

ПРИКАЗ САВРЕМЕНИХ ПОСТУПАКА ЗА ИСПИТИВАЊЕ РЕОЛОШКИХ КАРАКТЕРИСТИКА БИТУМЕНА И ОДГОВАРАЈУЋЕ ОПРЕМЕ У ЛАБОРАТОРИЈИ ЗА КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

мр Горан Младеновић, дипл. грађ. инж.
Александар Ђурековић, дипл. грађ. инж.
Грађевински факултет, Београд

Научни рад

Резиме: У раду је представљена савремена методологија за испитивање реолошких карактеристика битумена и новоинсталирана опрема у Лабораторији за коловозне конструкције Грађевинског факултета у Београду. Поред тога, дати су и резултати испитивања два узорка полимер-модификованог битумена који су коришћени током 2007. године за производњу асфалтних мешавина на пројекту рехабилитације постојећег коловоза на ауто-путу Нови Сад – Београд.

Кључне речи: испитивање битумена, реолошке карактеристике, SUPERPAVE, модул смицања, фазни угао, вискозитет

REVIEW OF ADVANCED PROCEDURES FOR TESTING OF BITUMEN RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND APPROPRIATE EQUIPMENT IN THE PAVEMENT LABORATORY AT THE CIVIL-ENGINEERING FACULTY

Goran Mladenović, M.Sc. B.Sc. (CE)
Aleksandar Đureković, B.Sc. (CE)
Civil Engineering Faculty, Belgrade

Scientific Paper

Abstract: SUPERPAVE methodology for investigation of performance based characteristics of binders is widely used, especially in the United States for more than ten years. SUPERPAVE methodology has found its way in binder characterization in Serbia as well. This paper presents basic concepts behind SUPERPAVE binder characterization, its implementation and practical approach for investigation on the newly

installed equipment at the Laboratory for Pavement Materials at University of Belgrade. Also, results from testing of two modified binder candidates used during construction and rehabilitation of the wearing courses on Motorway Novi Sad – Belgrade are presented as well as some comments on the results obtained during testing.

Key words: bitumen testing, performance based characteristics, SUPERPAVE, shear modulus, phase angle, viscosity

УВОД

Лабораторија за коловозне конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду је током 2007. године модернизована и опремљена новом, савременом опремом за испитивање битумена и асфалтних мешавина. Највећи део опреме за испитивање реолошких карактеристика битумена је набављен уз помоћ Министарства науке Републике Србије, док је преостала опрема за испитивање битумена и асфалтних мешавина добијена као донација Европске агенције за реконструкцију ЈП „Путеви Србије“, а лоцирана је на Грађевинском факултету.

Постојећи европски и домаћи стандарди за утврђивање квалитета битумена заснивају се на испитивању тзв. емпиријских карактеристика битумена (пенетрација, дуктилитет, тачка размекшавања). Основни недостаци ових карактеристика су што се оне тешко могу повезати са било којом реолошком особином битумена и што се на основу њих не може добити информација о понашању материјала на одређеној температури, односу еластичне и вискозне компоненте деформације и зависности деформације асфалтне мешавине од времена трајања оптерећења.

У појединим земљама се уместо пенетрације, за дефинисање врста битумена користио или се користи вискозитет. Динамички или апсолутни вискозитет је карактеристика идеално вискозних материјала и битумен се тако понаша само на високим температурама. Међутим, на температурама на којима се асфалтна мешавина налази у фази експлоатације, вискозитет битумена, због његове вискоеластичне природе, зависи и од стања напона и од брзине нашошења оптерећења, тако да мерење само у једној тачки, односно под само једном комбинацијом ових параметара није довољно да би се описало стварно понашање асфалтне мешавине у фази експлоатације.

У Сједињеним државама се већ 10-так година примењује методологија SUPERPAVE за класификацију битумена на бази понашања у фази експлоатације у одређеним климатским

условима (тзв. PERFORMANCE GRADE). Ова методологија се заснива на идентификацији и утврђивању реолошких карактеристика битумена значајних за понашање битумена при одређеним температурама, трајању оптерећења и старости. У оквиру Европског комитета за стандардизацију се тренутно ради на развоју друге генерације хармонизованих европских стандарда за испитивање битумена, који ће се у највећој мери заснивати на испитивању реолошких карактеристика битумена и следи приступ примењен у SUPERPAVE-у.

ПОНАШАЊЕ БИТУМЕНА У АСФАЛТНИМ СЛОЈЕВИМА КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ У ФАЗИ ЕКСПЛОАТАЦИЈЕ

Да би се карактеристике битумена повезале са понашањем коловоза у фази експлоатације, подручје температуре се може поделити у четири зоне.

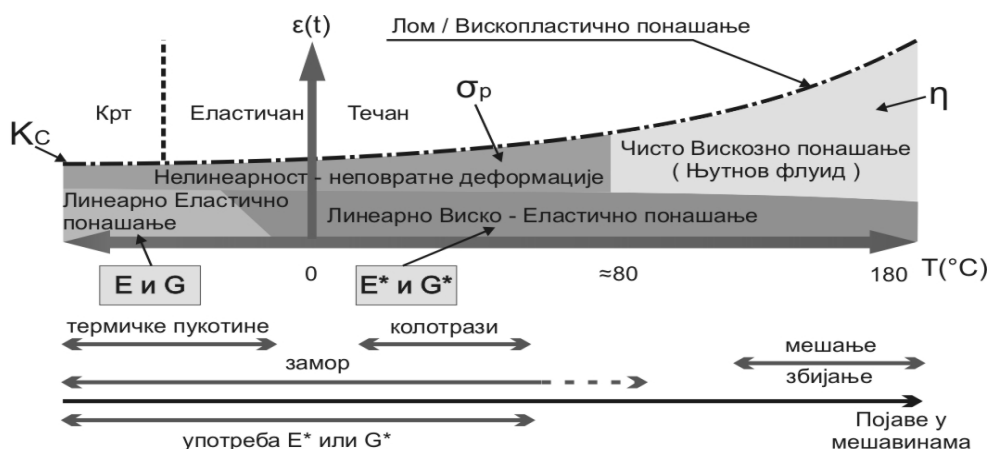
С обзиром да се битумен на високим температурама (изнад 100 °C) понаша као идеално вискозан материјал, његово понашање се може представити моделом Newton-овог флуида. Основна особина овог модела је да је вискозитет независан од брзине наношења оптерећења и нивоа напона. На овим температурама се асфалтна мешавина меша и уграђује/збија, тако да вискозитет представља основни параметар за одређивање еквивискозних температура мешања и збијања одређене врсте битумена.

У распону температура од 45 - 85 °C, који представља горњу зону распона температуре коловоза у фази експлоатације, битумен односно асфалтна мешавина се понашају као виско-еласто-пластичан материјал и главни механизам

оштећења коловоза је трајна пластична деформација односно колотрази. У овој температурној зони карактеристике битумена значајно зависе и од времена трајања оптерећења.

