

# **Гибридные рецептуры вяжущих. Свойства, преимущества и методики испытаний: MSCR, % R.**

**Хусейн Бахия (Hussain U. Bahia), Ph.D.  
Профессор и директор центра MARC  
Висконсинский университет в Мэдисоне, США**

**Москва, Россия, декабрь 2019 г.**

# Решение: применение полимермодифицированных асфальтов для меньшего растрескивания дорожного покрытия



Низкотемпературное растрескивание



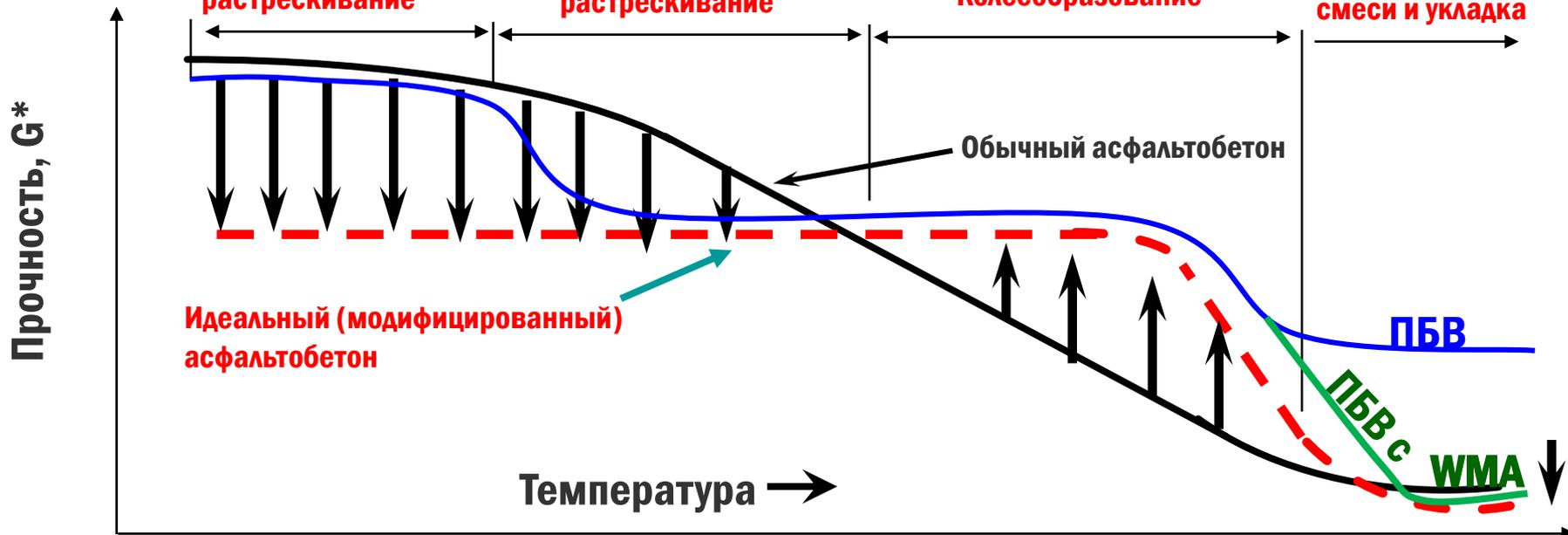
Усталостное растрескивание



Колееобразование

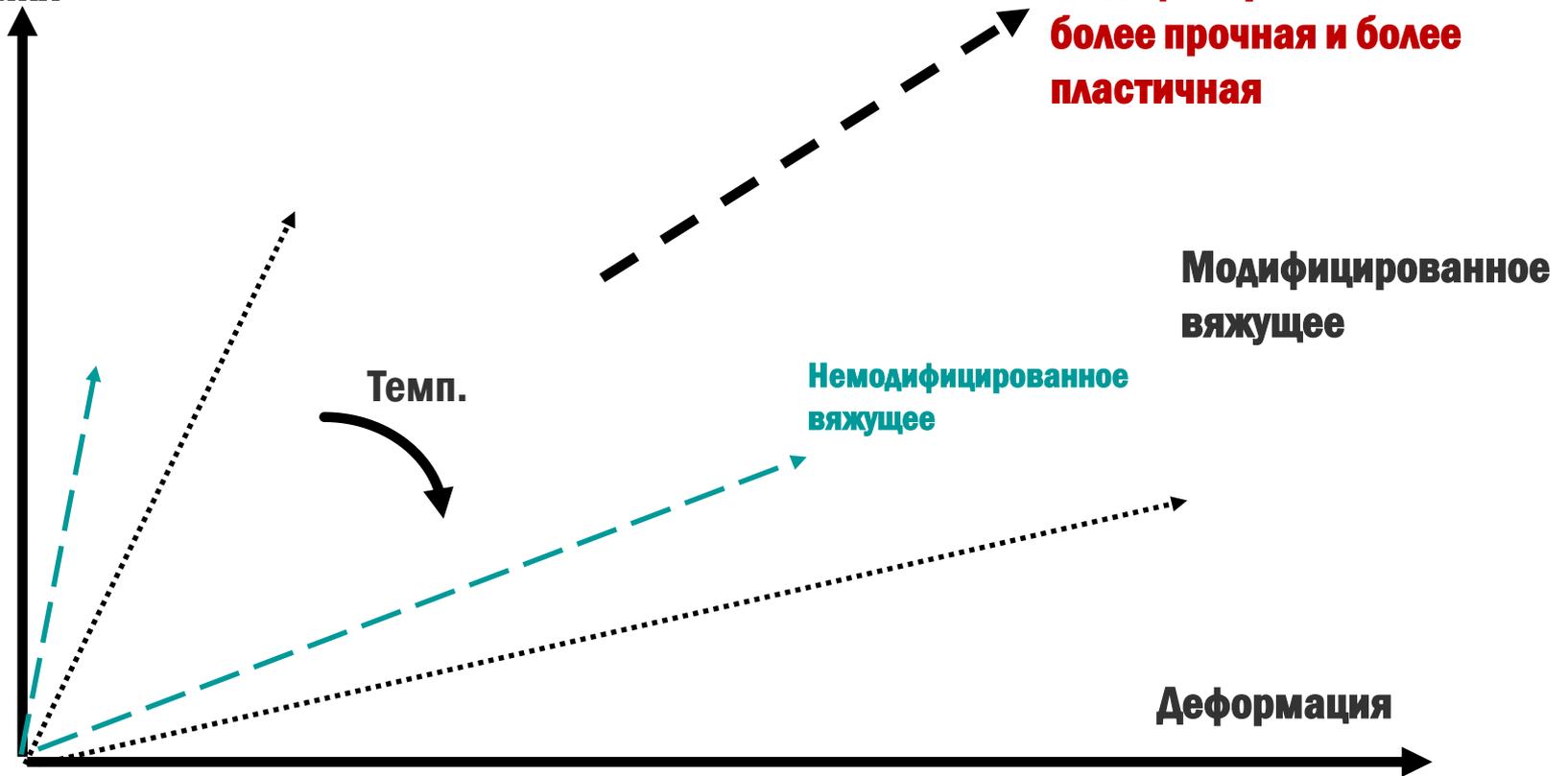


Приготовление смеси и укладка

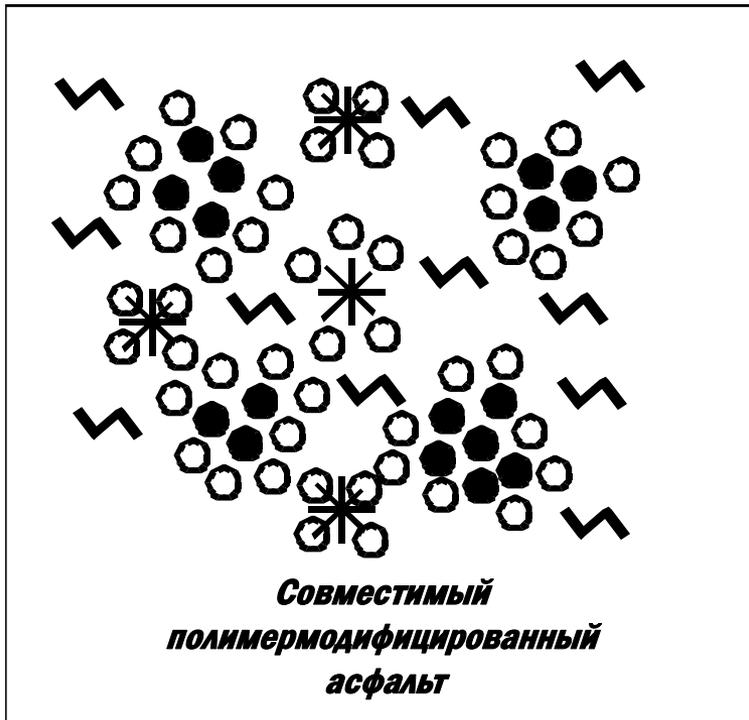


# Модификация вяжущего для повышения стойкости к растрескиванию

Интенсивность дорожного движения —  
напряжения



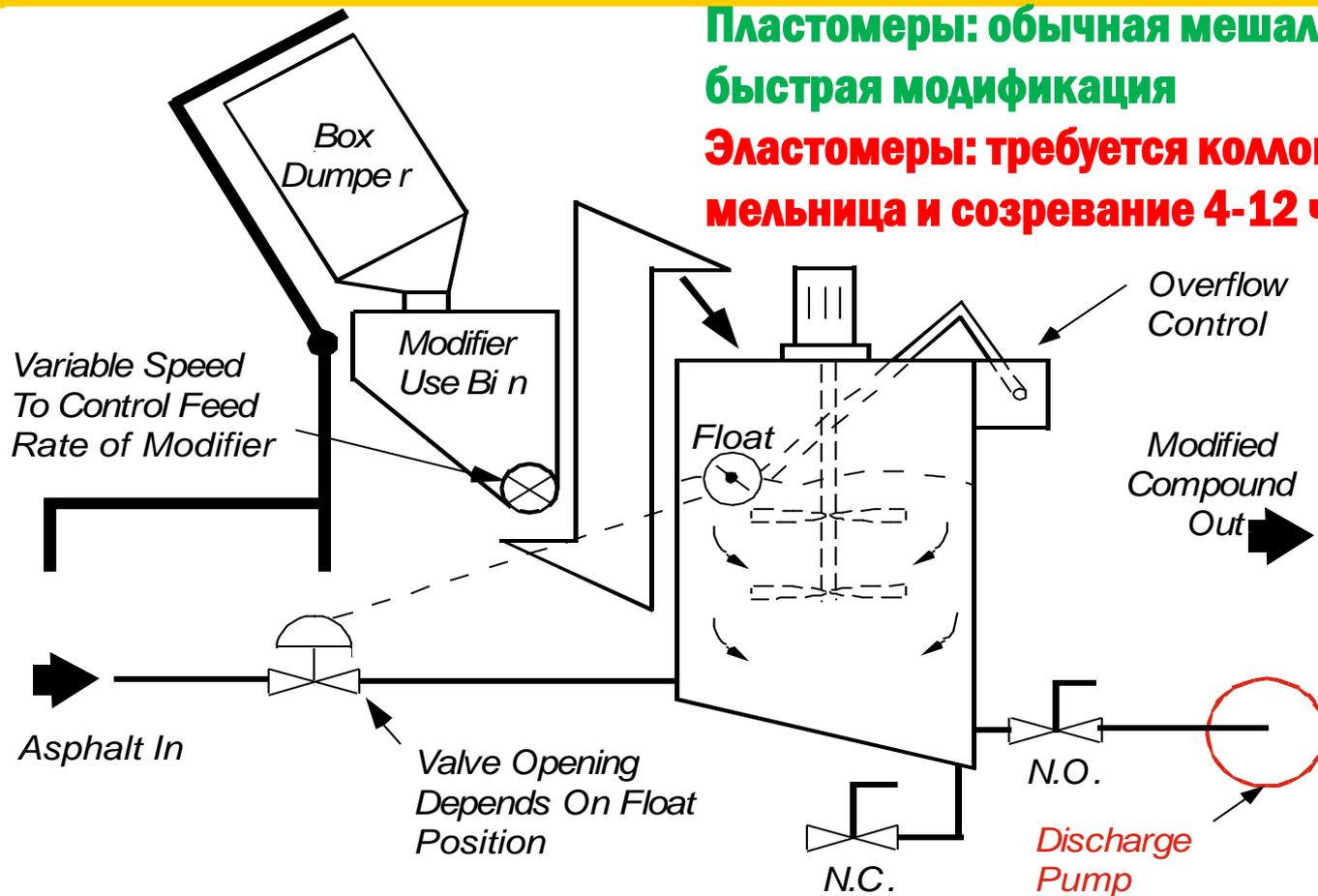
# Выбор систем полимеров для вяжущего: дисперсия, разбухание и стабильность



- *Asphaltenes*
- *Resins*
- \* *Polymer*
- ∟ *Oils*



# Завод по модификации вяжущего



Пластомеры: обычная мешалка,  
быстрая модификация

Эластомеры: требуется коллоидная  
мельница и созревание 4-12 ч

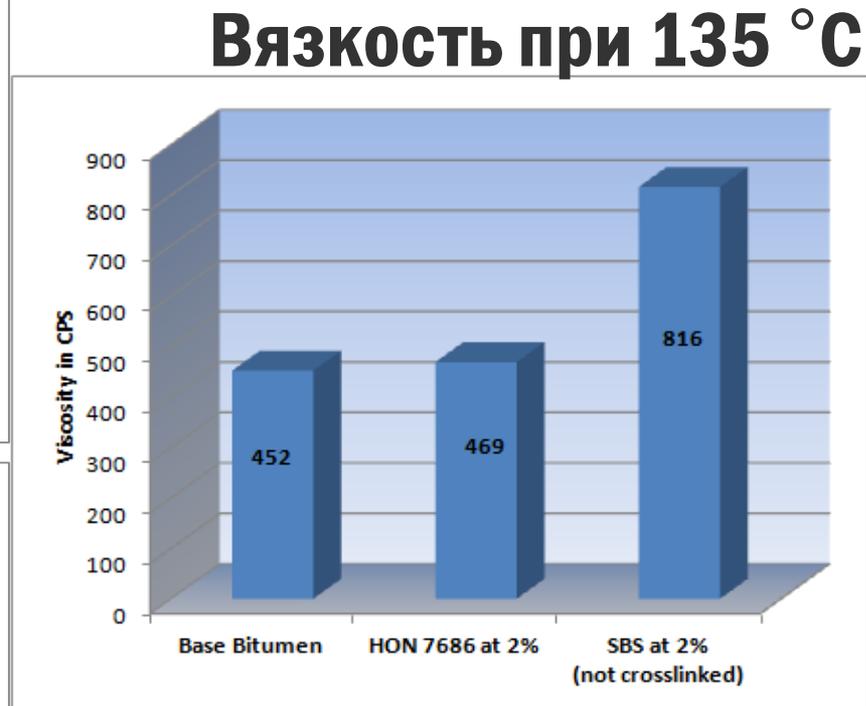
