавина по топлом поступку, као и поступци за само-зацељивање асфалтних слојева.

Применом ових поступака омогућава се побољшање карактеристика асфалтних слојева и њиховог експлоатационог века, смањење трошкова одржавања, и смањење негативног утицаја на околину проузрокованог радовима на изградњи и одржавању путева.

Кључне речи: асфалтне мешавине, отпадна гума, пластика, мешавине по топлом поступку, само-зацељење

Summary

The paper presents several innovative technologies whose implementation can be expected in the future in the context of increasingly demanding requirements regarding traffic loading and environmental conditions, bearing in mind the specific impact of climate change on road infrastructure, while respecting the principles of sustainable development.

In particular, the possibilities of modifying bitumen and asphalt mixtures with waste rubber and plastic, production and compaction of warm asphalt mixtures, as well as procedures for self-healing of asphalt layers are shown.

By applying these procedures, it is possible to improve the characteristics of asphalt layers and their operational life, reduce maintenance costs, and reduce the negative impact on the environment caused by road construction and maintenance works.

Key words: asphalt mixtures, waste rubber, plastic, warm asphalt mixtures, self-healing

1. УВОД

Коловозне конструкције путева су изложене све већим захтевима у погледу фреквенције саобраћајног оптерећења и интензитета осовинских оптерећења, као и услова средине, који се огледају у све вишим летњим температурама и дужим топлотним таласима, који негативно утичу на крутост асфалтних слојева и стање напона и деформација у слојевима коловозне конструкције, чиме доводе до скраћења њиховог експлоатационог века и проузрокују значајно повећање трошкова одржавања. Због тога се за најоптерећеније саобраћајнице примењују полимер модификовани битумени, који омогућавају да се прошири температурни распон примене асфалтних мешавина и на тај начин повећа њихова отпорност на трајну деформацију на високим температурама, али и да се смањи отпорност на термичке пукотине на ниским температурама.

У последње време врше се и истраживања у погледу примене других материјала ради побољшања реолошких карактеристика асфалтних мешавина, па се тако у оквиру експерименталних истраживања све више користе наночестице како би се побољшала отпорност асфалтних слојева на замор и трајну деформацију. У пракси се са друге стране за најзначајније пројекте са изузетно великим или комплексним саобраћајним оптерећењем примењују асфалтне мешавине које су справљене са високо полимеризованим битуменом, у коме је садржај полимера значајно увећан у односу на класичне полимермодификоване битумене.

Други важан аспект јесте утицај на околину који је резултат изградње и примењених третмана одржавања путева. Већина путних управа тежи ка све већој примени рециклираних и алтернативних материјала како би се очували природни ресурси, смањиле емисије гасова стаклене баште и тиме допринело одрживом развоју у домену путне инфраструктуре. Поред струганих асфалтних слојева, у све већој мери се користе рециклирана гума од аутомобилских пнеуматика, стакло, пластика, рециклирани дробљени бетон и други материјали. Ови материјали имају улогу да побољшају везиво, или да замене агрегат у асфалтној мешавини, подразумевајући да техничке спецификације за одређени пројекат морају бити задовољене.

У последњих 20 година је све више примењена, поготово у Сједињеним Америчким Државама

технологија производње асфалтних мешавина по топлом поступку (тзв. Warm Mix Asphalt – WMA) која омогућава производњу и уградњу асфалтних слојева на температурама које су за приближно 20 – 40°C ниже од уобичајених температура за мешавине по врућем поступку (Hot Mix Asphalt - HMA), чиме се омогућава значајна уштеда горива, смањење испарења и емисије гасова стаклене баште.

На неколико истраживачких институција се такође ради на развоју само-зацељујућих (енг. self-healing) асфалтних и бетонских мешавина, како би се смањили трошкови одржавања и продужио век коловозних конструкција.

Такође се у свету све више примењују и порозне асфалтне мешавине за засторе коловозних конструкција, или порозне конструкције у целини са циљем да се смањи ниво буке проузроковане саобраћајем, побољша одводњавање и услови одвијања саобраћаја, а у градским условима и да се смање ефекат топлотних острва проузрокован климатским променама и значајним повећањем температуре услед рефлексије топлоте са постојећих асфалтних и бетонских саобраћајних површина.

Путеви такође представљају значајан ресурс који се може користити пре свега за прикупљање соларне енергије. У том смислу се ради на развоју више технологија за прикупљање енергије из коловоза, при чему се она може користити од тога да напаја одређену опрему у путном појасу (сигнализација, осветљење, путне метеоролошке станице и др.) до бежичног напајања електричних возила у будућности.

Циљ овог рада је да представи неке од ових иновативних материјала и технологија које се већ примењују или које се тренутно развијају и чија се примена очекује у непосредној будућности.

2. ПРИМЕНА ГУМЕ И ПЛАСТИКЕ У АСФАЛТНИМ МЕШАВИНАМА

Иновације у области асфалтних мешавина се дешавају у неколико праваца. Са једне стране се иде ка употреби што већег процента рециклираног струганог асфалта у мешавинама, примене рециклираних и алтернативних материјала попут гуме или пластике за модификацију битумена или делимичну замену фракција каменог агрегата или примена биовезива уместо битум-

мена за производњу асфалтних мешавина које имају мање штетан утицај на околину.

У оквиру овог поглавља биће представљене основне карактеристике асфалтних мешавина са додатком отпадне гуме и пластике.

2.1. Асфалтне мешавине са додатком гуме

Примена рециклиране гуме је започела још 60-тих година XX века у Аризони у Сједињеним Државама и то је био први рециклирани материјал који се користио у производњи асфалтних мешавина.