У средњем температурном распону (0 - 45 °C), битумени су генерално тврђи и еластичнији него на високим температурама. Доминантан вид оштећења на овим температурама су пукотине услед замора, које су проузроковане поновљеним циклусима оптерећивања и растерећивања, при чему су нивои оптерећења знатно мањи од чврстоће материјала при дејству статичког оптерећења. У току сваког циклуса оптерећења, оштећење зависи од нивоа напона и деформација у материјалу, као и од односа елеастичне и трајне компоненте деформације. За већу отпорност на пукотине услед замора боље карактеристике имају мекши и еластичнији материјали.

Четврта температурна зона обухвата ниске температуре (< 0°C) на којима су доминантни вид оштећивања термичке пукотине. Термичке пукотине су резултат термичких напона који настају као последица скупљања слоја услед хлађења. За време циклуса хлађења, слој се не може слободно скупљати због трења са доњим слојем који је топлији, или има мање скупљање због мањег коефицијента термичке дилатације. То трење проузрокује развој напона затезања, који могу превазићи чврстоћу на затезање и проузроковати настанак пукотина. Величина напона зависи од крутости везива и од његове способности да се напони релаксирају кроз дисипацију енергије. Традиционално, осетљивост на термичке пукотине је повезивана са крутошћу битумена под датим оптерећењем. Међутим, помоћу саме крутости се не може описати способност релаксације напона у везиву.



Слика 1: Понашање битумена у фази експлоатације зависно од нивоа оптерећења и температуре коловоза

Поред зависности од температуре, карактеристике, односно понашање битумена зависи и од старости асфалтне мешавине, с обзиром да у току производње и уградње, као и током експлоатације долази до старења битумена (испаривања лакних уља и оксидације) и повећања крутости. Тиме се на високим температурама повећава отпорност асфалтне мешавине на настанак трајних деформација. Међутим, на средњим и ниским температурама она постаје осетљивија на настанак пукотина услед замора и термичких пукотина. Стога је са аспекта симулације понашања асфалтне мешавине током експлоатационог века потребно утврдити карактеристике оригиналног, краткотрајно остарелог (чиме се симулира старење током процеса производње и уграђивања) и дуготрајно остарелог (услед старења током првих 5 до 10 година експлоатације) битумена.

ПАРАМЕТРИ НА ОСНОВУ КОЈИХ СЕ ОПИСУЈЕ ПОНАШАЊЕ БИТУМЕНА КАО ВИСКОЕЛАСТИЧНОГ МАТЕРИЈАЛА

У оквиру истраживања SHRP (Strategic Highway Research Program), битумен је третиран као линеарно високо-еластичан материјал и циљ је био да се дефинишу параметри који ће описати понашање битумена у четири карактеристичне температурне зоне у функцији трајања оптерећења, температуре коловоза и старости асфалтне мешавине.

На температурама изнад 100 °C асфалтна мешавина се меша и уграђује, па се стога мора испитати конзистенција, односно вискозитет битумена. Већина битумена на овој температури

се понаша као Newton-ов флуид, чије понашање је чисто вискозно, па је мерење вискозитета сасвим довољно за представљање могућности мешања и уградње асфалтне мешавине.

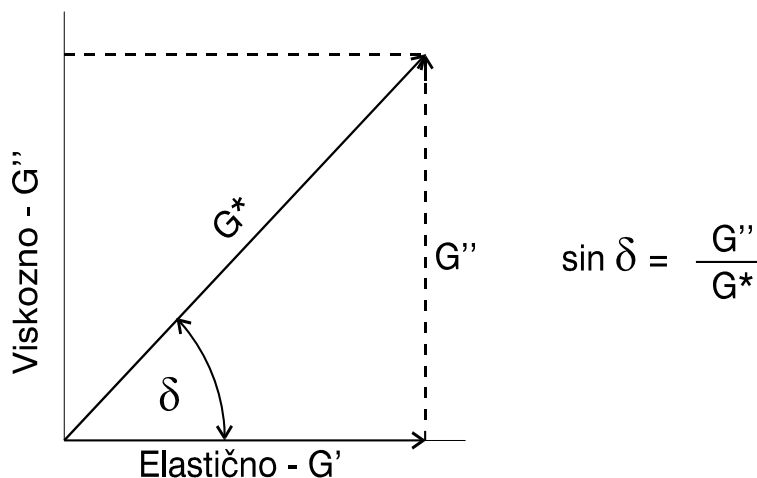
У распону температура од 0 до 85 °C карактеристике битумена зависе од времена трајања оптерећења и температуре и у програму SHRP битумен је моделиран као линеарни виско-еластичан материјал чије се понашање дефинише комплексним модулом смицања (G^*) и фазним углом δ . Комплексни модул смицања је индикатор укупне отпорности битумена/асфалтне мешавине на деформисање, док фазни угао дефинише расподелу те отпорности на еластичну и вискозну компоненту.

Комплексни (динамички) модул смицања је дат следећим изразом:

$$G^*(\omega) = \frac{|\tau(\omega)|}{|\gamma(\omega)|}$$

- где је:
- $G^*(\omega)$ - комплексни модул смицања при фреквенцији ω , Pa
 - $|\tau(\omega)|$ - апсолутна вредност магнитуде напона смицања, Pa и
 - $|\gamma(\omega)|$ - апсолутна вредност магнитуде дилатације смицања, m/m.

При анализи резултата динамичког испитивања, врло често се користе и друга три параметра: модул акумулиране енергије ($G'(\omega)$), модул изгубљене енергије ($G''(\omega)$) и фазни угао δ (слика 2).



Слика 2: Графичка презентација компоненти комплексног модула смицања G^*

Модул акумулиране енергије (G') представља индикацију о еластичној компоненти деформације у току сваког циклуса оптерећења, док модул изгубљене енергије (G'') представља енергију која се у сваком циклусу губи на трајну деформацију или се претвара у топлоту. Релативни однос тих компоненти је функција састава материјала, трајања оптерећења и температуре.

За идеално еластичан материјал, фазни угао δ је једнак нули, тако да се поклапају екстремне вредности напона и дилатације смицања. За идеално вискозан материјал, фазни угао је једнак 90° , тако да ће се у исто време јавити максимум напона и минимум дилатације. Битумен на ниским температурама тежи ка еластичном, а на врло високим ка вискозном понашању.

На основу испитивања већег броја узорака (2), закључено је да не постоји зависност између G^* и $\sin \delta$, односно да ова два параметра могу варирати у широким распонима за дату фреквенцију оптерећења и температуру. Због тога је неопходно вршити мерење оба параметра.

Реолошке карактеристике битумена могу се представити кроз варијацију G' и δ у зависности од фреквенције при константној температури (мастер криве), или кроз варијацију G'' и δ у зависности од температуре при константној фреквенцији (изохроне криве).

Уколико се узме да је настајање колотрага последица деформације само површинског слоја, колотрази се могу посматрати као деформација која настаје у условима контролисаног напона, под поновљеним оптерећењем.

У току сваког циклуса оптерећивања врши се одређени рад на деформацији асфалтног слоја коловозне конструкције. Део тог рада се враћа кроз еластично понашање површинског слоја, а преостали рад се губи на настанак трајне доформације и топлоту. Да би се стварање колотрага svelo на најмању меру, треба минимизирати другу компоненту деформационог рада. За вискоеластични материјал, рад утрошен на трајну деформацију у току циклуса оптерећења може се изразити као:

$$W_c = \pi \cdot \sigma_o^2 \cdot \frac{1}{G^* / \sin \delta}$$

где је: W_c - рад утрошен на формирање трајне деформације
 σ_o - амплитуда напона
 G^* - комплексни модул смицања и
 δ - фазни угао.