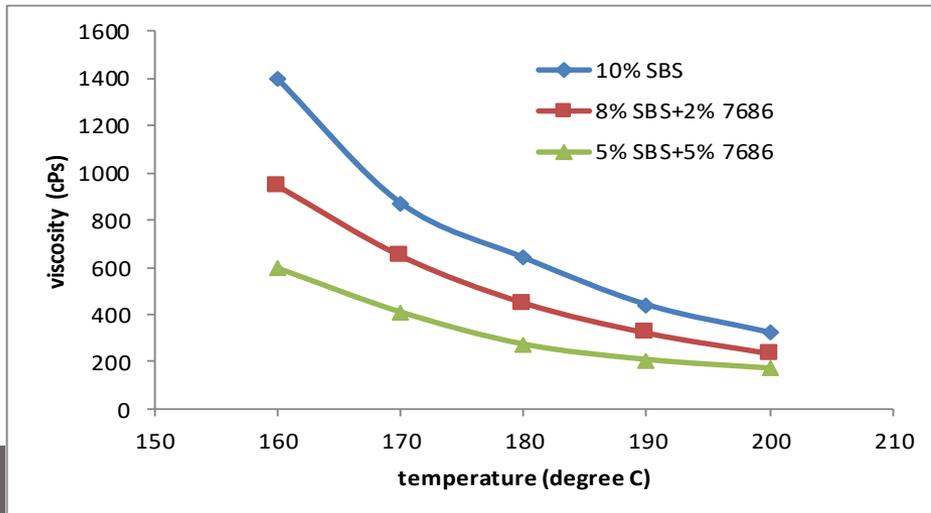
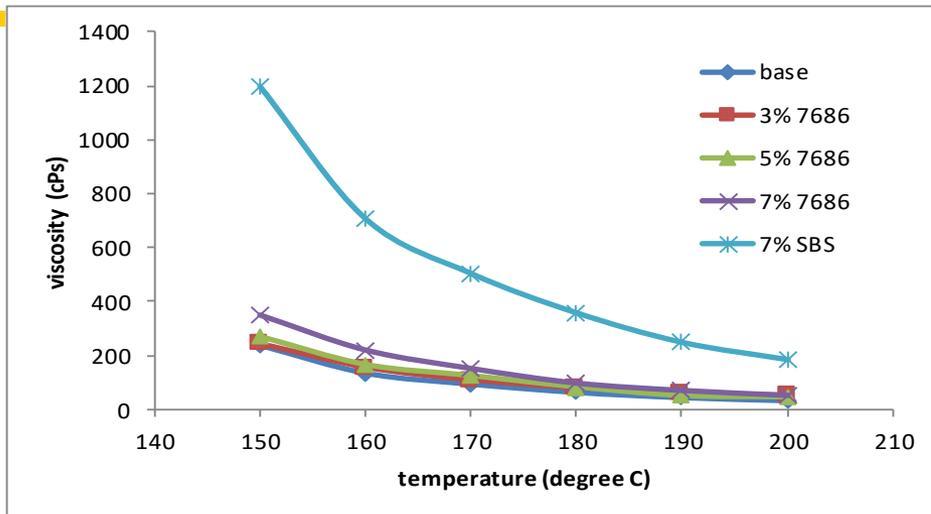
---

# Зачем нужны гибридные рецептуры?

# Проблемы при использовании в качестве модификаторов только эластомеров СБС

- При добавлении СБС **вязкость битума повышается** очень быстро, технологичность снижается!
- **СБС не плавится** при рабочих температурах, только механическое диспергирование и требует **значительного времени для разбухания**.
- **Нестабильность при хранении** представляет серьезную проблему. Для предотвращения расслоения требуются специальные сшивающие агенты (чаще всего сера – не экологично и опасно для здоровья людей).
- **Характеристики СБС могут ухудшаться** в течение срока службы вяжущего.
- Бутадиен, применяемый для производства СБС, является побочным продуктом крекинга в производстве этилена при использовании жидкого сырья. Спрос на другие продукты может обуславливать колебание цен и дефицит СБС. В конце лета **2008 г. возникла внезапная нехватка бутадиена и СБС**, приведшая к задержке многих крупных проектов. Потом ситуация повторилась в 2015 г.