Слика 1. Отпадне аутомобилске гуме

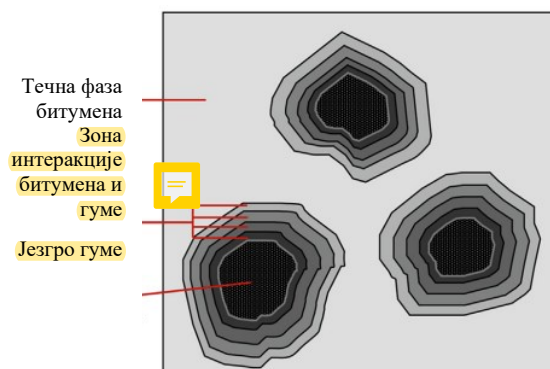
Рециклирана гума се најчешће користи у виду млевене гуме, величине зрна до 0.6 mm, из које су одстрањени сви метални делови и која се додаје битумену или асфалтној мешавини, како би се побољшала њена отпорност на колотраге и на пуцање, слично примени полимера на бази стирен-бутадиен-стирена (SBS). При томе се користе два процеса, у зависности од тога да ли се гума додаје са циљем да модификује битумен, или да делимично замени ситнозрни агрегат:

- мокри процес, у оквиру кога се уситњена рециклирана гума меша прво са битуменом у мешалици са високим бројем обртаја, и затим се модификовани битумен користи за справљање асфалтне мешавине, и
- суви процес, у оквиру кога се млевена гума додаје као делимична замена ситнозрног агрегата.

Процент гуме у битумену модификованом по традиционалном мокром поступку се креће изнад 15% и при томе се користи крупније млевена гума (величине зрна око 1.5 mm). Интеракција битумена и гуме се одвија током 30

до 60 мин. на температури од 175 до 190 °C, при чему је неопходно континуирано мешање. Поступак је модификован у последње време, тако да се користи ситније млевена гума (0.2 – 0.6 mm), која се меша са битуменом на истој температури најмање 60 мин., и у коме се користи 5 до 12% гуме у односу на масу битумена, а могу се додати и други полимери, као што је SBS [1]. Стабилност при лагеровању битумена модификованог гумом још увек представља један од кључних проблема приликом производње асфалтних мешавина са овим везивом [2].

При мешању битумена и гуме долази до њихове физичке интеракције, при чему гума апсорбује фракције битумена са мањом молекуларном масом (сатурате и ароматска уља) и бубри, повећавајући своју запремину 3-5 пута (слика 2).



Слика 2. Интеракција битумена и гуме са селективном апсорпцијом фракција битумена [3]

У оквиру сувог поступка се користи млевена гума величине зрна 0.3 – 0.6 mm, која се прво меша са агрегатом, а затим се справља асфалтна мешавина, при чему се најчешће додају хемијски адитиви за смањење трења на контакту агрегата и битумена, који поред осталог омогућавају одређено бубрење гуме и у овом поступку. Прве примене овог поступка сводиле су се на коришћење дисконтинуалних минералних мешавина, због потребе да се обезбеди простор за комаде гуме који бубре. Међутим, у новије време, овај поступак се примењује и за минералне мешавине пројектоване са континуалном гранулометријском кривом.

Праћење понашања асфалтних мешавина са гумом је показало се ове мешавине понашају слично мешавинама са полимер модификованим битуменом [4,5], при чему се посебно повећава отпорност на трајну деформацију, захваљујући везиву у коме налазе набубрели делови еластичне гуме [6], као и отпорност на пукотине услед

замора [7] и термичке пукотине услед ниских температура [8].

Мешавине са гумом такође омогућавају смањење буке изазване саобраћајем за 1 до 10 dB, зависно од типа мешавине, нивоа саобраћаја, брзине возила и параметара окружења. И код њих се дешава да ефикасност смањења буке опада са временом, али спорије него код других застора, попут порозног асфалта [9,10].

Асфалтни слојеви са гумом су крући од класичних асфалтних застора, што доводи до мањих угиба под саобраћајем, мањег отпора котрљању, и последично до мање потрошње горива, што је посебно значајно у садашњем тренутку [11].

2.2. Асфалтне мешавине са додатком пластике

Примена отпадне пластике и њена рециклажа у асфалтним мешавинама је новијег датума, и делимична је последица и регулативе у Кини, Индији и другим земљама које су биле значајни увозници ове сировине, а од 2018. године су забранили њен увоз. Стога се почело са истраживањем могућности рециклаже пластике, и једно од могућих решења налази се и у њеном коришћењу у асфалтним мешавинама.

Треба имати у виду да је рециклажа пластике релативно компликована и да постоји велики број типова пластичних материјала који имају врло различит хемијски састав. Према класификацију коју је развио SPI (Society for Plastics Industry) постоји седам типова пластике (табела 1).

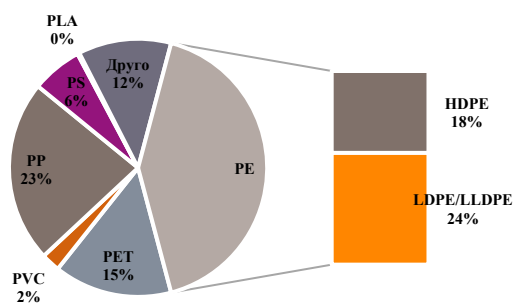
Ови типови се разликују по свом хемијском саставу и последично томе по својим физичким карактеристикама. Једна од најзначајнијих карактеристика, када се говори о примени за модификацију битумена и асфалтних мешавина, је тачка топљења. Уколико се пластика користи за модификацију битумена, она треба да се растопи и сједини са битуменом, док при примени у асфалтним мешавинама растопљена пластика треба да обавије зрна агрегата и тиме побољша његове карактеристике. Међутим, температура производње асфалтних мешавина се типично креће у распону од 160°C до 180°C зависно од типа битумена, што је ниже од тачке топљења за неке пластичне материјале, тако да се они и не растопе приликом мешања, па служе као делимична замена агрегата у асфалтним мешавинама.

