Испитивање опоравка полимер модификованих битумена при течењу услед вишеструког оптерећења и растерећења

Андрија Грашић¹, Марко Орешковић¹, Горан Младеновић¹

¹ Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија

ПОДАЦИ О РАДУ

DOI: 10.31075/PIS.66.03.04

Стручни рад

Примљен: 20.06.2020

Прихваћен: 30.09.2020

Кореспондент аутор:

grale93@hotmail.com

Кључне речи:

MSCR

SUPERPAVE

Полимер модификовани битумен

Отпорност на трајну деформацију

РЕЗИМЕ

У оквиру овог рада је анализирано понашање различитих полимер модификованих битумена услед вишеструког оптерећења и растерећења (*Multiple Stress Creep Recovery - MSCR*). Понашање битумена у таквим условима је од великог значаја када се разматра отпорност битумена на трајну деформацију (колотраге) током експлоатационог периода. За потребе овог рада је извршено испитивање пет полимер модификованих битумена, од два произвођача, под истим условима у погледу температуре и нивоа оптерећења. Након тога, битумени су категорисани применом нове *MSCR* спецификације, у складу са *SUPERPAVE* методологијом.

1. Увод

Полимер модификовани (ПМ) битумени се све више употребљавају за справљање асфалтних мешавина намењених за путеве са тешким саобраћајним оптерећењем. Полимеризацијом обичног битумена побољшавају се његове карактеристике, као и карактеристике асфалтних мешавина: отпорност на трајну деформацију, отпорност на ниске температуре, замор, итд.

Једна од најчешћих деформација код флексибилних коловозних конструкција су колотрази, који настају услед дејства саобраћајног оптерећења на високим температурама или услед слабе носивости постелице, тј. неадекватне структуре коловозне конструкције. У првом случају, карактеристике битумена значајно утичу на вероватноћу појаве колотрага и стога је важно познавати понашање битумена током експлоатације коловозне конструкције. Деценијама уназад развијају се модели који ће помоћи у бољем предвиђању развоја колотрага током експлоатације на основу карактеристика битумена, као основног примарног утицајног фактора у структури асфалтне мешавине.

У овој области најдаље су стигли истраживачи из Сједињених Америчких Држава (САД). У оквиру *SUPERPAVE* методологије развијен је *Performance Grade (PG)* систем класификације битумена који укључује одређивање карактеристика оригиналног,

краткотрајно и дуготрајно остарелог везива на прописаним високим, средњим и ниским температурама. Категоризација битумена се према овој класификацији врши према условима околине (клими) и саобраћајном оптерећењу, а битумени се означавају са *PG x-y*, где *x* представља највишу пројектну седмодневну температуру коловоза на 2 см од површине слоја, а *y* представља најнижу пројектну температуру коловоза. На овај начин предвиђа се понашање битумена у различитим експлоатационим условима (слика 1).

Слика 1. Основна испитивања по *PG* методологији

Извор: SHRP - A - 410: *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994.*

Испитивање битумена за потребе PG класификације се врши на DSR-у (*Dynamic Shear Rheometer* - реометар за динамичко смицање) [1], BBR-у (*Bending Beam Rheometer* - реометар за испитивање гредица на савијање на ниским температурама) [2] и у уређају за директно затезање [3]. Као резултат испитивања на DSR-у добијају се две величине: $|G^*|$ - комплексни модул смицања и δ - фазни угао. Код обичних путних битумена однос модула смицања и синуса фазног угла $G^*/\sin \delta$ има добру корелацију са отпорношћу битумена на трајну деформацију и зато је примењен у спецификацијама. Међутим, код ПМ битумена то није случај [4]. Разлог је то што се параметри $|G^*|$ и δ при испитивању на DSR-у мере при врло малим смичућим дилатацијама, како би били у зони линеарне вискоеластичности, где је код обичних путних битумена течење линеарно и независно од нивоа оптерећења. Код ПМ битумена течење није линеарно и зависи од нивоа оптерећења због преуређења полимерних ланаца [5].

Из овог разлога, првобитна PG класификација није могла да покаже позитивни утицај полимера на реолошке карактеристике битумена у реалним условима. Стога су за идентификацију полимера у битумену, односно за испитивање битумена код којих је разлика температура у PG класификацији једнака или већа од 92 °C коришћене тзв. PG+ спецификације које су укључивале додатне опите попут повратне еластичне деформације краткотрајно остарелог везива или фазног угла оригиналног везива, а испитивање модула смицања и фазног угла је вршено на температурама за један или два нивоа вишим од очекиваних температура у експлоатацији, како би се узело у обзир изузетно тешко саобраћајно оптерећење и услови одвијања саобраћаја.