# Вязкость при использовании различных модификаторов



Снижение вязкости = улучшенная удобоукладываемость + сокращение энергопотребления



# Альтернативы эластомерам

- **Полный отказ от модификаторов не выход!!!**
  - Система классификации PG и MSCR применяется с учетом климатических условий и интенсивности движения
  - Использование неверной марки приводит к ухудшенным рабочим характеристикам
  - У нас достаточно данных за прошедшие периоды, доказывающих, что применение полимер модифицированного асфальта действительно улучшает характеристики дорожного покрытия
- **Существуют различные эффективные модификаторы**
  - **Для решения возникающих проблем** требуются **гибкость и творческий подход**
  - **Есть хорошие альтернативы СБС** — это модификаторы, **основанные не на бутадиене, альтернатива на полиолефиновой химии. Это самый массовый тип полимеров производимый в мире.**

# Функционализированный полиэтилен (ФПЭ)

**Один из** перспективных полимеров  
для разного климата и сложных  
дорожных условий, ...  
... характерных, например,  
для США и России

# Низкомолекулярные функционализированные полиолефины

Свойство	Парафиновый воск	Воск Фишера — Тропша (Sasobit)	Полиэтилен	
			<i>Полимеры Honeywell Titan</i>	Смола
Молекулярная масса (Mw)	400	600–1000	5000 – 15 000	100 000 – 250 000
Степень разветвления/ кристаллизации	Линейный/полукристаллический	Линейный/высококристаллический	<i>Разветвленные и линейные/полукристаллические</i>	Линейная (HDPE), разветвленная (LDPE), сомономер (LLDPE)
Температура плавления (°C)	50–70	95–100	115–140	120–140 HDPE, 105–115 LDPE
Сопротивление пенетрации (дмм)	10–20	1–5	< 0,5–1	< 0,5 — ??
Типичная вязкость (сП) выше температуры плавления	~5	~10	450–4500	Измеряется показатель текучести расплава (ПТР)
Ударная вязкость и эластичность	Низкая	От низкой до средней	<i>Высокая</i>	Очень высокая, эластичность зависит от марки

# Основные особенности функционализированного ПЭ для дорожных битумов

- **Основные отличия:**

- Улучшенная дисперсия — отсутствие времени на созревание ПБВ, т.к. отсутствует набухание полимера, активации, старения и т. д.
  - Модификация при более низких температурах (150 С) → а это более низкое энергопотребление
- Превосходная стабильность свойств при хранении
  - Низкая вязкость при температурах выше точки плавления — не существенно влияет на вязкость исходного битума, получается низковязкий ПМБ (полимер модифицированный битум)
  - Хорошая совместимость с вяжущими полученными из нефтей разной природы

- **Улучшение эксплуатационных характеристик:**

- Улучшенные показатели высокотемпературных марок: обычно + 6–9 ° TG при 1,5–2 %
- Удобоукладываемость/уплотняемость: отсутствие изменений в вязкости исходного битума, улучшение смазывающе-покровных характеристик вяжущего

- **Дополнительные свойства**

- Превосходная влагостойкость, в большинстве случаев отсутствие дополнительной необходимости в адгезионных добавках
- Возможность смешивания с другими полимерами/модификаторами: включая **эластомеры** (СБС, СБР), **пластомеры**, а также **резиновую крошку**

# Исследование по определению оптимальных модификаторов

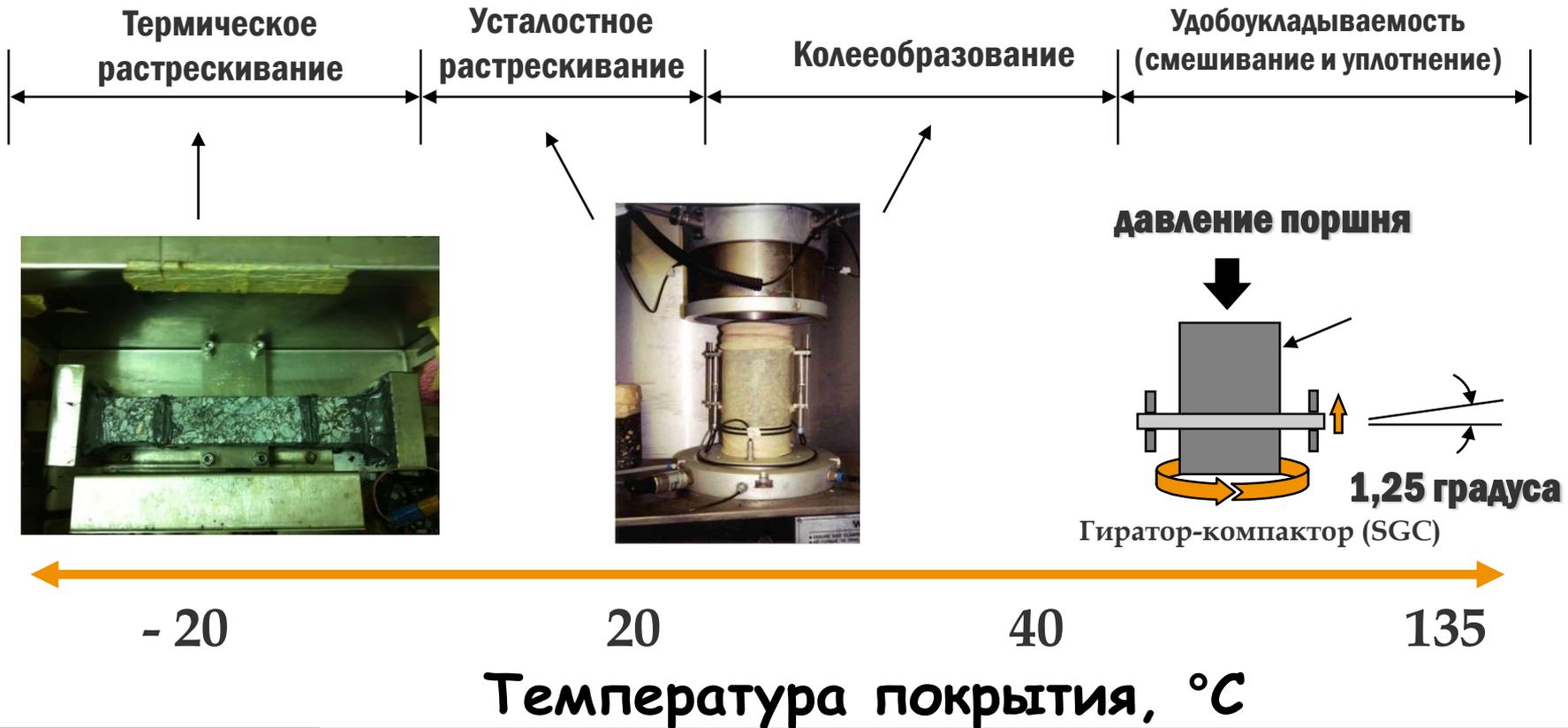
## Эксплуатационные испытания и проекты в США, Катаре и Саудовской Аравии с 2012 г.