Табела 1. Типови пластичних материјала [12,13]

Р. бр.	Тип пластике	Примена	Тачка топљења (°C)	Спец. густина
1	Полиетилен терефталат (PET)	боце за воду и газиране напитке, паковања за храну	> 250	1.38
2	Полиетилен велике густине (HDPE)	пластичне коверте, флексибилне цеви, столице и столови, играчке и опрема за игралишта	130, али варира у зависности од	0.96
3	Поливинил хлорид (PVC)	Цеви, електрични каблови, грађ. материјал, винил плочице	100-260	1.35 -1.40
4	Полиетилен мале густине (LDPE)	кесе, паковања за сокове и млеко	110-120	0.92
5	Полипропилен (PP)	шарке, цеви, столице, посуде за вишекратну употребу, лајсне	160-165	0.90
6	Полистирен (PS) и експандирани полистирен (EPS)	контејнери за храну, паковања за CD и DVD, посуђе за једнократну употребу, оквири регистарских таблица, пенасте чаше за пиће	100 (тачка омекшавања)	0.90 -1.06
7	Други Поликарбонат (PC), Полиактид (PLCA)	Бочице за бебе Делови за кола и авионе, Контејнери за храну	Зависи од типа пластике	

При примени пластике треба водити рачуна и о утицају на здравље људи и загађење животне околине. На пример, при загревању поливинил хлорида (PVC) долази до испарења која су опасна по људско здравље и због тога се избегава његова примена за справљање асфалтних мешавина [14].

На слици 3 је приказана структура пластичног отпада у оквиру чврстог отпада у урбаним зонама у Сједињеним Државама. На полиетилен (PE), укључујући HDPE и LLDPE/LDPE отпада око 41.7% пластичног отпада, а затим следе полипропилен (PP) који чини око 22.8% отпада и полиетилен терефталат (PET) са 14.8%. Полиетилен управо представља тип пластике који је најпогоднији за рециклажу у асфалтним мешавинама. Други типови или не могу да се растопе приликом производње асфалтних мешавина, или производе испарења штетна по околину и здравље [15].



Слика 3. Структура чврстог пластичног отпада [15]

Слично као код примене млевене гуме, и код пластичног отпада постоје два поступка примене: мокри и суви процес.

У оквиру мокрог поступка се пластика меша са битуменом, слично додатку полимерних модификатора, и потребно је механичко умешавање како би се добило хомогено везиво. За овај поступак је погодна рециклирана пластика са ниском тачком топљења, попут LLDPE, LDPE и HDPE. Процент пластике у мокрому процесу се креће од 2 до 8% у односу на масу битумена [12].

У оквиру сувог процеса рециклирана пластика се додаје директно у мешавину било као делимична замена агрегата, за модификацију мешавине или битумена, или као комбинација ових функција. За замену агрегата се типично користи пластични отпад који има високу температуру топљења (изнад температуре производње асфалтне мешавине), као што су PP, PET, полистирен (PS) и поликарбонат (PC), док се за модификацију мешавине могу користити сви други типови отпадне пластике изузев PVC, због штетних емисија хлорида.

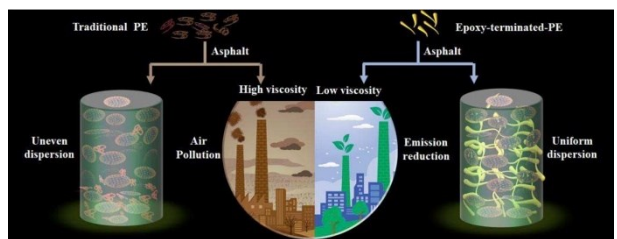
Када се у сувом процесу користи пластика са тачком топљења мањом од температуре производње асфалтне мешавине (нпр. LLDPE, LDPE и HDPE), она се топи приликом мешања са загрејаним агрегатом и обавија га, чиме се побољшавају његове физичке карактеристике. При томе, преостали део растопљене пластике бива растворен у мастиксу. Процент пластике у сувом процесу се креће од 0.2 до 1% у односу на масу агрегата [12].

Испитивања битумена модификованог са рециклираном пластиком су консистентно показала да он има мању пенетрацију и дуктилитет, и вишу тачку размекшавања и вискозитет, као и вишу високу температуру у оквиру класифика-

ције према Superpave Performance Grade (PG) [16]. Стога се може очекивати да је битумен модификован отпадном пластиком отпорнији на трајну деформацију и да има већу крутост. Међутим, ова модификација нема утицаја на отпорност на термичке пукотине, пукотине услед замора и блок пукотине [17], а повећани вискозитет може имати негативан ефекат на уградљивост и могућност збијања асфалтне мешавине [16].

Значајан проблем приликом мешања пластике и битумена мокрим процесом представља некомпатибилност ова два материјала која доводи до нестабилности и њиховог раздвајања током лагеровања и производње асфалтних мешавина. Због тога је значајан обим истраживања посвећен овом проблему са идејом да се истражи примена адитива за стабилизацију модификованог битумена. Више радова се бавило применом етилен-винил-ацетата (EVA) [18], наносиликата [19], полифосфорне киселине (PPA) [20], реактивног еластомерног терполимера (RET) [17,21], и стирен-бутадиен-стирена (SBS) [18], како би побољшали стабилност модификованог битумена.

Ли и ост. 2022 [22] су показали да модификација битумена са 3% до 5% епокси-терминисаног PE (EPE) даје стабилан модификовани битумен, али поред тога доводи до смањења вискозитета на високим температурама, што омогућава смањење температуре справљања асфалтне мешавине и побољшава реолошке карактеристике битумена. Шематски приказ поступка је приказан на слици 4.



Слика 4. Шематски приказ поступка са EPE за стабилизацију битумена модификованог са PE [22]

Примена отпадне пластике има позитиван ефекат на крутост и отпорност на трајну деформацију асфалтних мешавина. Механизам овог побољшања се разликује у зависности да ли се ради о мокрому или о сувом процесу. Код мокрог процеса основни разлог је повећање крутости и отпорности на трајну деформацију самог везива, док се код сувог процеса ради о повећању

унутрашњег трења између зрна агрегата, побољшању агрегата услед обавијања пластиком, модификацији везива, или комбинацији ових фактора.

У погледу отпорности на замор и пуцање, закључци приказани у литератури нису конси-стентни.