Из претходног израза се може закључити да је рад утрошен у току циклуса оптерећења на трајну деформацију обрнуто пропорционалан са параметром $G^* / \sin \delta$.

У оквиру параметра комбинује се укупан отпор на стварање деформације (кроз G^*) и релативна нееластичност везива (дата кроз $\sin \delta$). $\sin \delta$ је однос између модула G'' и комплексног модула G^* . Модуло G'' је директно пропорционалан раду који се утроши на трајну деформацију у току циклуса, тако да однос овог модула са комплексним модулом даје удео пластичне компоненте у односу на целокупан отпор стварању деформације.

Утицај везива на стварање трајне деформације може се повећати повећањем комплексног модула G^* или повећањем еластичности (смањењем $\sin \delta$).

Замор коловоза у средњем температурном распону (0 до 45°C) може се дешавати у условима контролисаног напона (дебели асфалтни слојеви) или контролисане дилатације (типично за танке слојеве). Пукотине услед замора се најчешће јављају у коловозним конструкцијама са танким асфалтним слојевима, па се може узети да је то процес са контролисаном дилатацијом који настаје због великих деформација у танким асфалтним слојевима.

За процес са контролисаном дилатацијом, рад који се троши на деформацију у току једног циклуса може се написати као:

$$W_c = \pi \cdot \sigma \cdot \epsilon_o \cdot \sin \delta$$

где је: W_c - деформациони рад
 ϵ_o - амплитуда дилатације
 σ - напон
 G^* - комплексни модул смицања и
 δ - фазни угао.

Како је:

$$\sigma = \epsilon_o \cdot G^*$$

заменом се може доћи до следећег израза:

$$W_c = \pi \cdot \epsilon_o^2 \cdot G^* \sin \delta$$

из кога се јасно види да је деформациони рад директно пропорционалан са фактором $G^* \sin \delta$ (1).

Рад сила за време једног циклуса оптерећења и растерећења може бити потрошен на један од следећих видова оштећења: стварање пукотина, развијање пукотина, претварање у топлоту или пластично течење. Да би се то спречило, најбоље је ограничити расипање енергије

лимитирањем вредности фактора $G^* \sin \delta$. Битумени са мањим вредностима G^* су мекши, и према томе могу поднети већу деформацију са мањим напрезањем. Битумени са мањим фазним углом су еластичнији, што значи да ће бити мања дисипација енергије на стварање пластичних деформација.

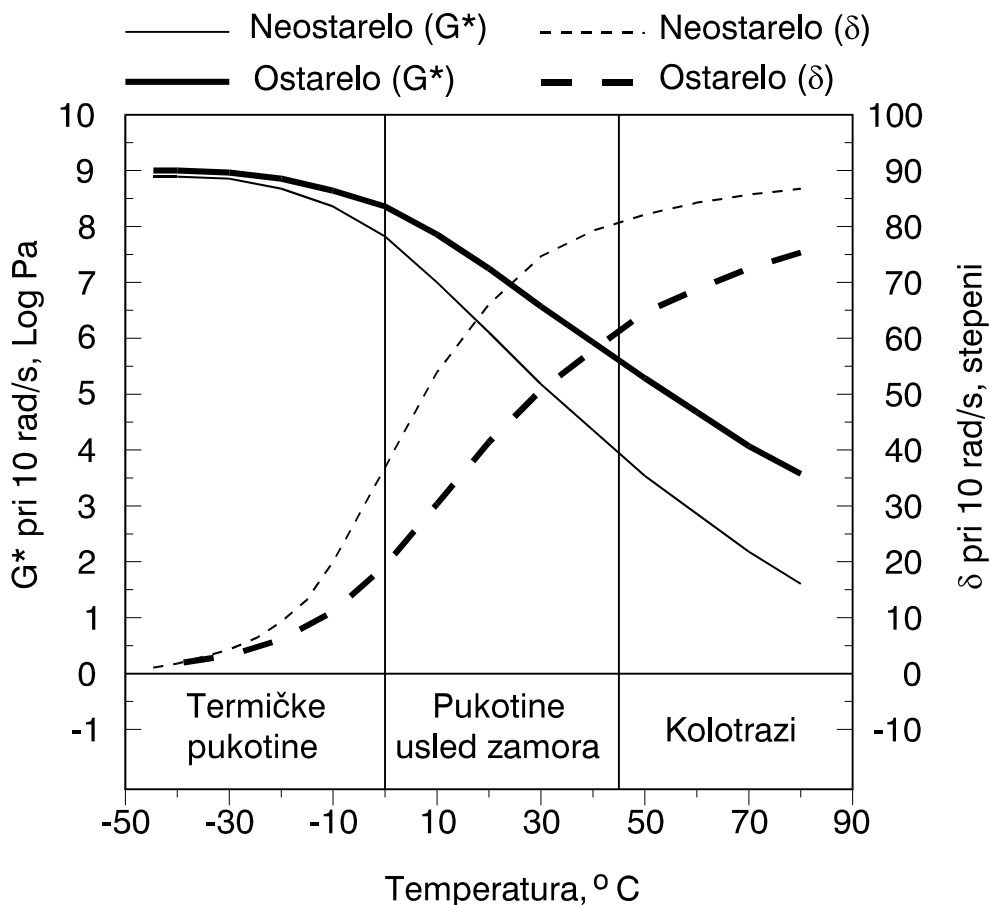
Анализа отпорности битумена на замор врши се на дуготрајно остарелим узорцима. То је критично за већину везива, зато што у току старења долази до пораста вредности комплексног модула G^* и то поништава утицај смањења вредности угла δ . Испитивање се изводи на средњим температурама.

Колотрази и пукотине услед замора су функција фреквенције оптерећења, па према томе брзина оптерећивања коловоза под саобраћајем треба да се симулира у току мерења да би се добила

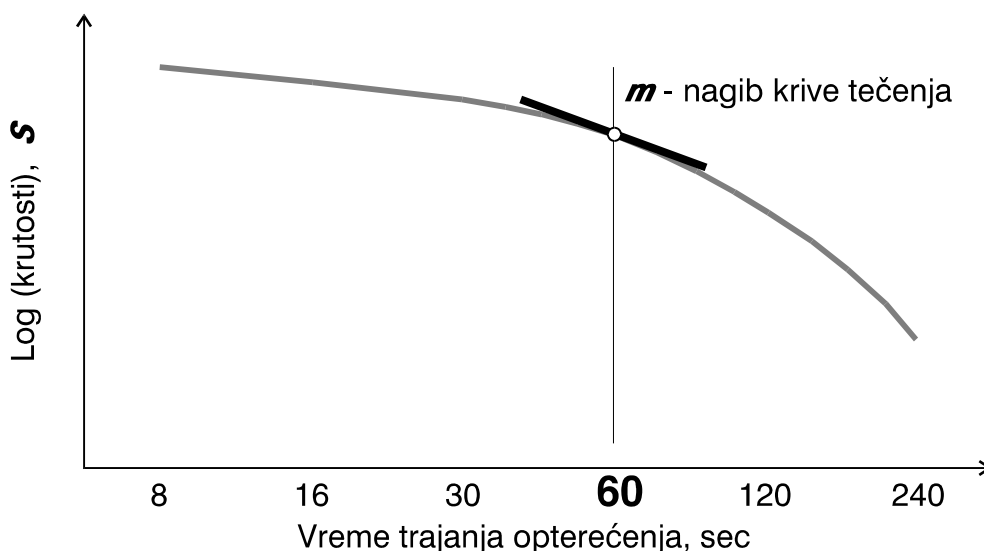
реална представа о утицају везива на понашање асфалтног слоја .