Показатель	Вяжущие	Количество полимера
Контрольное вяжущее (FH)	PG64-22	-----
Модифицированные вяжущие Эластомер (СБС) Пластомер (Титан) Гибридная рецептура	Honeywell Titan	Выбранная концентрация модификатора на основе фактической высокотемпературной марки ( $77 \pm 1$ °C), состаренной в печи RTFO
	СБС + сера	
	Гибридная рецептура (50 % СБС + 50 % Titan)	
<b>Всего комбинаций</b>	<b>4</b>	

# Измеряемые характеристики

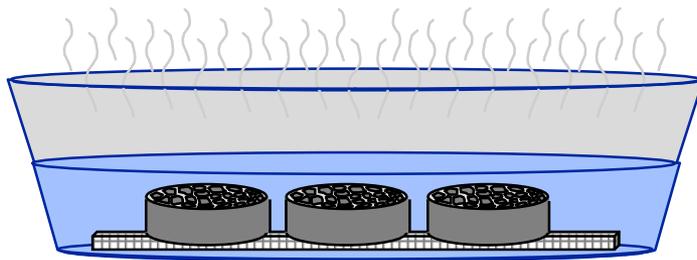
- Классификация вяжущих по Superpave PG и упругое восстановление
- Характеристики смесей:
  - **Удобоукладываемость** произведенных смесей
  - **Колееобразование** при высоких температурах покрытия: число пластической текучести (FN)
  - **Усталостные деформации** при промежуточных температурах покрытия: динамический модуль упругости ( $E^*$ )
  - **Термическое растрескивание** при низких температурах покрытия: испытания на температурное растрескивание закрепленного образца и температура стеклования — анализатор термического растрескивания асфальтобетона (ATCA)
  - **Влагостойкость**: соотношение пределов прочности на разрыв
- Механико-эмпирический расчетный анализ (программное обеспечение MEPDG):
  - Сравнение **срока службы** (накопление дефектов)
  - Расчет **возможного уменьшения толщины слоя покрытия**

# Эксплуатационные испытания горячие а/б смеси (ГАС) Superpave



# Испытание на чувствительность к влаге

- Измерения выполняются на выбранной смеси (при 25 °C)
- Образцы уплотняются гираторным компактором (SGC)



3 обработанных образца



3 сухих образца

**AASHTO T283**



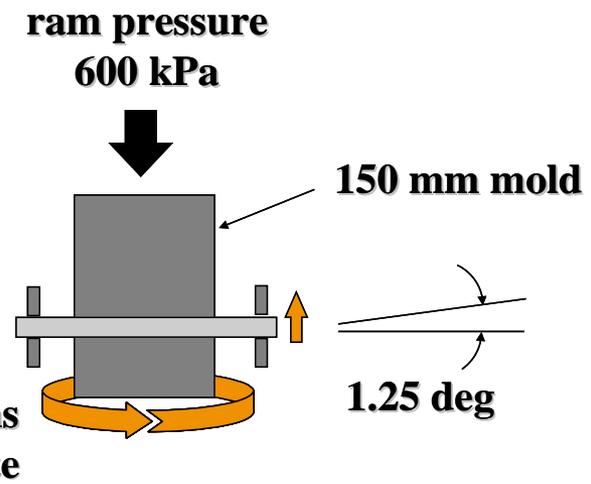
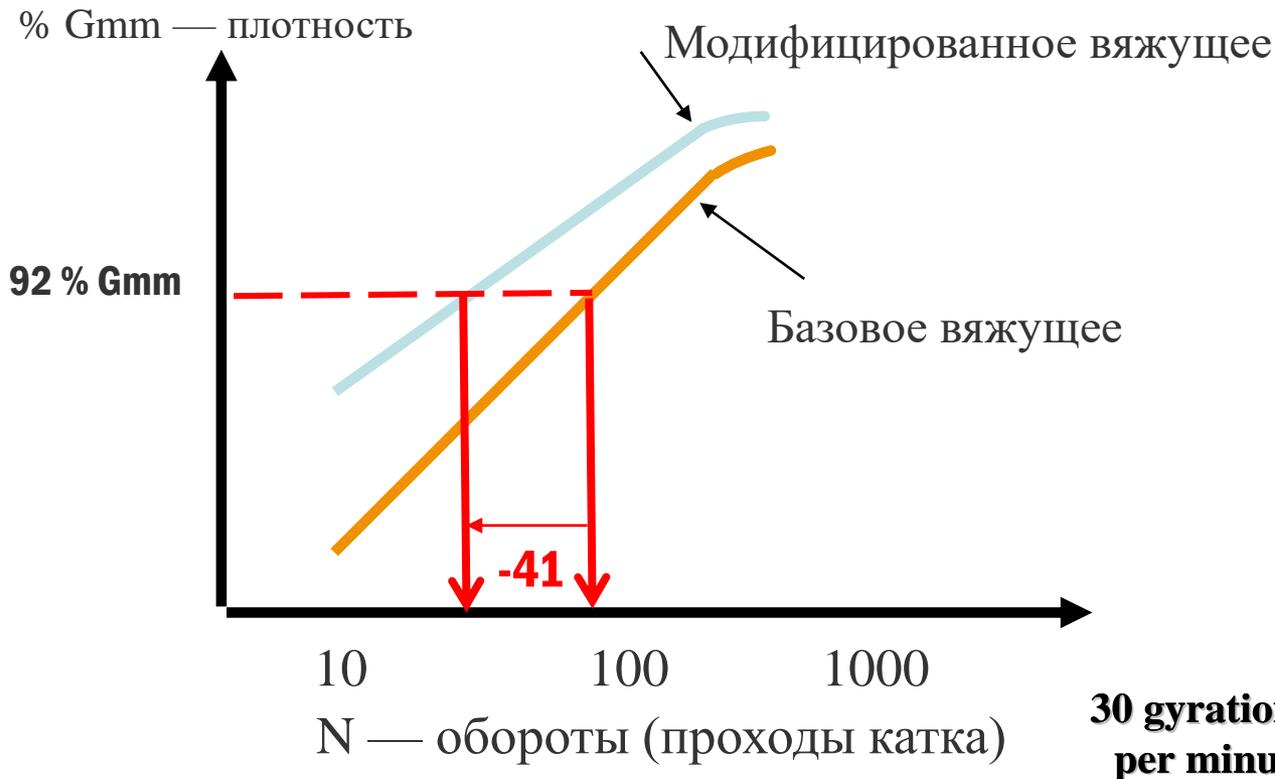
Соотношение пределов прочности на разрыв = TSR

TSR = прочность влажного образца / прочность сухого образца

Должно быть не менее > 80 % сравнительной прочности

# Удобоукладываемость: измерение необходимого усилия уплотнения в гираторе-компакторе Supergrave

- Моделирование уплотнения катком в реальных условиях

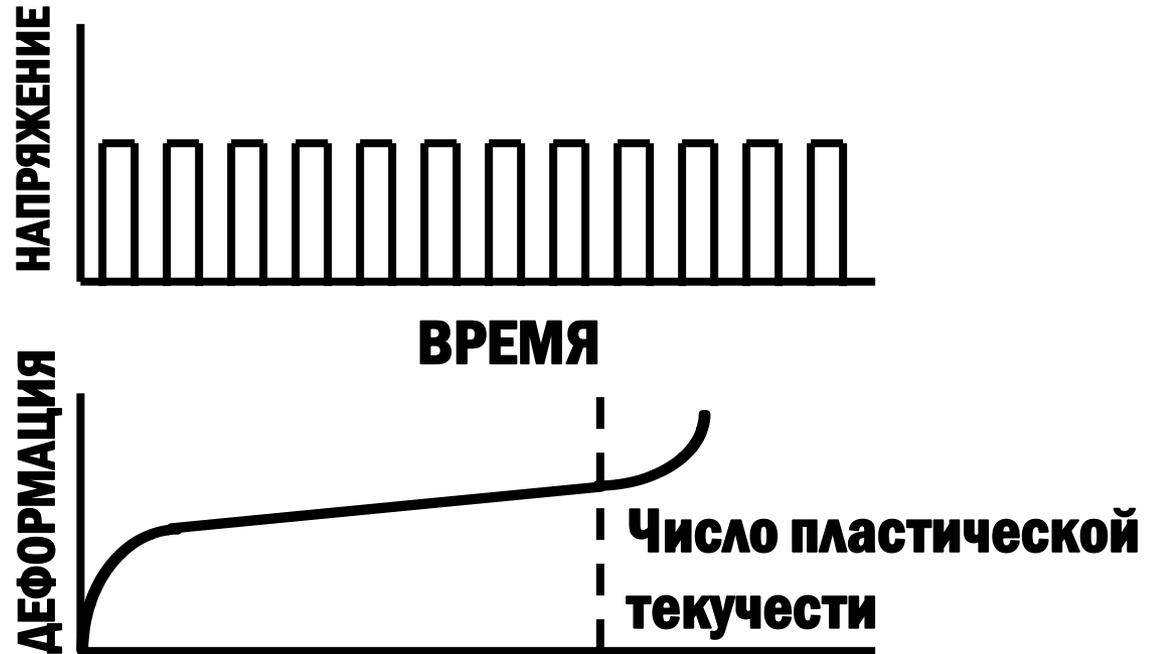
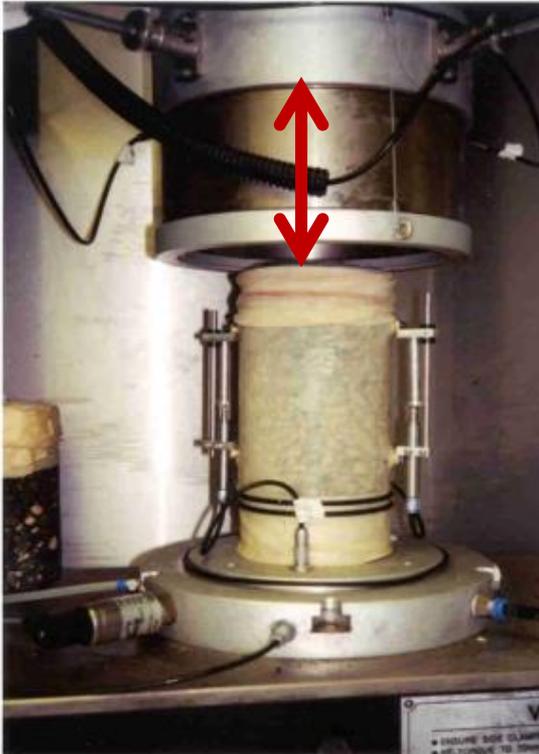