Бајпаи и др. [23] утврдили да агрегат обавијен са РР и др. бољу отпорност на удар, дробљење и хабање, бољу везу са битуменом, већу специфичну масу и смањено упијање воде, што доводи до супериорног понашања у односу на асфалтне мешавине са битуменом модификованим по мокром поступку.

3. ИНОВАТИВНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ У ОБЛАСТИ АСФАЛТНИХ МЕШАВИНА

Примена принципа одрживог развоја, све већи проблеми са доступношћу нових материјала и енергетских ресурса, као и потреба да се води рачуна о дугорочним ефектима у погледу понашања у експлоатацији асфалтних слојева и одговарајућих трошкова редовног и периодичног одржавања, као и о утицају на околину, довели су до тога да се у последњих 20-так година интензивирао развој више иновативних технологија за производњу и уграђивање асфалтних мешавина у оквиру радова изградње и одржавања коловозних конструкција на путевима, као и за коришћење коловозних конструкција за прикупљање енергије.

У овом поглављу биће дат кратак приказ две технологије: производња асфалтних мешавина по топлом поступку (енг. Warm Mix asphalt) и технологија само-зацељења (енг. Self-healing) асфалтних мешавина.

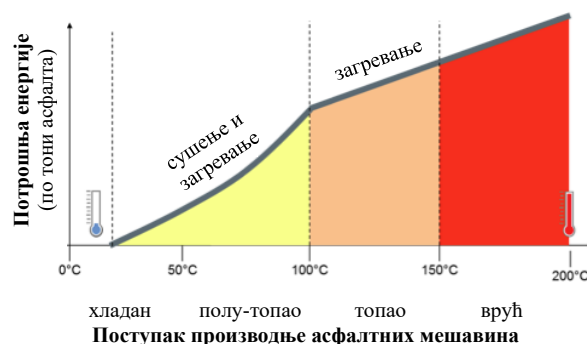
3.1. Асфалтне мешавине по топлом поступку

Производња асфалтних мешавина по топлом поступку укључује читав низ технологија које се користе да смање температуру мешања и збијања асфалтних мешавина за 20 до 40 °С, због чега оне имају више предности у односу на класичне асфалтне мешавине произведене по врућем поступку:

- Мање старење битумена током производње и олакшавање коришћења рециклираног струганог асфалта

- Могућност збијања на нижим температурама или продужетак времена доступног за транспорт и збијање мешавине, у случају задржавања температура мешања за асфалт по врућем поступку
- Брже отварање за саобраћај услед краћег времена потребног за хлађење асфалтног слоја
- Повољнији утицај на околину услед смањеног коришћења енергената и смањене емисије штетних гасова
- Побољшани услови рада за особље услед смањених емисија гасова током производње и уграђивања мешавина.

Са развојем ових технологија се започело на самом крају XX века. Међутим, оне су изузетно брзо прихваћене и данас се у све већој мери користе за извођење радова на путевима.



Слика 5. Класификација поступака производње асфалтних мешавина у зависности од температуре [24]

Температура производње асфалтних мешавина по топлом поступку је изнад 100 °С, што значи да овај поступак омогућава поступно сушење агрегата, што је изузетно важно у локалним условима у Србији и региону.

Постоји неколико различитих технологија које се користе за производњу асфалтних мешавина по топлом поступку.

Применом органских адитива на бази парафинских воскова који се добијају из природног гаса, смањује се вискозитет битумена на високим температурама, што омогућава снижавање температура мешања и збијања асфалтних мешавина за 20 до 30 °С, а досадашња искуства су показала и да се смањује деформабилност мешавина.

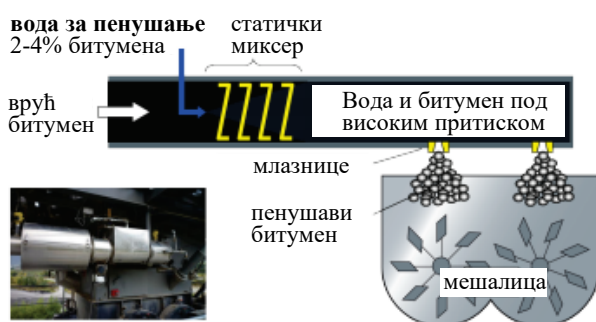
Хемијски адитиви не утичу на вискозитет битумена, већ смањују трење на контакту између битумена и агрегата у распону температура од 85 до 140 °С.

Последњу групу чине технологије које се заснивају на пенушању битумена, како би се смањило његов вискозитет, при чему се користе различити поступци да би се у овај процес увела релативно мала количина воде, која при додиру са врућим битуменом прелази у пару, повећава запремину битумена и краткотрајно смањује његов вискозитет. Степен повећања запремине и смањења вискозитета зависи од више фактора, укључујући количину воде и температуру битумена [25].

Две технологије се доминантно користе за дозирање воде:

- директно инјектирање путем млазница и
- додавање минерала на бази зеолита.

Директно инјектирање битумена путем млазница је приказано на слици.



Слика 6. Директно инјектирање воде путем млазница [24]

Техника индиректног пенушања битумена користи минералне материјале као извор воде. Обично се користе хидрофилни минерали из породице зеолита, који је кристално хидратисани алуминијум силикат који садржи око 20 процената кристалне воде, која се ослобађа на температури изнад 100°С, и у додиру са битуменом доводи до смањења његовог вискозитета и побољшане обрадивости у периоду од 6 до 7 сати, или док температура не падне испод 100°С.

Друга техника индиректног пенушања користи влагу из песка (или струганог асфалта) за стварање природно створене пене. То је секвенцијални поступак који се примењује у мањој мери.

Више студија бавило се истраживањем понашања мешавина по топлом поступку у фази експло-

атације. Закључено је да је понашање ових мешавина идентично или чак боље од традиционалних мешавина произведених по врућем поступку. Због боље обрадивости, врло често се постиже већи степен збијености у односу на класичне мешавине, што заједно са смањеним температурама производње смањује старење, повећава отпорност асфалтних слојева на пукотине услед замора и термичке пукотине и тиме и продужава њихов век. Побољшање обрадивости такође омогућава продужетак грађевинске сезоне, односно периода извођења радова.