За већину битумена (све немодификоване и већину модификованих) старење проузрокује повећање вредности G^* и смањење $\sin \delta$. Ове промене доводе до веће отпорности на стварање деформација и веће еластичности, што значи већи отпор на стварање колотрага. С обзиром на то, за анализу отпорности везива на трајне деформације много су важније карактеристике оригиналног, неостарелог везива у односу на остарело. То је разлог што је у техничким условима за битумен дата минимална вредност за $G^*/\sin \delta$ која се мери на новом и краткотрајно остарелом везиву.

На слици 3 су приказане изохроне криве за један битумен, нов и остарео у подручју са умереном климом после 16 год. експлоатације.



Слика 3: Типично реолошко понашање битумена пре и после старења у односу на главне видове оштећивања коловоза (1)



Слика 4: Зависност модула крутости од времена трајања оптерећења

За време хлађења, крутост битумена се континуално повећава и резултира у све већим напонима за дату дилатацију скупљања. Истовремено, термички напони се релаксирају услед вискоеластичног течења везива. Да би се поуздано предвидео удео битумена у стварању термичких пукотина у асфалтном слоју, треба одредити крутост битумена S и степен релаксације. Крутост битумена је директно пропорционална модулу G^* , а степен релаксације директно зависи од фазног угла δ . Битумени са мањом крутошћу и већим степеном релаксације на ниским температурама су повољнији са аспекта отпорности на настанак термичких пукотина.

Модул крутости битумена се одређује на основу опита течења:

$$S(t) = \sigma_o / \varepsilon(t)$$

где је: $S(t)$ - модул крутости битумена који зависи од времена трајања оптерећења, Па
 t - време трајања оптерећења, s
 σ_o - константан једноаксијални напон (затезања или затезања при савијању), Па, и
 $\varepsilon(t)$ - резултујућа једноаксијална дилатација у време t , m/m.

Крутост $S(t)$ се мери на најнижим температурама коловоза очекиваним у фази експлоатације. Као и у другим температурним зонама, једно мерење крутости или вискозитета везива није довољно да би се изабрало оптимално везиво које ће бити отпорно на појаву пукотина на најнижим температурама. Због тога се при истим

температурама мери и нагиб криве течења у логаритамској размери $m(t)$, који показује способност везива да релаксира створени напон (слика 4).

Веће вредности $S(t)$ указују на веће вредности напона које произилазе из дате дилатације, а веће вредности $m(t)$ указују на већу могућност течења и бржу релаксацију напона, при чему оба параметра зависе од дужине трајања оптерећења.

ПРИКАЗ САВРЕМЕНЕ ОПРЕМЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ РЕОЛОШКИХ КАРАКТЕРИСТИКА БИТУМЕНА И ПРВИХ РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА

За испитивање везива користе се четири основне методе и оне чине основу за SUPERPAVE техничке услове и покривају цео температурни распон примене битумена. Те методе користе следећу опрему помоћу које се могу испитивати немодификовани и модификовани битумени, укључујући и везива у којима је модификатор распршен, растворен или је реаговао са основним битуменом:

- реометар са гредом оптерећеном на савијање (Bending Beam Rheometer – BBR)
- апарат за испитивање директног затезања (Direct Tension – DT)
- реометар за динамичко смицање (Dynamic Shear Rheometer – DSR)
- ротациони вискозиметар (Rotational Viscometer – RV)

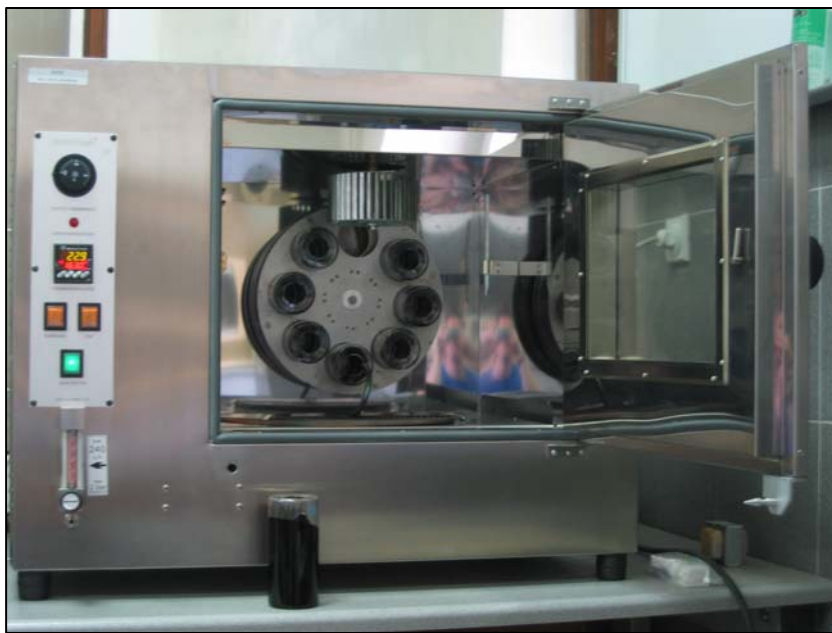
При томе је врло значајна температура на којој се врши испитивање и да ли се оно ради на

оригиналном, краткотрајно или дуготрајно остарелом везиву. Краткотрајно старење везива одвија се у RTFO (Rolling Thin Film Oven) приказаном на слици 5. Одређена количина битумена се налије у специјално пројектоване боце са отвором на горњој страни. Боце се ротирају око хоризонталне осе. То проузрокује да свежи филм везива буде континуално изложен дејству загрејаног ваздуха који се у боце уводи под притиском. Опит се изводи на 163 °C и траје 85 мин.