# Влияние полимеров на усилие уплотнения смесей при 145 °С

Образец	N92 — 8 % воздушных пустот	N96 — 4 % воздушных пустот	% изменения усилия уплотнения
Контрольная смесь	36	111	0
СБС*	32	100	-10
Honeywell Titan	26	86	-23
Гибридная рецептура	24	76	-41

- Titan и гибридная смесь позволяют снизить усилие уплотнения (на величину до 40 %)
- Или обладают более широким температурным диапазоном для уплотнения

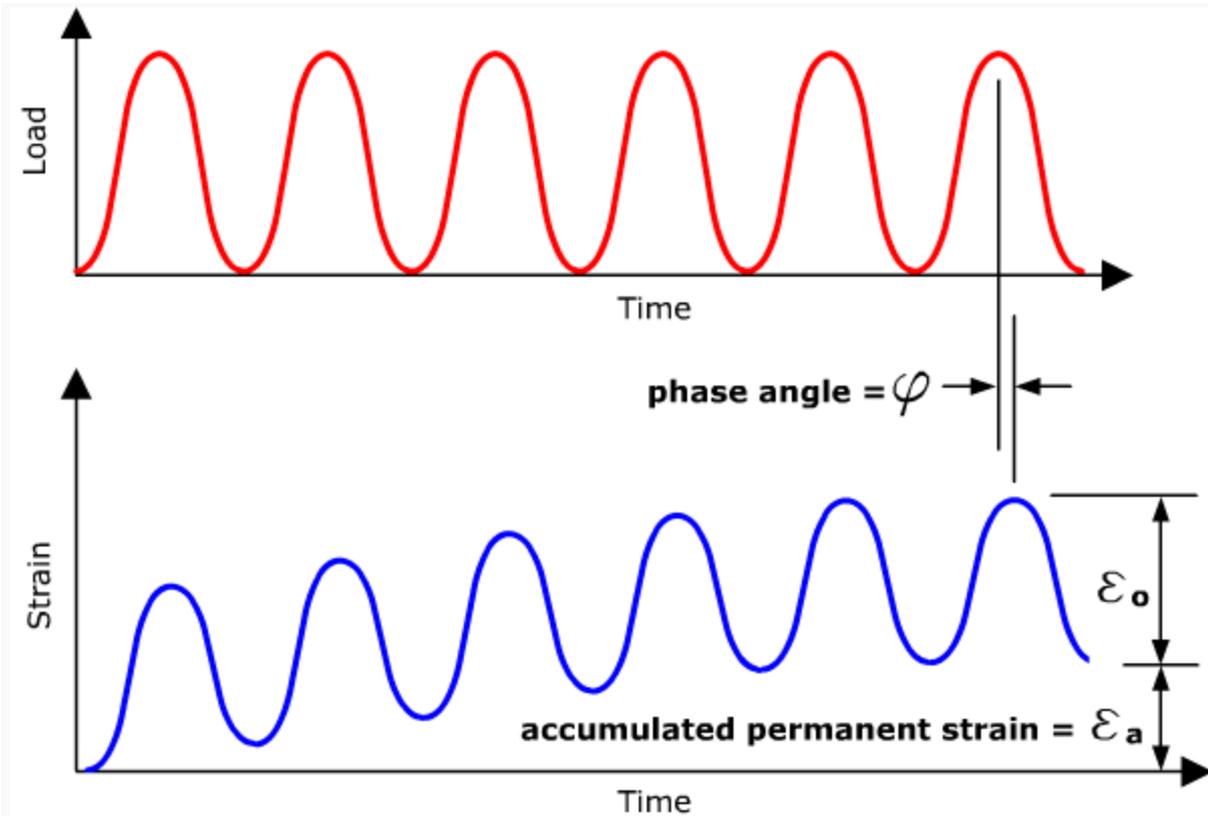
# Колееобразование: испытание на постоянную деформацию при циклической нагрузке



- Колееобразование
  - **Число пластической текучести (FN)** при высокой температуре

# Измерение стойкости к колееобразованию в лаборатории

## Определение числа пластической текучести (FN)

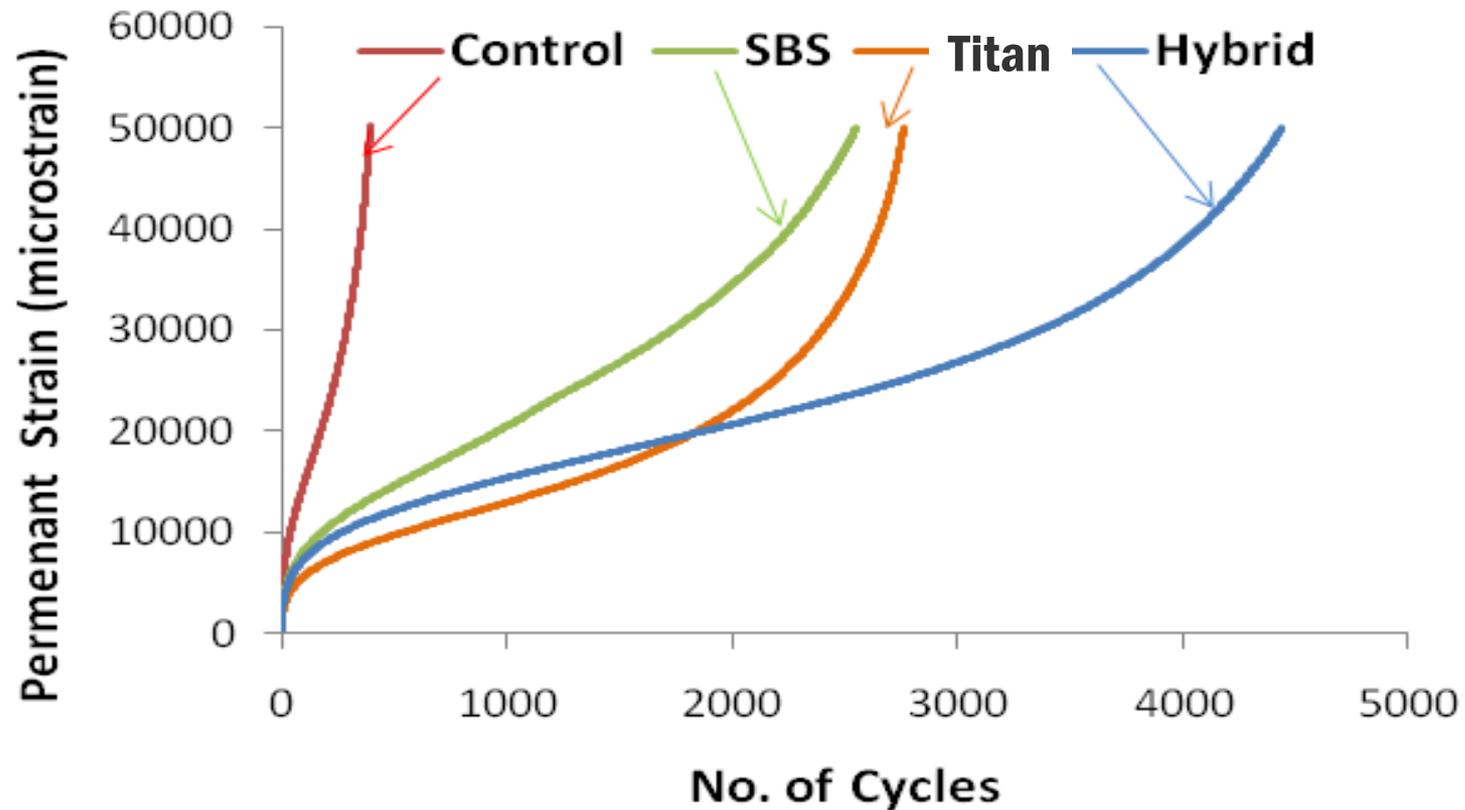


Specimen Schematic



Данные предоставлены [pavementinteractive.org](http://pavementinteractive.org)