3.2. Самозацељујуће асфалтне мешавине

Битумен, као виско-еластични материјал, представља кључни елемент процеса самозацељења асфалтних слојева. Битумен се састоји из две основне компоненте, асфалтена (чврста фаза) и малтена (течна фаза), при чему се малтени састоје из три компоненте: сатурата које чине углавном парафинска уља, ароматских уља и смола. Асфалтени имају велики поларитет и дефинишу вискозитет и крутост, док малтени имају мали поларитет и одређују флексибилност битумена. Приликом старења (оксидације) битумена, долази до конверзије ароматских уља у смоле и смола у асфалтене, што доводи до повећања крутости и кртости битумена, чиме битумен постаје мање отпоран на стварање пукотина.

У асфалтним слојевима коловозних конструкција под дејством саобраћаја долази до оштећења која се примарно манифестују у облику микропукотина. Међутим, у зависности од дужине периода између два оптерећења, као и у функцији од фактора околине, пре свега температуре, долази до делимичног или потпуног зацељења ових микропукотина, што значи да асфалтни слојеви сами по себи имају особину самозацељења (енг. self-healing).

Циљ технологије само-зацељења је да се додатно побољша овај ефекат, смањи ниво оштећења и продужи или обнови функционалност и животни век оштећеног материјала [26]. Применом ове технологије успорило би се старење асфалтних материјала у коловозним конструкцијама, продужио животни век путева и смањиле потребе за њиховим одржавањем. То би смањило количину природних ресурса који се користе за одржавање, самим тим и трошкове одржавања, а имало би и позитиван ефекат на

околину кроз смањење емисије гасова стаклене баште.

Q_{iu} и ост. [27] су дефинисали модел (једначина 1) за процес само-зацељења у зависности од времена и температуре:

$$H(t, T) = 100 \cdot \left[1 + \left(\frac{m}{t \cdot \alpha_t} \right)^{\frac{n}{\log 2}} \right]^{\log 2} \quad (1)$$

где је:

α_t – фактор помераја (енг. shift factor) за суперпозицију времена и температуре, који се базира на Arrhenius-овој једначини и дат је следећим изразом:

$$\log \alpha_t (T) = \frac{\Delta E_a}{2.303 \cdot R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (2)$$

m, n – параметри модела,

ΔE_a – привидна енергија активације (J/mol), и

R – универзална гасна константа, $R = 8.314$ J/(mol °K).

Само-зацељење асфалтних слојева на високим температурама је контролисано ефектом тиксотропије, који описује прелазак битумена из чврстог у течност стање, омогућавајући опоравак од структурног оштећења [28]. Познато је да се површинске пукотине на асфалтним површинама смањују/нестају током топлог времена, и поново се појављују током хладног времена [29]. Међутим, и при топлом времену, температура се релативно брзо смањује са дубином, што значи да само површински делови пукотина зацељују [30]. На слици 7 је приказан процес само-зацељења за две различите асфалтне мешавине: PBmas са путним битуменом пенетрације 70/100 и SBmas са полимер-модификованим битуменом [27].

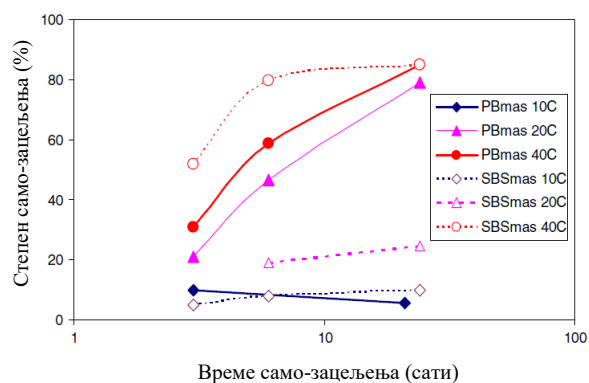
На основу резултата приказаних на слици 4 може се закључити да степен само-зацељења на температури од 10 °C износи испод 10%, и да температура испод 20 °C није довољна да би се постигао значајан опоравак асфалтних слојева.

На основу резултата приказаних на слици 7 може се закључити да је степен само-зацељења на температури од 10 °C мањи од 10%, и да температура испод 20 °C није довољна да би се постигао значајан опоравак асфалтних слојева.

Због тога постоји потреба да се овај ефекат побољша, било загревањем асфалтних слојева или додавањем одређених агенаса, који морају бити отпорни на услове који владају током производње, уграђивања и експлоатације асфалтних слојева у погледу дејства оптерећења

и услова околине. Q_{iu} и ост. [31] су дефинисали пет основних предуслова за агенсе за само-зацељивање асфалтних мешавина:

1. Добра компатибилност са битуменом
2. Стабилност при високим температурама
3. Отпорност на утицаје током умешавања и уграђивања асфалтних слојева
4. Температура само-зацељења између -30°C и 40°C
5. Могућност континуалног/поновљеног само-зацељења.



Слика 7. Процес само-зацељења асфалтних мешавина PBmas и SBmas на температурама од 10°C до 40°C [27]

Поступци само-зацељења који су до сада развијени, могу се груписати у три категорије:

1. Примена наночестица
2. Загревање (индукционо или микроталасно)
3. Примена агенаса за освежавање (енг. rejuvenation).

У оквиру овог поглавља биће дат преглед ова три поступка и сагледане могућности будућег развоја технологије само-зацељења асфалтних слојева.