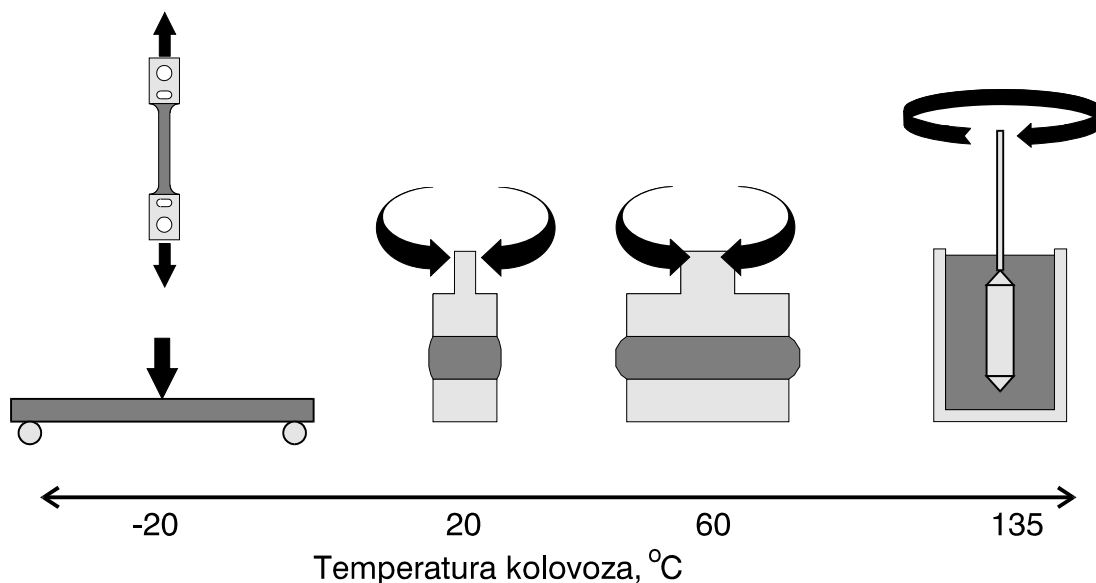
Дуготрајно старење, којим се симулира старење везива у првих 5 до 10 година експлоатације постиже се додатним старењем везива у посуди

за старење под притиском (Pressure Aging Vessel - PAV). Везиво из RTFOT-а се излије у металне калупе круног облика, а затим се уноси у суд са притиском. Дебљина везива је $3,2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ (приближно 35 g). Битумен се затим излаже ваздуху под притиском од $2100 \pm 100 \text{ kPa}$ у трајању од 20 часова при температури од 90, 100 или 110 °C, зависно од средње максималне недељне температуре коловоза.

На слици 6 су приказани основни опити и температуре при којима се они изводе, док табела 1 приказује основне услове извођења опита према методологији SUPERPAVE.



Слика 5. RTFOT



Слика 6: Основна испитивања битумена у систему SUPERPAVE (3)

Табела 1. Услови за извођење опита према техничким условима SUPERPAVE

Оригинално/ остарело везиво	Тип оштећења	Параметар	Температура	Уређај
Оригинално	уградљивост	вискозитет η	135 °C	RV
	Колотрази	$G^* / \sin \delta$	просечна 7-дневна највиша температура коловоза - max T	DSR
Краткотрајно остарело RTFOT	Колотрази	$G^* / \sin \delta$		DSR
Дуготрајно остарело PAV	Пукотине услед замора	$G^* \sin \delta$	$(\max T + \min T)/2 + 4$	DSR
	Термичке пукотине	S (t), m(t)	минимална температура коловоза – min T	BBR, DT

За одређивање модула смицања и фазног угла примењује се реометар за динамичко смицање (Dynamic Shear Rheometer – DSR), приказан на слици 7.

Како су G^* и $\sin \delta$ функције температуре и фреквенције оптерећења, према SUPERPAVE

спецификацијама се захтева испитивање битумена на просечној 7-дневној највишој температури коловоза при фреквенцији од 10 rad/s, која приближно одговара условима оптерећења под дејством саобраћајног оптерећења (брзина од приближно 100 km/h).



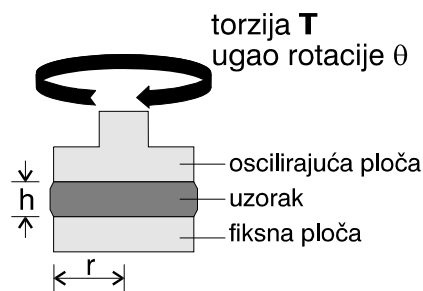
Слика 7. Реометар за динамичко смицање

Узорак везива дебљине 1 или 2 mm се ставља између две паралелне кружне плоче (пречника 8 или 25 mm). Дебљина зависи од крутости везива. Доња плоча је фиксна, а горња осцилира помоћу електронског мотора који контролише рачунар. Осцилације су обично мање од 0,1 степен и могу бити са различитим фреквенцијама. Температура узорка мора бити у оквиру $\pm 0,1$ °C од стандардне температуре испитивања.

За спорији саобраћај може се испитивање спровести са мањом фреквенцом. Рецимо, за

услове градског саобраћаја, може се користити фреквенца од 5 радијана у секунди, која одговара брзини од 50 km/h. Уместо промене процедуре испитивања, препоручљиво је у условима малих брзина возила, великих осовинских оптерећења или врло великог обима саобраћаја користити битумене са већим PG-ом, табела 1., односно отпорније на више температуре.

Приликом испитивања мере се угаона ротација (Θ) и сила торзије (τ) и срачунава се комплексни модул смицања G^* .

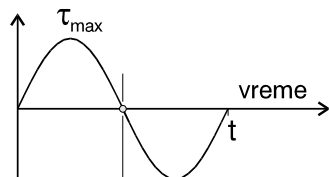


$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3}$$

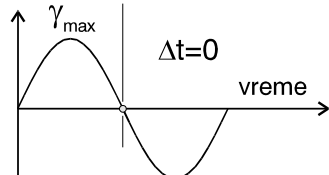
$$\gamma = \frac{\theta r}{h}$$

elastično $\delta=0^\circ$

напон смицања

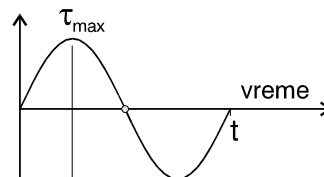


dilatacija смицања

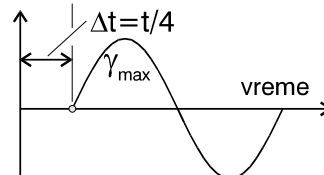


viskozno $\delta=90^\circ$

напон смицања

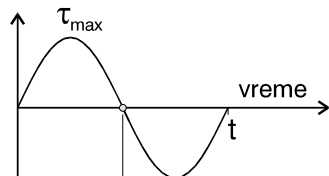


dilatacija смицања

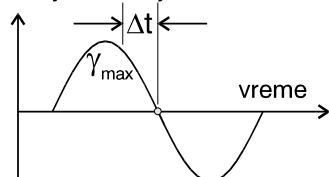


viskoelastično $0^\circ < \delta < 90^\circ$

напон смицања



dilatacija смицања



$$G^* = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}}$$

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \cdot 360^\circ$$

Слика 8: Опит динамичког смицања

Фазни угао δ се одређује на основу временске разлике између торзионог оптерећења и резултујуће дилатације смицања (угаоне ротације), при контролисаном напону, односно између индуковане дилатације смицања и резултујућег напона смицања при контролисаној дилатацији.