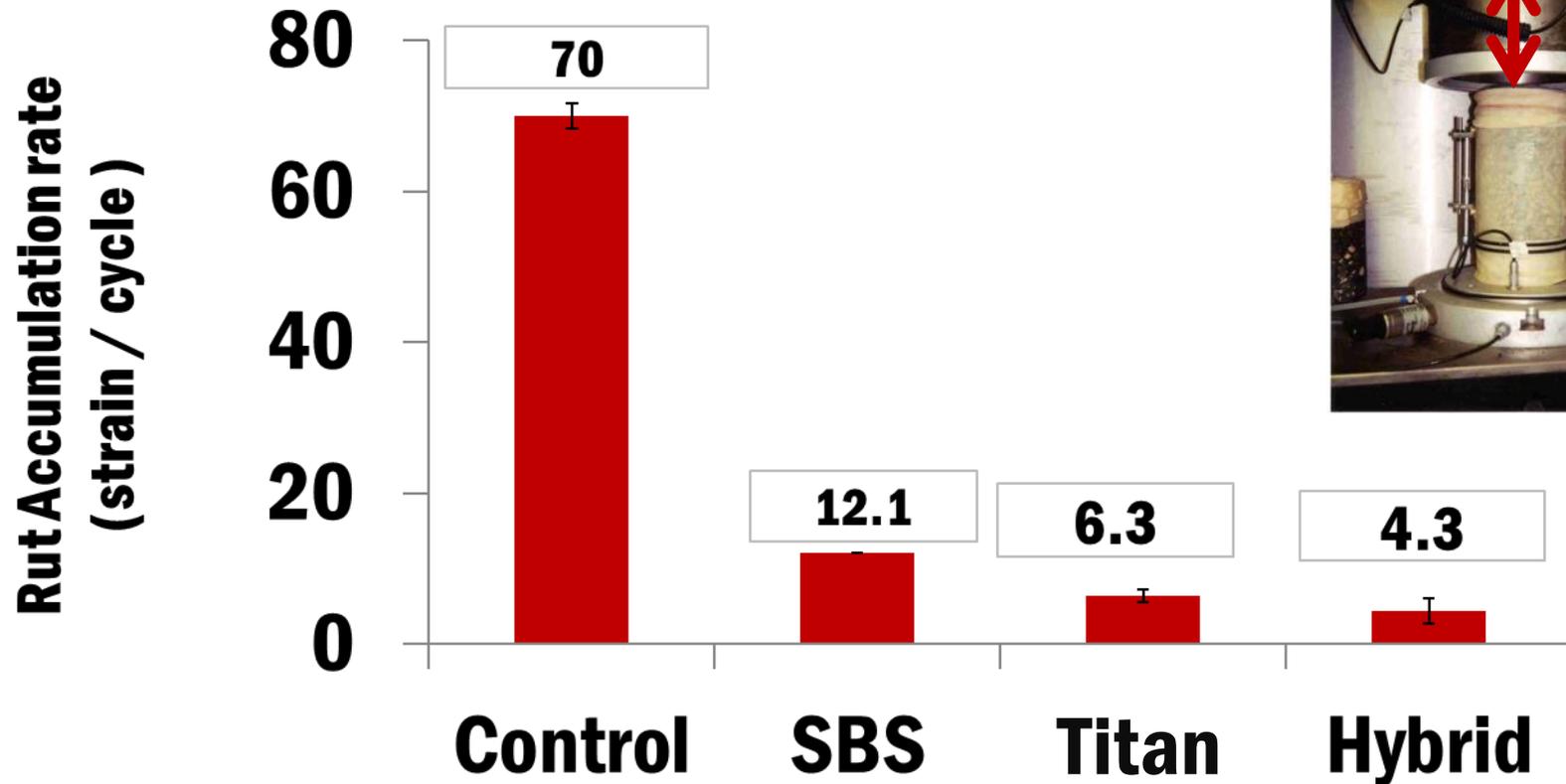
# Повышение стойкости к колеобразованию



# Повышение стойкости к колеобразованию Titan, СБС и гибридные смеси:

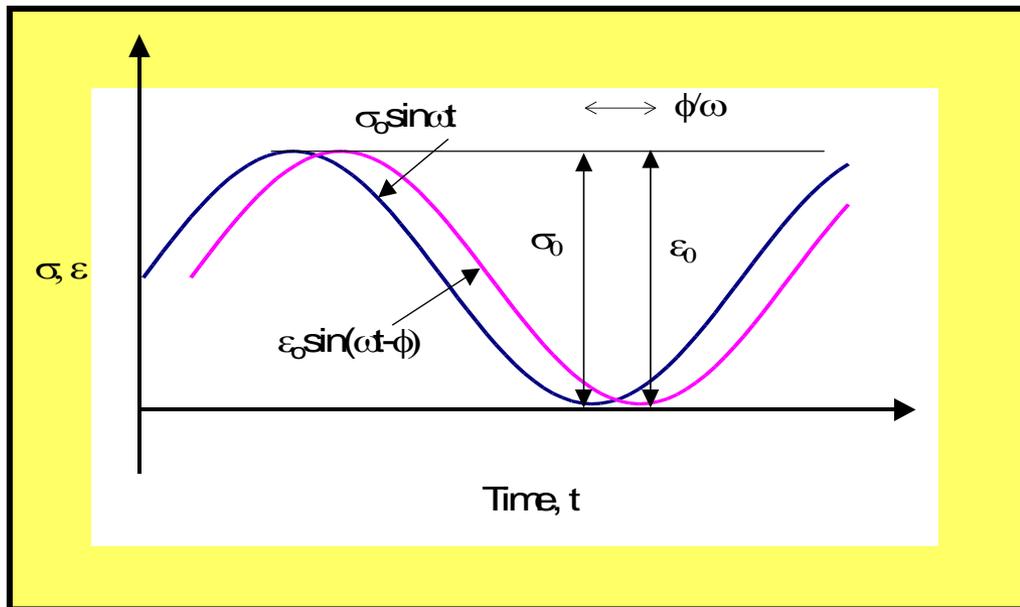
Смесь	Число FN				
	Воздушные пустоты (%)	FN = повтор. циклы	Сред. знач. FN	Коеф. вар. (%)	% увелич. FN
Контрольная смесь	7,2	133			
	6,9	138	<b>136</b>	2,6	<b>0</b>
СБС*	7,1	736			
	7,1	741	<b>739</b>	0,5	<b>+443 %</b>
Titan	7,1	849			
	6,7	980			
	6,9	860	<b>896</b>	8,1	<b>+559 %</b>
Гибридная рецептура (СБС + Titan)	7,2	1588			
	7,3	1900	<b>1744</b>	12,7	<b>+1182 %</b>