3.1.1. Примена наночестица

Наночестице на бази глине (енг. nanoplay) се користе да побољшају отпорност на старење, реолошке и термичке карактеристике асфалтних мешавина [32]. Међутим, оне такође имају могућност и да зацеле микрорукотине у асфалтним слојевима тако што се крећу ка врху прслине због високе површинске енергије, и на тај начин заустављају даљу пропацију прслине [31]. Tabatabaei и Shafiee [33] су истраживали ефекат дужине и броја периода између два оптерећења (енг. rest periods) на век замора асфалтних мешавина модификованих органици

модификованим монтморионитом (ОММТ), при нивоима дилатације од 3% и 5% и закључили да додаток органске глине од 4% или више повећава век замора посебно код високог нивоа дилатације и код дужих периода између оптерећења. Они су развили три индекса за дефинисање степена само-зацељења у зависности од дужине периода између оптерећења и закључили да додаток наноглине побољшава ефекат само-зацељења асфалтних мешавина. Међутим, овај ефекат није детаљније истраживан и поставља се питање дугорочног понашања ових мешавина у експлоатацији, што може бити предмет будућих истраживања.

Слично наноглинама, модификатори на бази полимера и гуме се користе да побољшају физичко-механичке карактеристике битумена и да унапреде понашање асфалтних слојева [34-36]. Наночестице на бази гуме се такође могу користити за модификацију битумена и побољшање могућности само-зацељења асфалтног мастика. Qiu и ост. [27] су истраживали утицај модификације путног битумена 70/100 са различитим садржајем (0 до 5%) два типа наночестица на бази гуме (NanoA и NanoB) и показали да додаток наночестица у тачно одређеном проценту може побољшати само-зацељење које је одређивано у виду повратне еластичне деформације на узорцима за испитивање дуктилитета.

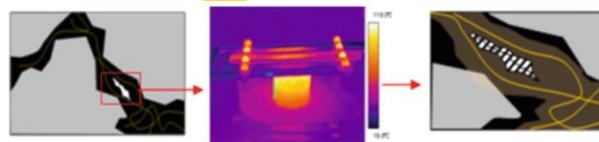
Основна предност модификације асфалтних слојева наночестицама на бази гуме је што оне у исто време повећавају трајност мешавине и имају улогу у процесу само-зацељивања. Међутим, основни недостатак представља некомпатибилност са битуменом као резултат различите густине, поларности, молекуларне масе и растворљивости, што доводи до нестабилности и раздвајања битумена и гуме на високим температурама.

3.1.2. Загревање асфалтних слојева

До сада су развијена два поступка која се користе за само-зацељење асфалтних слојева путем загревања: индукционо загревање и загревање микроталасима.

Код индукционог загревања у асфалтну мешавину се додају челична, графитна или карбонска влакна или челична вуна, како би побољшали проводљивост асфалтног слоја. Ова метода се заснива на примени електромагнетне индукције при протоку наизменичне струје која ствара магнетно поље. Проток струје је праћен дисипа-

цијом топлотне енергије која помаже да се смањи вискозитет битумена и да он попуни микропукотине. Овај поступак се може више пута понављати у случају поновног развоја микропукотина. Шематски приказ поступка је дат на **слици 5**.



Слика 8. Само-зацељење путем индукционог загревања порозног асфалта [37]

Загревање путем микроталаса се користи у процесу производње асфалтних мешавина, при рециклажи по топлом поступку на лицу места, за зимско одржавање коловоза, а може се користити и за само-зацељивање асфалтних слојева [38]. Предност овог поступка у односу на индукционо загревање је што није неопходно додати адитиве за побољшање проводљивости асфалтне мешавине, а и ако се додају ради побољшања дејства, њихове количине су више-струко мање у односу на индукционо загревање. То чини овај поступак значајно јефтинијим [39], а и ефикасност загревања путем микроталаса је већа, јер микроталасни грејач снаге 1.2 kW даје исту енергију загревања као и индукциони грејач снаге 50 kW [40].

Међутим, микроталасно зрачење може да има штетно дејство на живе организме и да доведе до термичког оштећења ткива. Микроталаси се, такође, често рефлектују од равних површина и тешко их је контролисати због ових рефлесија [38]. Због тога се врше даља истраживања у циљу побољшања ефикасности микроталасног зарастања асфалтних коловоза без угрожавања сигурности.

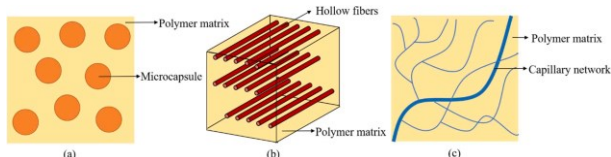
У неким случајевима је утврђено да је приликом микроталасног загревања температура везива била изнад 200°C, што може променити хемијску структуру битумена и довести до његове деградације.

3.1.3. Примена агенаса за освежавање

Примена агенаса за освежавање заснива се на додавању уља малог вискозитета са тежњом да се успостави однос асфалтена и малтена што ближи оном на почетку експлоатације асфалтног коловоза. Зато агенси за освежавање типично садрже лаке компоненте које се иначе

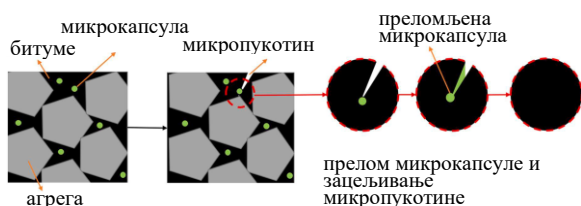
користе за побољшање реолошких карактеристика остарелог битумена. Досадашња истраживања укључују примену биљних уља, сунцокретовог уља, отпадних минералних уља и уља за кување, као и смола. Постоји такође неколико комерцијално развијених агенаса за освежавање као што су Reclamite, Rahole 1009, Cyclepave и ACF Itelene [41].

У почетку, ова уља су се наносила на површину коловоза како би пенетрирала у асфалтни слој и произвела ефекат само-зацељења. Међутим, било је тешко постићи степен пенетрације који би довео до ефективног освежавања асфалтне мешавине. Shen и ост. [42] су утврдили да ниједан од агенаса које су применили у истраживању није успео да продре дубље од 20 mm у асфалт-бетонски хабајући слој. Због тога су развијене различите технике за додавање ових уља у саму мешавину, које укључују микрокапсуле [43] и шупља влакна у форми цилиндара или микроваскуларних мрежа [44], слика 9.