Како би се утврдио утицај битумена на појаву колотрага, у САД-у (Минесота) је направљен пробни полигон од три асфалтне мешавине различитим битуменима: једним обичним (PG 58-28) и два полимер модификована (PG 58-34 и PG 58-40) [6]. Паралелно је извршено испитивање истих битумена након краткотрајног старења како би се одредиле вредности параметра $G^*/\sin \delta$ сваког битумена, а добијене вредности затим упоредиле са измереном дубином колотрага. Резултати испитивања су показали да не постоји добра корелација између посматраних параметара када је дубина колотрага већа од 15 mm.

Због свега наведеног, било је неопходно развити нову лабораторијску методу која би омогућила идентификацију модификације битумена и успостављање корелације са пропагацијом колотрага у асфалтним мешавинама у експлоатационим условима. Решење је пронађено у испитивању опоравка везива при течењу услед вишеструког оптерећења и растерећења (*Multiple Stress Creep Recovery Test* - MSCR).

2. MSCR опит

MSCR је један од експерименталних опита, део унапређеног „PG+“ система класификације, који укључује додатна испитивања која донекле исправљају уочене недостатке оригиналног PG система. Опит је настао као резултат развојне студије „*The Asphalt Pavement Technology Program*“ [7]. Поред тога што приказује бољу везу између карактеристика битумена и настанка колотрага у асфалтним мешавинама на високим температурама, на основу MSCR опита је успостављена и нова класификација обичних и ПМ битумена [8].

2.1. Поступак испитивања

Испитивања се изводе на DSR-у, уређају који се састоји од две паралелне плоче кружног облика (пречника 25 mm), на растојању од 1 mm, са могућношћу контролисања температуре испитивања. Између паралелних плоча се поставља краткотрајно остарели узорак везива, који се затим опсеца, како би узорак био у равни са ивицама плоча (слика 2).

Слика 2. Уграђивање и опсецање узорка за испитивање

Након достизања температуре испитивања, као и након одређеног периода кондиционирања, на узорак се наноси смичуће оптерећење у циклусима, тако што се горња плоча ротира у односу на доњу, са паузама у којима се дозвољава делимичан опоравак узорка. Ротација се врши следећим редоследом: A-B-A-C-A-B-A-C-A (слика 3).

Слика 3. MSCR опит - Илустрација једног циклуса оптерећења и растерећења у DSR-у (1)

Извор: R. Michael Anderson, "The Multiple-Stress Creep Recovery (MSCR) Test and Specification", Burlington, USA, 2011.

Слика 4. MSCR опит - Дијаграми оптерећења и дилатације током времена приликом испитивања у DSR-у

Испитивања се врше у складу са стандардима AASHTO T 350 [9] или EN 16659 [10] при којима се узорак оптерећује константним оптерећењем у одређеном временском периоду (1 s), а затим се дозвољава његов опоравак у растерећеном стању (без оптерећења) у трајању од 9 s. MSCR опит се састоји од више циклуса оптерећења и растерећења (типично по 10 циклуса на два нивоа оптерећења, од 0.1 kPa и 3.2 kPa) (слика 4). Циљ испитивања је одређивање еластичне компоненте смичуће деформације битуменског везива под утицајем вишеструког понављања оптерећења и растерећења на унапред одређеној температури (нпр. 58 °C, 64 °C, 70 °C,...) која одговара температури којој ће битумен бити изложен у фази експлоатације [11].

2.2. Обрада резултата

За одређивање отпорности битумена на трајну деформацију за оба нивоа оптерећења срачунавају се два параметра: J_{nr} (*non-recoverable creep compliance* – комплијанса везана за неповратно течење) и проценат опоравка (R). Параметар J_{nr} је мера заостале повратне дилатације у узорку након више циклуса оптерећења и растерећења и користи се као показатељ отпорности битумена на трајну деформацију. Параметар R дефинише повратак узорка у претходно стање после више циклуса оптерећења и растерећења узорка. R је добар показатељ присуства и утицаја полимерног модификатора у битумену, што се и види са слике 5. Дијаграм деформације обичног битумена је скоро хоризонталан током периода растерећења и не показује било какву повратну еластичност (крива има облик степеница – слика 5а). Са друге стране, код ПМ битумена (слика 5б) уочљива је велика повратна деформација која настаје током периода растерећења (крива има облик тестере).