Техничким условима прописани су следећи параметри:

- вредност параметра $G^*/\sin \delta$ измерена на везиву после старења у RTFO мора бити већа од 2,2 kPa да би се минимизирала могућност настајања колотрага. Уколико се не деси очекивано старење у току уграђивања, уведено је ограничење да вредност крутости $G^*/\sin \delta$ на новом неостарелом везиву мора бити већа од 1 kPa при истој температури коловоза.
- да би се контролисао замор, вредност параметра $G^* \sin \delta$ након старења у RTFO и PAV старења мора бити мања од 5000 kPa, при одговарајућој просечној (названој "средњој") температури коловоза. Како просечна температура опада са смањењем највеће температуре коловоза, овај захтев може проузроковати да дати битумен, који задовољава критеријуме за PG 58- не задовољава критеријуме за PG 52- због захтева везаних за средњу, а не за највишу температуру.

Испитивање крутости битумена на ниским температурама обавља се помоћу реометра за савијање гредица (Bending Beam Rheometer – BBR), приказаног на слици 9.

Мерење се обавља на везиву дуготрајно остарелом у PAV (Pressure Ageing Vessel), с

обзиром да старењем везива долази до пораста вредности $S(t)$ и смањења $m(t)$. Испитивање се обавља на минималној температури коловоза увећаној за 10 °C.

Трајање оптерећења током испитивања треба да одражава поступак настајања термичких пукотина. Најчешће препоручиване вредности су између 3600 - 20000 s, што нису практична времена за извођење експеримента. Да би се скратило време оптерећивања, опит се изводи на вишим температурама. Закључено је да су фактори еквиваленције између температуре и времена приближно исти за све врсте битумена. То је искоришћено да се најчешће препоручиван период испитивања од 7200 s претвори у еквивалентан период дужине 240 s, повећањем температуре испитивања за 10 °C у односу на минималну очекивану температуру коловоза у фази експлоатације.

У техничким условима дате су максималне вредности за крутост S (60 s) од 300 МПа и минимална вредност за нагиб криве крутости m (60 s) = 0,3. На овај начин се ограничавају напони и захтева одређени степен релаксације.

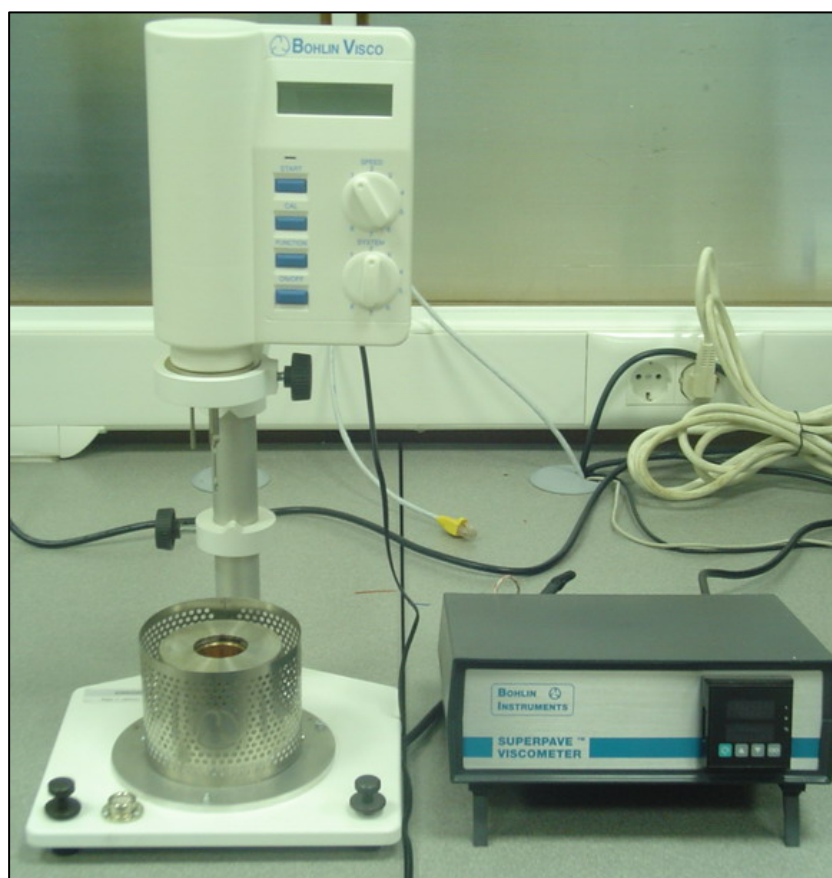
Физичко отврдњавање је још један ефекат дејства ниских температура на битумен. Оно је последица запреминског скупљања везива кроз време и огледа се у повећању крутости $S(t)$ и смањењу вредности $m(t)$. За многе битумене је закључено да физичко отврдњавање може повећати крутост битумена за 50 до 100 % у току 24 часа (2). Последице овог процеса на карактеристике асфалтних мешавина још нису проучене. У техничким условима за битумен се захтева мерење вредности $S(t)$ и $m(t)$ после 1 часа и после 24 часа да би се могло закључити о могућности појаве овог процеса за свако испитивано везиво.



Слика 9. Реометар за савијање гредица на ниским температурама

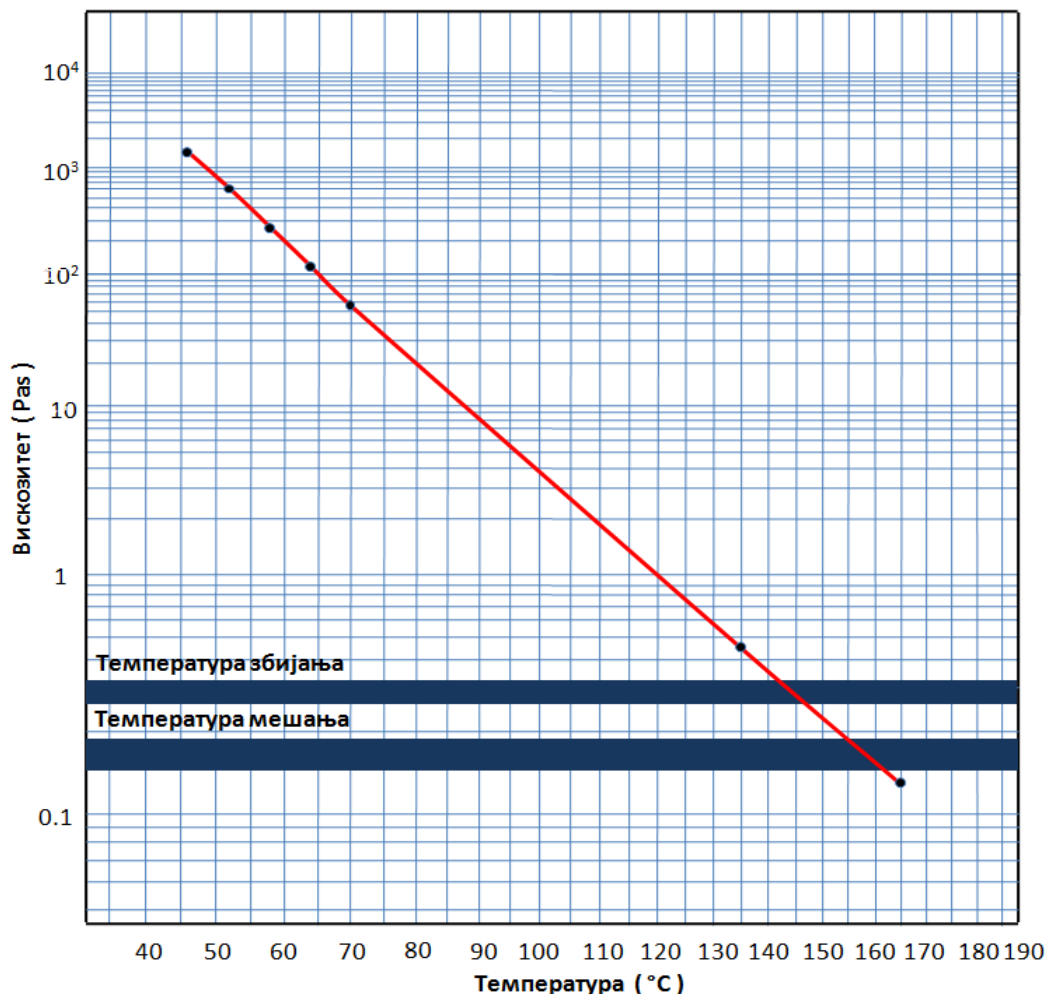
Поред испитивања течења, технички услови по SUPERPAVE-у обухватају и испитивање чврстоће на директно затезање. За многе материјале, карактеристике које они имају у фази пре лома најчешће се не поклапају са карактеристикама у фази лома. За немодификоване битумене је познато да њихове карактеристике у фази лома значајно зависе од крутости на ниским температурама. Због тога се у техничким условима не захтева одређена дилатација при лому, ако су задовољене вредности крутости и нагиба криве течења. Међутим, за модификоване битумене однос између крутости и карактеристика при лому може бити другачији. Зато је уведен опит директног затезања, при коме се може мерити дилатација при лому и заменити критеријум за крутост, ако се вредност крутости S (60 s) налази између 300 и 600 МПа. (1)