Слика 9. Дозирање агенаса путем (а) микрокапсула, (б) шупљих влакана и (в) васкуларне мреже [40]

При примени микрокапсула, агенс за освежавање се налази у капсулама, које се дозирају у асфалтну мешавину приликом њене производње. Када се у оквиру асфалтног слоја формира микропукотина, током њене пропагације врх пукотине наилази на микрокапсулу, која се ломити и ослобађа агенс који се меша са битуменом и испуњава пукотину (слика 10). Основно ограничење овог поступка је немогућност да се он више пута примени након пуцања капсула. Због тога се врше истраживања контролисаног испуштања агенса из капсула која примењују достигнућа сличних техника у другим областима. [45]



Слика 10. Дејство агенса за подмлађивање у микрокапсулама [40]

У случају потребе за већом количином агенса могу се користити шупља влакна. Међутим, искуства са овим начином дозирања адитива у другим грађевинским материјалима су показала одређена ограничења при дејству ударног оптерећења, тако да је то ограничило и примену овог поступка у асфалтним мешавинама [46]. Стога се у новије време користе микроваскуларни системи који могу обезбедити вишекратно дозирање агенаса, увек када се пукотина укрсти са каналом кроз који се допрема агенс. Међутим, ово су за сада врло комплексни системи који се тешко примењују.

4. ЗАКЉУЧАК

У раду је приказано неколико поступака за примену алтернативних материјала, отпадне гуме и пластике, у асфалтним мешавинама, којима се могу са једне стране унапредити карактеристике ових мешавина, а самим тим и трајност асфалтних коловозних конструкција на путевима и смањити трошкови њиховог одржавања. Са друге стране, примена овим материјала у коловозним конструкцијама омогућава да се смање њихове депоније и штетан утицај на околину.

Иновативни приступ је такође присутан и у производњи и уграђивању асфалтних мешавина. Производња и уграђивање асфалтних мешавина по топло поступку омогућава значајне уштеде енергената, али и омогућава да се квалитетно изведу радови при неповољним временским условима.

Коначно, технике само-зацељивања асфалтних слојева, иако још увек у фази развоја, омогућиће такође продужетак века коловозних конструкција и смањење трошкова њиховог одржавања.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. Han, M. Zheng, C. Wang. Current status and development of terminal blend tyre rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 128, 2016, 399–409.
- [2] W.G. Buttlar, P. Rath. State of Knowledge Report on Rubber Modified Asphalt, Final Report, U.S. Tyre Manufacturers, 2021, 107.
- [3] H. Yu, Z. Leng, Z. Zhang, D. Li, J. Zhang. Selective absorption of swelling rubber in hot and warm asphalt binder fractions. *Construction and Building Materials*, 238, 2020, 117727.

- [4] R. West, D. Timm, R. Willis, B. Powell, N. Tran D. Watson, M. Sakhaeifar, R. Brown, M. Robbins, A. Vargas-Nordbeck, F.L. Villacorta, X. Guo, J. Nelson. Phase IV NCAT Pavement Test Track Findings. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 2012, 188.
- [5] P.J. Willis. Use of Ground Tire Rubber in a Dense-Graded Asphalt Mixture on US 231 in Alabama: A Case Study. In *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*, ASCE, 2013, 1192-1201.
- [6] L.P.T.L.Fontes, G.T.Jorge C.Pais, P.A.A.Pereira. Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(7), 2010, 1193-1200.
- [7] M.I. Souliman, M. Mamlouk, A. Eifert. Cost-effectiveness of Rubber and Polymer Modified Asphalt Mixtures as Related to Sustainable Fatigue Performance. *Procedia Engineering*, 145, 2016, 404-411.
- [8] T. Wang, F. Xiao, S. Amirghanian, W. Huang, M. Zheng. A review on low temperature performances of rubberized asphalt materials. *Construction and Building Materials*, 145, 2017, 483-505.
- [9] D.D. Carlson, H. Zhu, C. Xiao. Analysis of Traffic Noise Before and After Paving with Asphalt-Rubber. *Asphalt Rubber*, Brasilia, Brazil, 2003.
- [10] P. Donavan, C. Janello. Arizona Quiet Pavement Pilot Program: Comprehensive Report, SPR-577-2, Arizona Department of Transportation Research Center, 2018.
- [11] J. Harvey, J. Lea, C. Kim, E. Coleri, I. Zaabar, A. Loughalam, K. Chatti, J. Buscheck, A. Butt. Simulation of Cumulative Annual Impact of Pavement Structural Response on Vehicle Fuel Economy for California Test Sections. Research Report: UCPRC-RR-2015-05, University of California Pavement Research Center, 2016.
- [12] R. Willis, F. Yin, R. Moraes. Recycled Plastics in Asphalt, Part A: State of the Knowledge, NAPA - IS-142, National Asphalt Pavement Association, 2020.
- [13] C. Chin, P. Damen. Viability of Using Recycled Plastics in Asphalt and Sprayed Sealing Applications, AP-T351-19, Austroads, 2019, 46.
- [14] Sun, R., Irie, H., Nishikawa, T., Nakajima, A., Watanabe, T., Hashimoto, K. Suppressing effect of CaCO₃ on the dioxins emission from poly(vinyl chloride) (PVC) Incineration. *Polymer Degradation and Stability*. 79 (2), 2003, 253-256.
- [15] Environmental Protection Agency. Advancing sustainable materials management: 2018 Tables and figures. Assessing Trends in Materials Generation and Management in the United States December 2020.
- [16] S. Amirghanian. Investigations of Rheological Properties of Asphalt Binders Modified with Scrap Polyethylenes. A Report Submitted to Plastics Industry Association, 2018.
- [17] F. Yin, R. Moraes, M. Fortunatus, N. Tran, M.D. Elwardany, J. Planche. Performance Evaluation and Chemical Characterization of Asphalt Binders and Mixtures Containing Recycled Polyethylene, Report submitted to Plastics Industry Association, 2019.
- [18] H.I. Al-Abdul Wahhab, M.A. Dalhat, and M.A. Habib Storage Stability and High-temperature Performance of Asphalt Binder Modified with Recycled Plastic. *Road Materials and Pavement Design*, 18 (5), 2017, 1117-1134.
- [19] N. Bala, M. Napiyah, I. Kamaruddin, N. Danlami Rheological Properties Investigation of Bitumen Modified with Nanosilica and Polyethylene Polymer. *Materials Science - International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 4, 2017, 165-174.
- [20] Nejad, F.M., Zarroodi, R., Naderi, K. Effect of Cross-linkers on the Performance of Polyethylene-modified Asphalt Binders. *Construction Materials*, 170, 2017, 186-193.
- [21] R.K. Padhan and A. Screeram. Enhancement of Storage Stability and Rheological Properties of Polyethylene (PE) Modified Asphalt using Cross Linking and Reactive Polymer Based Additives. *Construction and Building Materials*, 188, 2018, 772-780.
- [22] Li M, Luo C, Zhu, L., Li, H., Cong, P, Feng, Y., Yan L. A novel epoxy-terminated polyethylene modified asphalt with low-viscosity and high storage stability. *Construction and Building Materials*, 335, 2022, 127473.
- [23] Bajpai, R., Khan, M.A., Sami, O.B. Yadav, P.K. Srivastava, P.K. A Study on the Plastic Waste Treatment Methods for Road Construction. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 3 (6), 2017.
- [24] The use of Warm Mix Asphalt, EAPA – Position Paper, European Asphalt Pavement Association, 2014.
- [25] Jenkins, K. Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. Doctoral Dissertation, Stellenbosch University, 2000.
- [26] H. Fisher. Self repairing materials – dream or reality. *Nat Sci*, 2(8), 2010, 873-901.
- [27] J. Qiu, M. van de Ven, S. Wu, J. Yu, A. Molenaar. Evaluating self healing capability of bituminous mastics. *Exp Mech*, 52, 2012, 1163-1171.
- [28] J. Verstraeten. Fatigue of bituminous mixes and bitumen thixotropy. In: 19th World road congress, AIPCR, Marrakech, Morocco, 1991.
- [29] C. Wu. Highway, heal thyself; cracking the code of self-healing asphalt could extend the life of roads. *Sci News*, 153, 1998, 60-63.
- [30] R.B. Mallick, B.L. Chen, J.E. Sias, P.S. Kandhal. Heating and its effect on hot in-place recycling of asphalt pavements with rejuvenator, *Int J Pavement Res Technol* 5(6), 2012, 347-359.