Слика 5. Дијаграми дилатације узорка (а) обичног и (б) ПМ битумена током MSCR опита

Извор: A. Hanz, "MSCR Implementation and Impacts on Asphalt Binder Grading", Minneapolis, MN, USA, 2015.

Током трајања опита, при сваком циклусу се бележе следеће вредности:

- 1) Почетна дилатација на почетку сваког циклуса оптерећења - ε_0 ;
- 2) Дилатација на крају сваког периода оптерећења у циклусу тј. после 1s - ε_c ;
- 3) Дилатација на крају периода опоравка у циклусу тј. после 10s - ε_r ;
- 4) Напон смицања - τ (kPa).

Из ових вредности се срачунавају укупне дилатације после 1. и 10. секунде сваког циклуса:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_0 \text{ [kPa]} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \text{ [kPa]} \quad (2)$$

Процентуални опоравак настао током сваког од десет циклуса на оба нивоа напона (0.1 kPa и 3.2 kPa) се рачуна применом следећих једначина:

$$\varepsilon_r(100, N) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \cdot 100}{\varepsilon_1} \quad (3)$$

$$\varepsilon_r(3200, N) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \cdot 100}{\varepsilon_1} \quad (4)$$

Слика 6. Одређивање J_{nr} параметра из једног циклуса оптерећења и растерећења узорка битумена у DSR-у

Слика 7. Одређивање параметра R из једног циклуса оптерећења и растерећења узорка битумена у DSR-у

Просечан ниво опоравка на оптерећењима од 0.1 кПа и 3.2 кПа се рачуна на следећи начин:

$$R_{100} = \frac{\sum_{N=1}^{10} \varepsilon_r(100, N)}{10} \quad (5)$$

$$R_{3200} = \frac{\sum_{N=1}^{10} \varepsilon_r(3200, N)}{10} \quad (6)$$

Количник вредности дилатације у 10. секунди циклуса и укупног нанетог оптерећења даје вредност параметра J_{nr} за оба нивоа оптерећења:

$$J_{nr}(100, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{\tau} = \frac{\varepsilon_{10}}{100} \quad (7)$$

$$J_{nr}(3200, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{\tau} = \frac{\varepsilon_{10}}{3200} \quad (8)$$

На основу суме вредности J_{nr} из сваког од 10 циклуса под истим оптерећењем добијају се просечне вредности параметара $J_{nr,100}$ и $J_{nr,3200}$:

$$J_{nr,100} = \sum_{N=1}^{10} \frac{J_{nr}(100, N)}{10} [kPa] \quad (9)$$

$$J_{nr,3200} = \sum_{N=1}^{10} \frac{J_{nr}(3200, N)}{10} [kPa] \quad (10)$$

Као крајњи параметар, релевантан за процену отпорности на појаву колотрага користи се $J_{nr,3200}$, заједно са опоравком R_{3200} .

Параметар $J_{nr,diff}$, који представља процентуалну разлику просечних параметара J_{nr} за циклусе оптерећења од 0.1 кПа и 3.2 кПа:

$$J_{nr,diff} = \frac{J_{nr,3200} - J_{nr,100}}{J_{nr,100}} * 100\% \quad (11)$$

указује на осетљивост на оптерећење (нелинеарност). Уколико је вредност параметра већа од 75%, сматра се да је узорак осетљив на оптерећење у смислу да се деформација нелинеарно мења са оптерећењем. Вредност параметра је обично већа код битумена са већим температурним опсегом или код „мекших“ битумена.

2.3. Параметри J_{nr} и R као показатељи осетљивости на појаву колотрага

Посматрајући резултате са терена током година, како код обичних, тако и код ПМ битумена, и упоређујући их са резултатима лабораторијских испитивања, истраживачи су дошли до закључка да параметар J_{nr} чак може помоћи и у предвиђању дубине колотрага који настају током експлоатације флексибилних коловозних конструкција.

FHWA (Federal Highway Administration) је на свом полигону за убрзано наношење оптерећења (Accelerated Loading Facility - ALF), извела низ испитивања у погледу отпорности на колотраге асфалтних мешавинама са обичним и полимер-модификованим битуменима.