За испитивање вискозитета користи се ротациони вискозиметар (слика 10). Према SUPERPAVE техничким условима се захтева да битумен има максимални вискозитет од 3,0 Pa·s на температури од 135 °C. Применом овог уређаја, вискозитет се може испитати и на различитим температурама, и на основу тога се могу утврдити оптималне температуре мешања и збијања асфалтне мешавине у зависности од примењене врсте битумена – еквивискозне температуре (слика 11). Овај поступак је погодан за немодификована везива, док се код модификованих везива на овај начин добијају нереално високе температуре, па се морају применити кориговане вредности вискозитета (7).



Слика 10. Ротациони вискозиметар

Дијаграм Вискозитет - Температура



Слика11. Зависност вискозитета од температуре код битумена БИТ60

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА

У оквиру пројекта рехабилитације коловоза на аутопуту Нови Сад – Београд за израду асфалтне мешавине коришћен је полимермодификовани битумен са ознаком РmB50/90s. Радови су извођени употребом битумена два произвођача који су тренутно расположиви на тржишту, и у оквиру тога извршена су упоредна испитивања. Модификовани битумени су означени као ПmБ А и ПmБ Б. Ради поређења квалитета у анализу је укључен и немодификовани битумен ознаке БИТ60 као један од најчешће коришћених битумена у Србији.

Спроведена су стандардна испитивања емпиријских карактеристика, као и по методи SUPERPAVE на сва три узорка битумена. Као

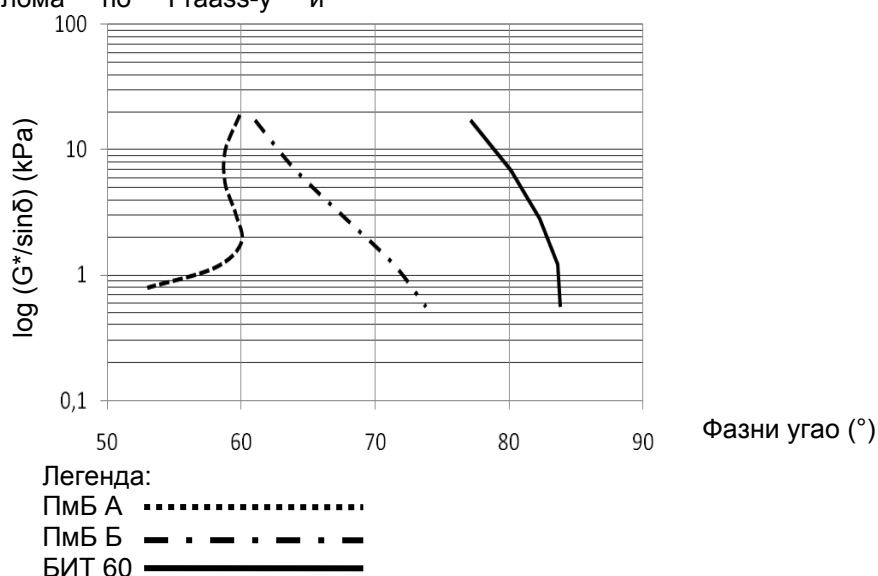
један од података за оцену квалитета полимермодификованог битумена рађена је и повратна еластична деформација на опиту дуктилитета као и опит стабилности приликом лагеровања (тзв. “туба” тест). Ова испитивања нису рађена за БИТ 60. Испитивања по методологији SUPERPAVE су извршена на оригиналном и краткотрајно остарелом везиву. За оригинална везива испитане су фундаменталне карактеристике на реометру за динамичко смицање и ротационом вискометру и одређена је тачка запаљивости. На краткотрајно остарелом везиву су одређени модул смицања и фазни угао на реометру за динамичко смицање, као и промена масе. Укупни резултати испитивања су приказани у табели 2.

Табела 2. Резултати испитивања два полимер-модификована и немодификованог битумена БИТ 60

Карактеристика	Јединица	Стандард	ПмБ А	ПмБ Б	БИТ60
Пенетрација на 25°C	x0.1mm	EN 1426:2007	73.1	71.6	56.4
Тачка размекшавања	°C	EN 1427:2007	80.3	84.2	52.1
Тачка лома по Fraass-y	°C	EN 12593:2007	-19	-21	-12
Дуктилиет на 25°C	cm	EN 13589:2003	86	73	>120
Повратна еластична деформација на 25°C	%	EN 13589:2003	98	96	-
Стабилност приликом лагеровања, разлика у ПК	°C	EN13399:2003	1.1	-	-
Старење у RTFOT на 163°C		EN12607:			
Промена у маси	%	EN12607:2007	0.05	-	0.6
Смањење пенетрације	%	EN1426:2007	31	-	50
Повратна еластична деформација на 25°C	%	EN13589:2003	93	-	-
Реолошке карактеристике материјала – Superpave					
Оригинално везиво					
Вискозитет на 135°C	Pa*s	EN13302:2006	1.305	1.100	0.401
Температура G*/sinδ=1.00kPa	°C	EN14470:2005	81	74	65
Краткотрајно остарело везиво					
Температура G*/sinδ=2.20kPa	°C	EN14470:2005	78	-	66

Посматрајући само резултате испитивања емпиријских карактеристика очигледна је сличност два модификована битумена у погледу пенетрације, тачке лома по Fraass-y и

размекшавања. Без дубљег улажења у анализу могло би се рећи да су резултати испитивања чак и на страни битумена ПмБ Б.