# Снижение интенсивности колеобразования



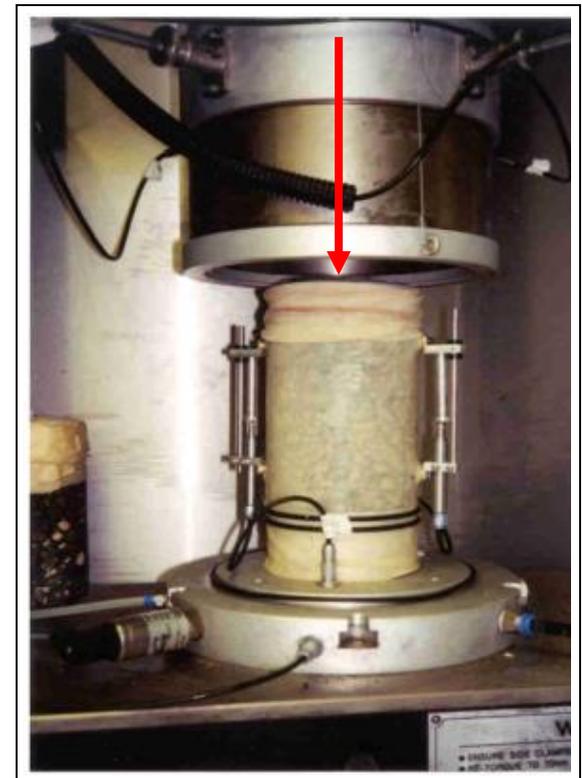
# Испытание на усталостные напряжения

Динамический модуль упругости /  $E^*$  / фазовый угол,  $\phi$

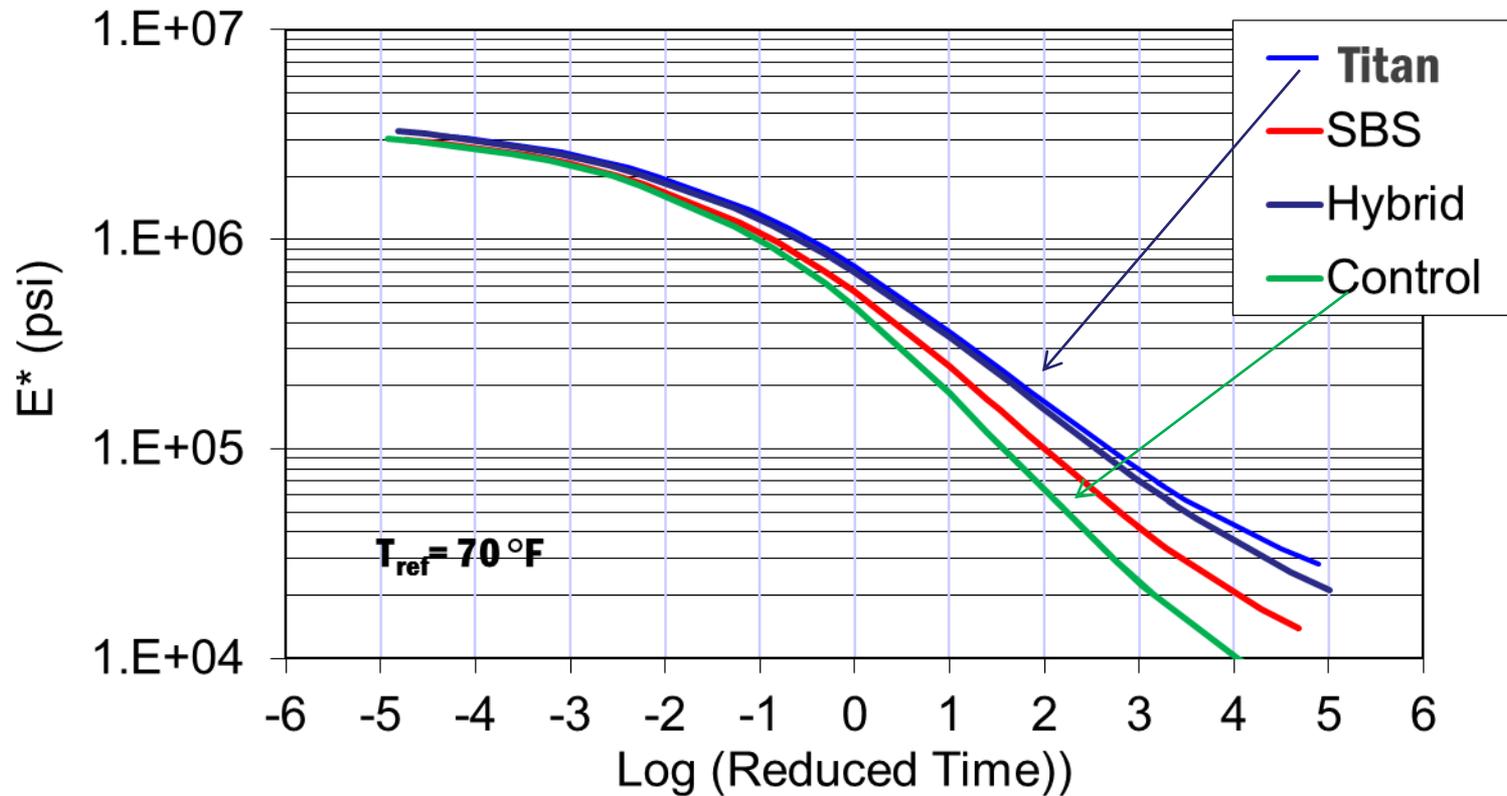


$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$$

$$\phi = \omega t_i$$

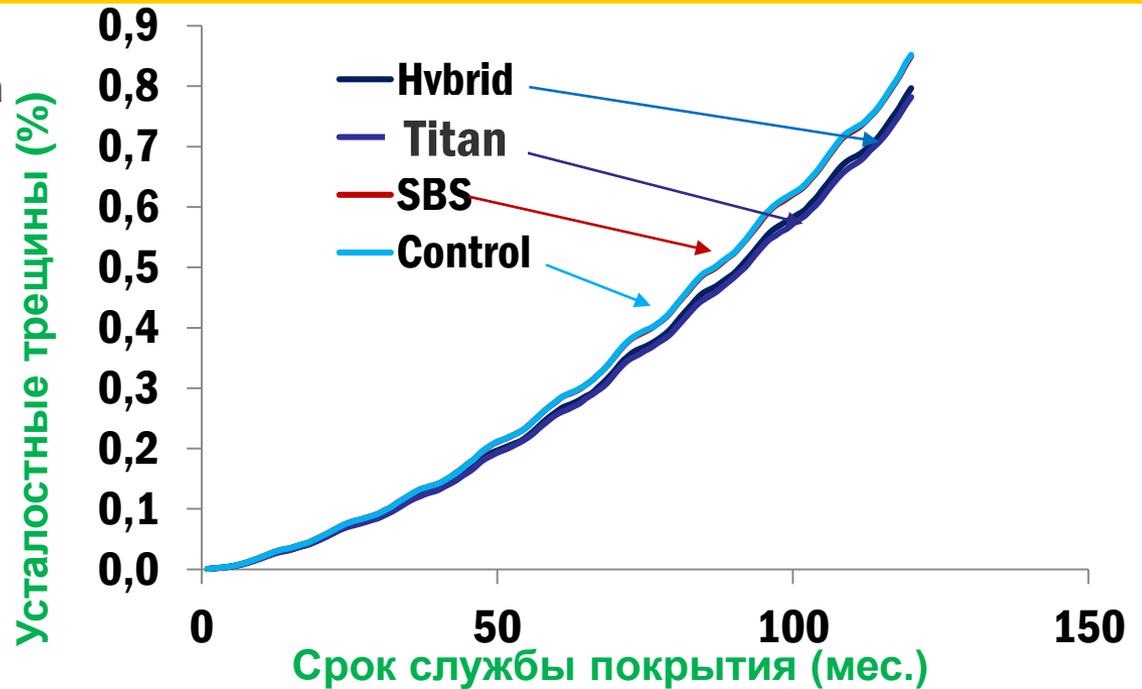


# Базовая кривая динамического модуля упругости ( $E^*$ )



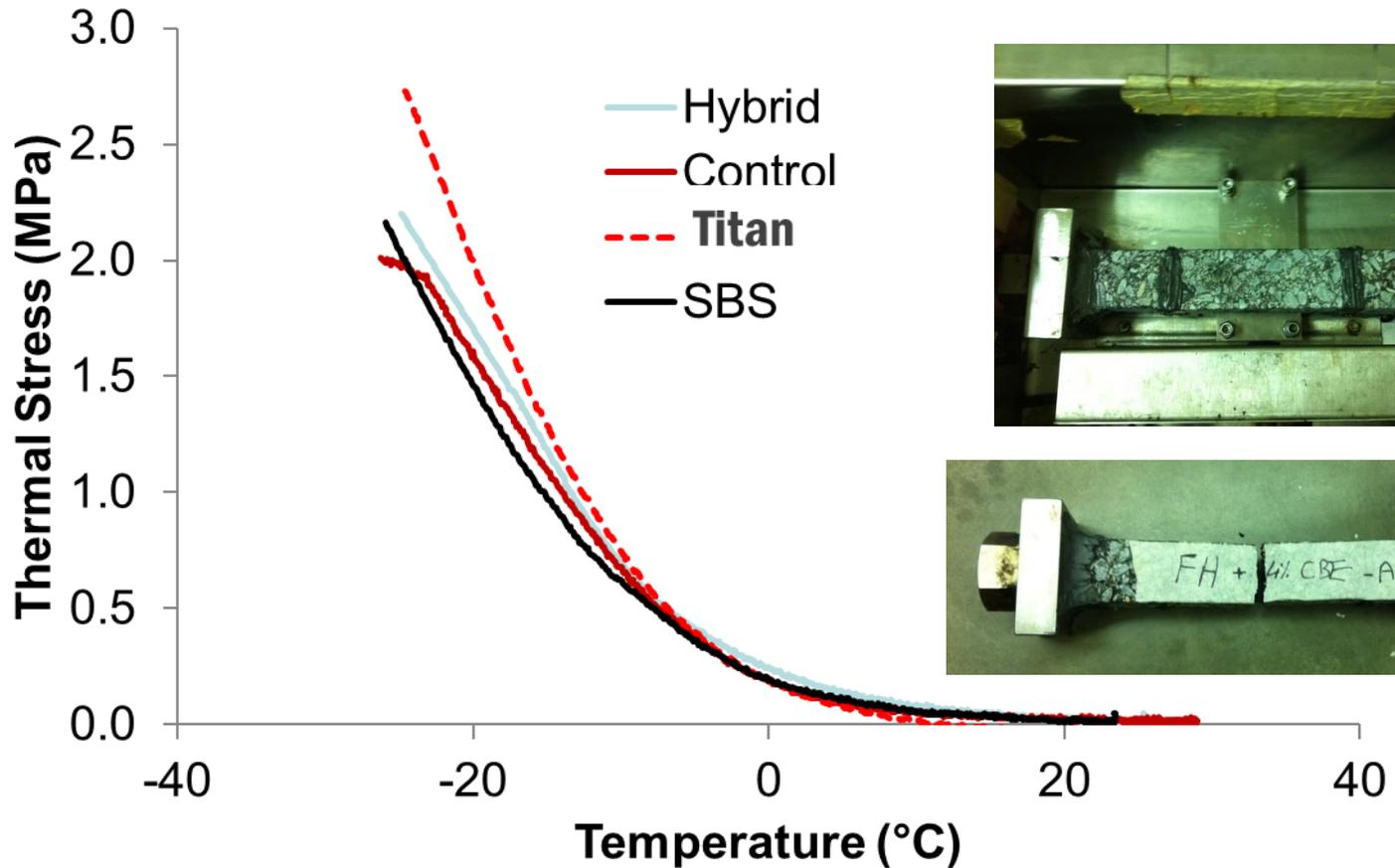
# Расчетный усталостного ресурса – программное обеспечение MEPDG

- Слой 1: асфальтобетон, 3 дюйма
- Слой 2:
  - A-1-а, 6 дюймов
  - $M_r = 40\,000$  фунтов/кв. дюйм
- Слой 3:
  - A-2-5, 9 дюймов
  - $M_r = 28\,000$  фунтов/кв. дюйм
- Слой 4:
  - A-7-6, последний слой
  - $M_r = 10\,000$  фунтов/кв. дюйм



Дефект	Контрольная смесь	Titan	СБС	Гибридная рецептура
Растрескивание асфальтобетона снизу вверх (усталостные трещины) (% от общей площади полосы с трещинами 12 x 500 футов => 6000 футов <sup>2</sup> ):	0,852	0,782	0,850	0,797