Опити су изведени на неколико врста полимер-модификованих битумена: битуменима са SBS (стирен-бутадиен-стирен), битумену са млевеном гумом, обичним битуменом, и Elvaloy-модификованим битуменом. Дубине измерених колотрага су на крају упоређене са резултатима испитивања битумена, како применом оригиналног PG опита ($G^*/\sin\delta$), тако и применом MSCR опита.

Резултати испитивања су показали да је веза између J_{nr} и измерене дубине колотрага (слика 8а) насталих у асфалтним мешавинама много боља од оне коју показује параметар $G^*/\sin\delta$ (слика 8б), без обзира да ли су у питању обични или модификовани битумени.

Добру корелацију између измерене дубине колотрага и параметра из PG+ система нарушавају вредности измерене код модификованих битумена, док је у случају обичних битумена корелација готово идеална [7].

Слика 8. Упоредни приказ везе дубине колотрага и (а) параметра J_{nr} и (б) параметра $G^*/\sin \delta$
Извор: Office of Pavement Technology, "The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure", USA, 2011.

Проценат опоравка (R) по MSCR спецификацији је показатељ могућности узорка да се врати у облик какав је имао пре наношења смичућег оптерећења. На слици 9 приказана је крива која представља еластични одговор битумена PG 58-34 на понављајуће смичуће оптерећење и растерећење. Експеримент је извршен 2013. године у MnDOT лабораторији за коловозне конструкције у савезној америчкој држави Минесоти [5]. Битумени са вредностима R изнад криве са дијаграма показују присуство полимера, и имају већу повратну (еластичну) деформацију након дејства смичућег оптерећења. Са порастом R%, смањује се вредност параметра J_{nr} и повећава се удео напона који примају полимерни ланци у битумену, чиме се повећава свеукупна издржљивост битумена.

У оквиру исте студије испитани су битумени чије вредности опоравка су врло ниске и они се налазе у наранџастом пољу на слици 9. Ови битумени, у складу са досадашњим искуствима, су највероватније обични битумени.

Слика 9. Примена MSCR испитивања за идентификовање полимера у битумену
Извор: R. M. Anderson, "Understanding the MSCR Test and its Use in the PG Asphalt Binder Specification", Asphalt Institute, USA, 2011.

2.4. MSCR класификација

На основу MSCR опита спроводи се другачији приступ корекцији при класификацији битумена испитиваних на вишим температурама у односу на PG класификацију. Код PG класификације, уколико је потребно испитивати битумен на високим температурама, при великом саобраћајном оптерећењу, захтевала би се температура испитивања виша од предвиђене за то подручје [7]. На пример, уколико се очекује оптерећење веће од 30 милиона стандардних осовина од 80 kN, при успореној брзини саобраћајног тока до 20 km/h, а на подручју је прописано испитивање на 64 °C, испитивање треба изводити на температури повећаној за два нивоа. То значи да би се захтевани опити вршили на температури повећаној за 2x6 °C, односно на 76 °C, што одговара битумену PG 76-22, иако битумен треба да буде примењен на 64 °C.

Уколико се занемаре овакви екстремни примери, може се закључити да стара спецификација ипак ефикасно функционише на обичним, немодификованим битуменима. Због тога није било потребно мењати њихову PG класификацију, већ је нови J_{nr} критеријум требало прилагодити понашању како обичних, тако и модификованих битумена, да би нова спецификација била релевантна за реално високе експлоатационе температуре. Како би се то остварило, препоручује се испитивање обичних битумена при крају опсега њиховог линеарног понашања. Већина обичних битумена је линеарна до смичућег напона од 3.2 kPa, док се код ПМ битумена који имају сличну температурну осетљивост тај опсег разликује. Наиме, пораст температуре за неколико °C може повећати J_{nr} ПМ битумена за више од два пута.

Тако ће обични битумени задржати вредност параметра J_{nr} при много већим оптерећењима од 3.2 kPa, док код полимер-модификованих битумена вредност параметра J_{nr} расте. Из тог разлога стара PG спецификација није давала задовољавајуће резултате када су у питању ПМ битумени. Потребно је напоменути и да испитивања у линеарном опсегу неће имати одговарајућу везу са критичним напоном уколико се везиво не понаша као вискозни флуид на тим температурама.