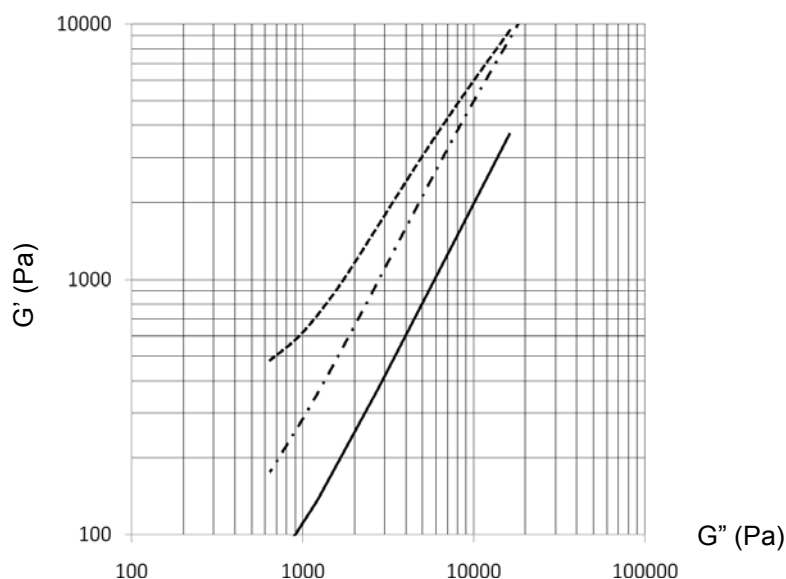
Слика 12. "Black Diagram", промена фазног угла са температуром

До битне разлике у класификацији два битумена долази тек после анализе резултата добијених пометодологији SUPERPAVE. Декларисана највиша температура употребљивости је за 7 °C виша код битумена ПмБ А него код ПмБ Б, што указује на супериорније карактеристике ПмБ А у погледу реолошког понашања на високим температурама. Овај резултат је поготово битан ако се има у виду да параметар $G^*/\sin\delta$ преко кога се дефинише максимална температура директно утиче на отпорност битумена на трајну деформацију, а самим тим и на отпорност асфалтне мешавине на појаву колотрага. Даљом анализом у погледу понашања материјала може се приметити да је фазни угао знатно нижи, и чак одржава константну вредност, код битумена ПмБ А указујући на изражену и постојану еластичност на високим температурама. Код битумена ПмБ Б вредност фазног угла има тренд пораста са порастом температуре испитивања. Дobar начин за приказ односа фазног угла и његове осетљивости на температуру је такозвани "Black Diagram" приказан на слици 12. На "Black Diagram"-у је на апсциси приказан фазни угао, на ординати параметар $G^*/\sin\delta$. Промена температуре се може уочити променом односа комплексног модула и $\sin\delta$ и то тако да се више температуре налазе на доњем делу ординате а ниже на горњем. Иако вредности фазног угла код битумена ПмБ Б не достижу вредности обичног битумена БИТ 60 очигледно је његово вискозније понашање на вишим температурама у односу на ПмБ А. Разлика између вискозне и еластичне компоненте, односно зависност вискозне од еластичне компонентне комплексног модула, може се уочити на "Cole-Cole" дијаграму приказаном на слици 13, где је на апсциси приказана вискозна компонентна а на ординати

еластична компонента модула смицања. Овај дијаграм је посебно интересантан јер директно показује која од две компоненте комплексног модула преовладава на вишим температурама. У овом случају виши положај криве за ПмБ А показује да и на високим температурама имамо знатан утицај еластичног дела комплексног модула. Карактеристика овог дијаграма је да је пораст температуре обрнут порасту вредности компонентни комплексног модула; нижа температура је на десној страни апсцисе а виша на левој.

Карактеристике краткотрајно остарелог везива су дале очекиване резултате. Губитак масе после старења у уређају RTFOT показује да су полимермодификовани битумени знатно отпорнији на утицај високих температура у процесу производње. Губици у маси су дали очекиване резултате јер и сама идеја модификације битумена јесте да му се продужи радни век и да се смањи утицај температуре приликом обраде и збијања. Ради поређења, губитак масе после краткотрајног старења код обичног битумена је за ред величине већи.

Измерена динамичка вискозност од преко 1.1 Pas код полимер-модификованих битумена указује на више еквивискозне температуре за асфалтне мешавине справљене са овим типом битумена. У поређењу са вискозитетом обичног битумена БИТ 60 овај податак долази до изражаја јер указује на потребу кориговања процеса производње и одређивања које су то температуре потребне да се на асфалтним базама припремају мешавине и на терену уграђују мешавине израђене са полимер-модификованим битуменом.



Слика 13. "Cole-Cole" дијаграм, зависност вискозне од еластичне компоненте комплексног модула

ЗАКЉУЧАК

Нова методологија за испитивање и класификацију битумена заснована на испитивању реолошких карактеристика везива омогућава, за разлику од примене емпиријских карактеристика, поузданије предвиђање понашања битумена и асфалтних мешавина у фази експлоатације. Применом одговарајућег везива за дате климатске услове и услове саобраћајног оптерећења може се у највећој мери избећи стварање трајних деформација, односно колотрага на високим температурама, односно настанак пукотина услед замора и термичких пукотина на средњим и ниским температурама.

Савремена опрема која је инсталирана у Лабораторији за коловозне конструкције на Грађевинском факултету у Београду омогућава да се наведена испитивања врше и на битуменима који су расположиви за извођење радова у Србији. Поред тога, на Грађевинском факултету је у току пројекат у оквиру кога се врши анализа климатских података за територију Србије и развој мапа са очекиваним максималним и минималним температурама коловоза у фази експлоатације. То ће омогућити боље вредновање расположивих везива и њихову адекватну примену у зависности од очекиваног саобраћајног оптерећења.

Све ово добија на значају ако се има у виду да ће нова генерација хармонизованих Европских спецификација за испитивање битумена бити заснована на испитивању реолошких карактеристика везива.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Bahia, H., Anderson, D. **The SHRP Binder Rheological Parameters: Why Are They Required and How Do They Compare to Conventional Properties**, Transportation Research Record 1488, National Research Council, Washington DC, 1995.
2. Anderson, D., Christensen, D., Bahia, H., Dongre, R., Sharma, M.G., Antle, C., Button, J. **SHRP - A - 369: Binder Characterization and Evaluation, Volume 3: Physical Characterization**, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994.
3. **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.
4. **Asphalt Binder Testing Technician's Manual for Specification Testing of Asphalt Binders**, Asphalt Institute MS - 25, Asphalt Institute, USA, 2007.
5. **SUPERPAVE Asphalt Binder Test Methods, An Illustrated Overview**, FHWA-SA-94-068, Federal Highway Administration i Asphalt Institute, Washington, D.C., 1994.
6. D.Sybilski. **New Simplified Equation for the Computation of Absolute Viscosity of Polymer-Bitumens**, Materials and Structures, Vol. 30, April 1997, pp 182-187.
7. Y.Yildirim, J.Ideker, D.Hazlett. **Evaluation of Viscosity Values for Mixing and Compaction Temperatures**, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No. 4, August 1, 2006