- [31] J. Qiu, M.F.C. van de Ven, S. Wu, J. Yu, A. A.A. Molenaar. Investigation of self healing capability of bituminous binders. *Road Mater Pavement Design, Special Issue on Asphalt Materials (ICAM 2009—China)* 10(1), 2011, 81–94.
- [32] C. Fang, R. Yu, S. Liu, Y. Li. Nanomaterials applied in asphalt modification: a review. *J Mater Sci Technol* 29(7), 2013, 589–594.
- [33] N. Tabatabaee, M.H. Shafiee. Effect of organoclay modified binders on fatigue performance. In A. Scarpas, N. Kringos, I. Al-Qadi, A. Loizos. Eds. 7th RILEM international conference on cracking in pavements – Mechanisms, Modeling, Testing, Detection, Prevention and Case Histories, Vol. 2, 869–878, RILEM Bookseries, Delft, The Netherlands, 2012.
- [34] H.T. Manh, A.P. Viet. Influence of fiber polymer reinforced asphalt concrete pavement in high temperature environment. In: Proceedings of the 2nd electronic international interdisciplinary conference (EIIC), Zilina, Slovak Republic. EICC, Zilina, 2013, 465–468.
- [35] T. McNally. Polymer modified bitumen, PmB. In: Polymer modified bitumen properties and characteristics. Woodhead, Philadelphia, 2011.
- [36] S.M. Abtahi, M. Sheikhzadeh, S.M. Hejazi. Fiber-reinforced asphalt-concrete – a review. *Constr Build Mater*, 24, 2010, 871–877.
- [37] Q. Liu. Induction healing of porous asphalt concrete. Ph.D. thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft, The Netherlands, 2012.
- [38] F. Gulisano, J. Gallego. Microwave heating of asphalt paving materials: Principles, current status and next steps. *Constr. Build. Mater.* 278, 2021, 121993.
- [39] J. Gallego, M.A. Del Val, V. Contreras, A. P’aez. Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing, *Constr. Build. Mater.* 42, 2013, 1–4.
- [40] B.R. Anupam, U.C. Sahoo, A.K. Chandrappa. A methodological review on self-healing asphalt pavements, *Constr. Build. Mater.* 321, 2022, 126395.
- [41] A. Tabakovic, E. Schlangen. Self-Healing Technology for Asphalt Pavements, In: Hager, M., van der Zwaag, S., Schubert, U. (eds) *Self-healing Materials. Advances in Polymer Science*, 273. 2015.
- [42] J. Shen, S. Amirkhani, J.A. Miller. Effects of rejuvenating agents on Superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *ASCE J Mater Civil Eng* 19(5), 2007, 376–384.
- [43] D.Y. Zhu, M.Z. Rong, M.Q. Zhang. Self-healing polymeric materials based on microencapsulated healing agents: From design to preparation. *Prog. Polym. Sci.* 49–50, 2015, 175–220.
- [44] C.M. Dry. Adhesive liquid core optical fibers for crack detection and repairs in polymer and concrete matrices. *Smart Structures and Materials 1995: Smart Sensing, Processing, and*
- [45] T. Lu, B. Li, D. Sun, M. Hu, J. Ma, G. Sun. Advances in controlled release of microcapsules and promising applications in self-healing of asphalt materials *J. Clean. Prod.* 294, 2021, 126270.
- [46] R.S. Trask, G.J. Williams, I.P. Bond. Bioinspired self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres. *J. R. Soc. Interface* 4 (13), 2007, 363–371.