Предност нове MSCR спецификације је то што се испитивања битумена врше управо на оним високим температурама које се очекују током експлоатационог века коловозне конструкције. Уколико је климатска оцена битумена PG 64-XX или PG 58-XX, испитивања за потребе овог опита биће вршена управо на горњим температурама од 64 °C или 58 °C.

С друге стране, уколико се очекује велико саобраћајно оптерећење, захтеви нових спецификација ће се променити. Да би коловозна конструкција издржала повећање саобраћајног оптерећења, потребно је смањити вредност J_{nr} параметра, односно повећати крутост битумена, а што не значи да ће се мењати горња температура испитивања овог битумена. На пример, MSCR спецификација за саобраћај при уобичајеним брзинама саобраћајног тока захтева вредност за J_{nr} од највише 4.5 kPa⁻¹, а за успорени саобраћај или дуже трајање оптерећења захтева се мања вредност овог параметра, 2.0 или 1.0 kPa⁻¹ [8].

Сва испитивања треба вршити разматрајући експлоатационе услове, пошто се један фактор промене не може применити на свим ПМ битуменима. Нпр. са порастом нивоа саобраћајног оптерећења, вредност J_{nr} се умањује преко температурне оцене што омогућује прецизну процену понашања битумена на експлоатационим температурама.

Табела 2. Ознака за битумене и максималне вредности J_{nr} зависно од величине саобраћајног оптерећења

Саобраћајно оптерећење	Ознака битумена	Максимална вредност $J_{nr,3200}$
Стандардно саобраћајно оптерећење < 10 милиона CO од 80 kN	S	4.5 kPa ⁻¹
Тешко саобраћајно оптерећење 10 - 30 милиона CO од 80 kN	H	2.0 kPa ⁻¹
Веома тешко саобраћајно оптерећење ≥ 30 милиона CO од 80 kN	V	1.0 kPa ⁻¹
Екстремно саобраћајно оптерећење ≥ 30 милиона CO од 80 kN и мирујући саобраћај	E	0.5 kPa ⁻¹

Извор: AASHTO M 332 (Minnesota Department of Transportation, 2015)

У пракси ове ознаке се употребљавају на следећи начин: уместо досадашње ознаке, PG x-y, по новој MSCR спецификацији, битумени ће имати следеће типске ознаке – PG xX-x, где ће се уместо X стављати одговарајућа ознака која ће означавати очекивани ниво саобраћајног оптерећења. Тако ће, на пример, битумен који је по старој PG спецификацији имао ознаку PG 58-22, у новој спецификацији за тешко саобраћајно оптерећење носити ознаку PG 58H-22. Битумени са S ознаком ће бити еквивалентни обичним битуменима, док ће битумени са H, V и E ознакама представљати битумене са различитим нивоом модификације (табела 2) [12].

2.5. Испитивање и анализирање узорака битумена

У оквиру овог истраживања испитано је пет узорака различитих ПМ битумена од два различита произвођача (П1 и П2):

1. ПМ битумен 45/80-65 (П1)
2. ПМ битумен 25/55-55 (П1)
3. ПМ битумен 45/80-65 (П2)
4. ПМ битумен са додатком адитива за топли асфалт (П1)
5. ПМ битумен 45/80-65 који не задовољава границе пенетрације (П2)

Пре одређивања горње PG ознаке сваког од ових битумена измерена је пенетрација на 25 °C [13] и тачка размекшавања по методи прстена и куглице [14]. Резултати испитивања су приказани у табели 3.

Табела 3. Мерења пенетрације и тачке размекшавања узорака

Битумен	Карактеристика	
	Пенетрација (dmm)	Тачка размекшавања по ПК (°C)
1.	50.3	84.5
2.	45.0	67.7
3.	56.0	78.0
4.	45.6	76.0
5.	40.8	86.5

PG класификација битумена је извршена према стандарду AASHTO M320 [15]. Након уграђивања узорака између паралелних плоча, исти су постепено загревани до критичних високих температура, тј. до температуре на којој вредност параметра $G^*/\sin\delta$ пада испод 1 kPa. PG ознаке се формирају заокруживањем температура на нижи интервал од 6 °C (нпр. PG58, PG64, PG70 итд.) од оне температуре на којој је добијена вредност параметра $G^*/\sin\delta$ једнака или већа од 1 kPa. Како су за MSCR испитивање релевантне само више PG температуре, при одређивању PG ознака у оквиру ове студије нису одређиване ниске PG температуре. У табели 4 су приказани резултати испитивања битумена.

Табела 4. Одређивање PG ознаке према AASHTO M320

Битумен	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	Измерена темпер. (°C)	Темпер. при $G^*/\sin\delta=1$ kPa (°C)	PG ознака
1.	0.901	88.02	86.11	PG82
2.	0.865	81.97	80.50	PG76
3.	1.16	88.01	/	PG88
4.	0.895	88.04	86.57	PG82
5.	1.09	87.99	/	PG88

Због технолошких ограничења DSR уређаја (температура загревања узорка не може прећи 88 °C), за битумене 3 и 5 није било могуће одредити тачну вредност температуре, као ни тачну PG ознаку. Међутим, с обзиром да су вредности $G^*/\sin\delta$ биле нешто изнад 1 kPa, може се са великом сигурношћу претпоставити да температура не би достигла следећи интервал од 94 °C, па је њихова PG ознака усвојена као PG 88.

MSCR опит је извршен у складу са стандардом AASHTO TP 70 [16], на краткотрајно остарелим узорцима битумена. Након испитивања су израчунате вредности параметара $J_{nr,3200}$ и R_{3200} у складу са једначинама (10) и (6), респективно. Испитивања су вршена на два нивоа оптерећења – 0.1 kPa и 3.2 kPa, и на једној температури испитивања (64 °C) која је одабрана на основу студије о пројектним температурама по SHRP и LTPP методологији на територији Републике Србије [17]. У студији се наводи да је за највећи део територије Републике Србије препоручена висока температура по овим методологијама 58 °C. Због глобалног загревања и његових последица у будућности, као и због нешто виших температура PG ознака испитаних битумена, одлучено је да се сва испитивања врше на 64 °C.

Приликом спровођења опита, најпре је наношено 10 циклуса оптерећења од 0.1 kPa у трајању од 1 s и растерећења у трајању од 9 s, а затим и 10 циклуса истог времена трајања оптерећења и растерећења, али са већим оптерећењем (3.2 kPa). Током трајања опита константно је мерена резултујућа дилатација и резултати су приказани на слици 10. Ради бољег сагледавања разлика у понашању битумена под оптерећењем од 0.1 kPa, приказан је и дијаграм дилатација-време испитаних узорака битумена са крупнијом размером вертикалне осе (слика 11).

На основу измерених параметара сваког циклуса, израчунате су просечне вредности параметара J_{nr} на различитим нивоима оптерећења, $R\%$ и $J_{nr,diff}$ у складу са једначинама 1-11 (табела 5).

Слика 10. Дијаграм кумулативна дилатација-време за оба нивоа оптерећења

Слика 11. Дијаграм кумулативна дилатација-време за ниво оптерећења од 0.1 kPa

Табела 5. Одређивање просечних вредности параметара $J_{nr,100}$, $J_{nr,3200}$, $J_{nr,diff}$ и R_{3200} за све узорке

Битумен	$J_{nr,100}$ (kPa ⁻¹)	$J_{nr,3200}$ (kPa ⁻¹)	$J_{nr,diff}$ (%)	R_{3200} (%)
1.	0.071	0.084	18.4	88.1
2.	0.457	0.715	56.5	42.4
3.	0.077	0.083	7.5	86.5
4.	0.166	0.268	61.8	64.7
5.	0.114	0.085	25.9	87.3

На основу израчунатих вредности просечног параметра $J_{nr,3200}$, могуће је одредити ознаке битумена у складу са нивоом саобраћајног оптерећења за које могу бити примењени (табела 3). Поштујући прописане опсеге овог параметра, испитани битумени по AASHTO M332 спецификацији имају следеће ознаке:

1. PG 64E-XX ($J_{nr} < 0,5 \text{ kPa}^{-1}$)
2. PG 64V-XX ($0,5 < J_{nr} < 1 \text{ kPa}^{-1}$)
3. PG 64E-XX ($J_{nr} < 0,5 \text{ kPa}^{-1}$)
4. PG 64E-XX ($J_{nr} < 0,5 \text{ kPa}^{-1}$)
5. PG 64E-XX ($J_{nr} < 0,5 \text{ kPa}^{-1}$)

Потребно је напоменути и да параметар $J_{nr,diff}$ свих испитаних узорак има апсолутну вредност мању од 75% што је показатељ да узорци нису преосетљиви на различите нивое оптерећења, односно да не показују велике разлике у понашању на два различита нивоа оптерећења (*non stress-sensitive*).

Анализирајући положаје тачака на дијаграму J_{nr} – R_{3200} (слика 12) може се закључити да сви узорци битумена испуњавају граничне услове за ова два параметра, потврђујући да су сви полимер-модификовани.

Слика 12. Дијаграми минималних вредности параметара J_{nr} и R_{3200} за полимер модификоване битумене

3. Закључци

Повећање саобраћајног оптерећења, као и глобално отопљавање доводе до повећане потребе за применом полимер-модификованих битумена. С обзиром да су ПМ битумени релативно нови материјали, а да су основна испитивања обичних битумена развијена знатно пре њихове појаве, неопходно је применити нове методе за њихово препознавање и класификацију. MSCR метода се због своје једноставности и ефикасности намеће као ефикасно решење. Брзина и примењивост опита постављају овај опит испред испитивања прописаних у PG+ методологији.

У оквиру овог истраживања испитано је пет различитих ПМ битумена од два различита произвођача применом MSCR опита. Испитивања битумена су извршена на температури од 64 °C, а затим су они класификовани у складу са захтевима одговарајућег стандарда. Резултати испитивања су показали да сви битумени, осим битумена 2 који има најнижу вредност T_{pk} , могу бити примењени за екстремно тешко саобраћајно оптерећење и за мирујући саобраћај, када се разматрају високе експлоатационе температуре и отпорност на појаву колотрага. Како би се извршила потпуна оцена могућности примене и на ниским температурама, потребно је извршити и испитивања на ниским температурама.

The use of multiple stress creep recovery test to characterize polymer modified bitumen

Andrija Grašić, MSc

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, grale93@hotmail.com

Marko Orešković, MSc

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, moreskovic@grf.bg.ac.rs

Goran Mladenović, PhD

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Abstract: The paper analyzes the performance of polymer modified bitumen due to multiple stress creep recovery (MSCR). This phenomenon is of great importance when considering binder's performance related to rutting resistance on high temperatures during exploitation period. The paper presents testing results of five polymer modified bitumen samples, obtained by two producers, tested under same temperature and stress levels. Finally, bitumen samples are classified under new MSCR specification, according to SUPERPAVE methodology.

Keywords: MSCR – Multiple Stress Creep Recovery, SUPERPAVE, Polymer Modified Bitumen, rutting resistance

Литература

- [1] AASHTO T 315:2020 - Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
- [2] AASHTO T 313:2019 - Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)
- [3] AASHTO T 314:2012 - Standard Method of Test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)
- [4] Kennedy, T. (2015). *Asphalt Binder Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Overview*. Minneapolis: Minnesota Department of Transportation.
- [5] Anderson, R. M. (2011). *Understanding the MSCR Test and Its Use in the PG Asphalt Binder Specification*. USA: Asphalt Institute.
- [6] D'Angelo, J., Dongre, R. "Superpave binder specifications and their performance relationships to modified binders." *Proceedings Canadian Technical Asphalt Association*, Vol. 47, 2002, pp. 91-103
- [7] Office of Pavement Technology. (2011). *The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure*. USA.
- [8] AASHTO M 332:2020 – Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test
- [9] AASHTO T 350:2019 - Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
- [10] SRPS EN 16659:2017 – Битумен и битуменска везива – Испитивање опоравка везива при течењу услед вишеструког оптерећења и растерећења (MSCRT)

- [11] Asphalt Institute Technical Advisory Committee. (2010). Guidance on the Use of the MSCR Test with the AASHTO M320 Specification. USA.
- [12] Hanz, A. (2015). *MSCR Implementation and Impacts on Asphalt Binder Grading*. MN, USA.
- [13] SRPS EN 1427:2017 – Битумен и битуменска везива – Одређивање пенетрације иглом
- [14] SRPS EN 1426 - Битумен и битуменска везива – Одређивање тачке размекшања – Метода са прсеном и куглицом
- [15] AASHTO M 320:2017 - Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder
- [16] AASHTO TP 70:2013 - Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
- [17] Младеновић, Г., Кнежевић, И., Ђукић, Д. и Ђурековић, А. (2008) Примена класификације битумена према методологији SUPERPAVE у Србији. *Пут и саобраћај*, LV, 2, 12-22