# Термическое сжатие и растрескивание. Наращение напряжений (испытание закрепленного образца)

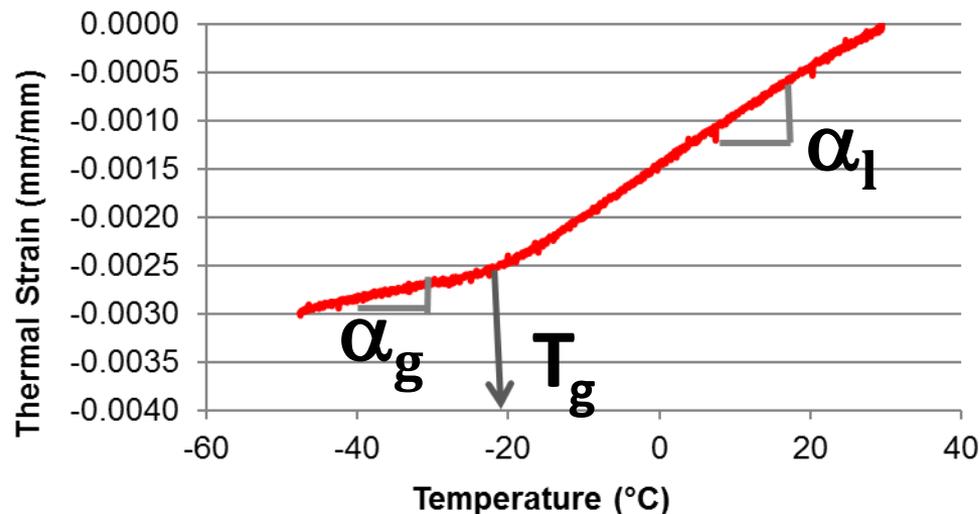
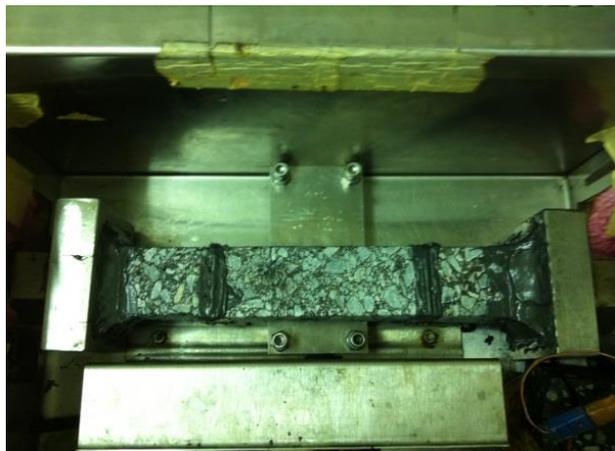


# Влияние модификаторов на прочность и температуру растрескивания

Модификатор	Средняя прочность на разрыв (МПа)	Коэф. вар. (%)	Температура растрескивания (°C)	Коэф. вар. (%)
Контрольная смесь	1,85	0,5	-26,6	10,3
СБС	2,10	4,2	-24,8	6,3
Titan	<b>2,71</b>	1,2	-24,7	0,4
Гибридная рецептура	2,13	4,7	<b>-26,0</b>	6,3

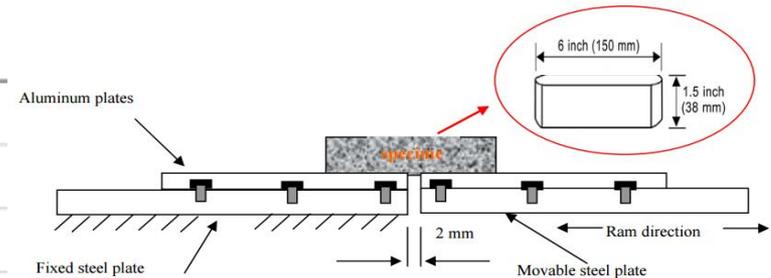
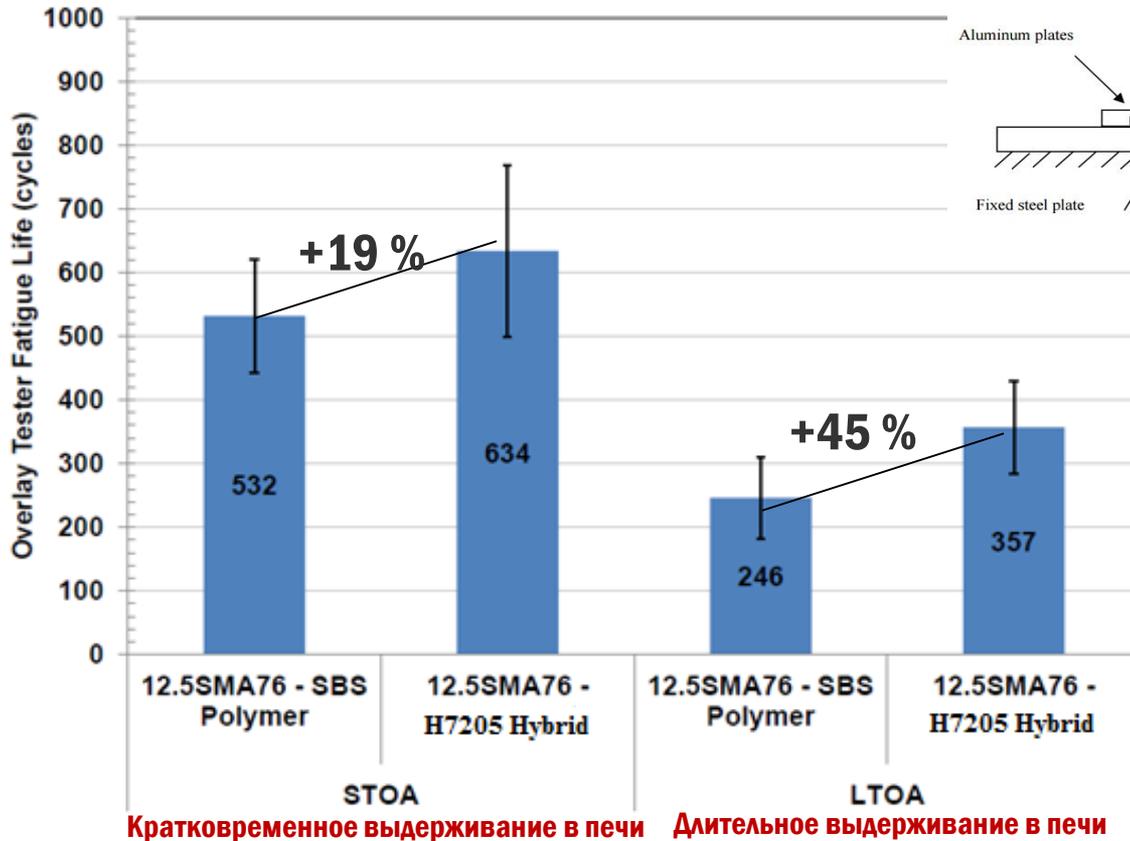


# Термическая усадка (незакрепленный образец – температура стеклования)



Образец	$T_g$		$\alpha_1$		$\alpha_g$		Средн. число точек контакта
	Среднее	Коеф. вар. (%)	Среднее	Коеф. вар. (%)	Среднее	Коеф. вар. (%)	
Контрольная смесь	-22	2,8	5,84E-05	7,1	1,46E-05	24,5	2532
Titan	-21	4,3	5,42E-05	6,5	1,18E-05	7,9	2819
СБС	-20	3,6	5,63E-05	7,7	1,42E-05	9,2	2608
<b>Гибридная рецептура</b>	<b>-27</b>	<b>9,4</b>	<b>4,75E-05</b>	<b>14,5</b>	<b>1,27E-05</b>	<b>16,1</b>	<b>3265</b>

# Определение отраженного растрескивания с использованием установки для измерения растрескивания слоев – краткосрочное (STOA) и долгосрочное старение (LTOA)



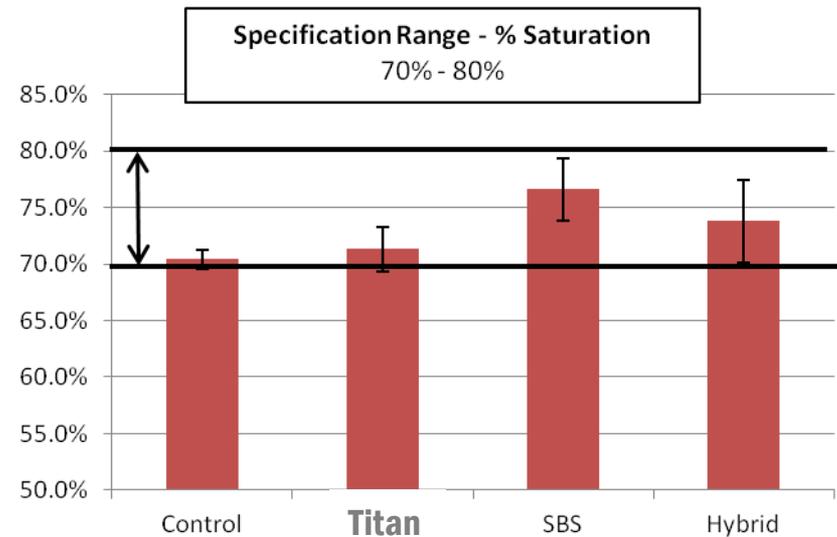
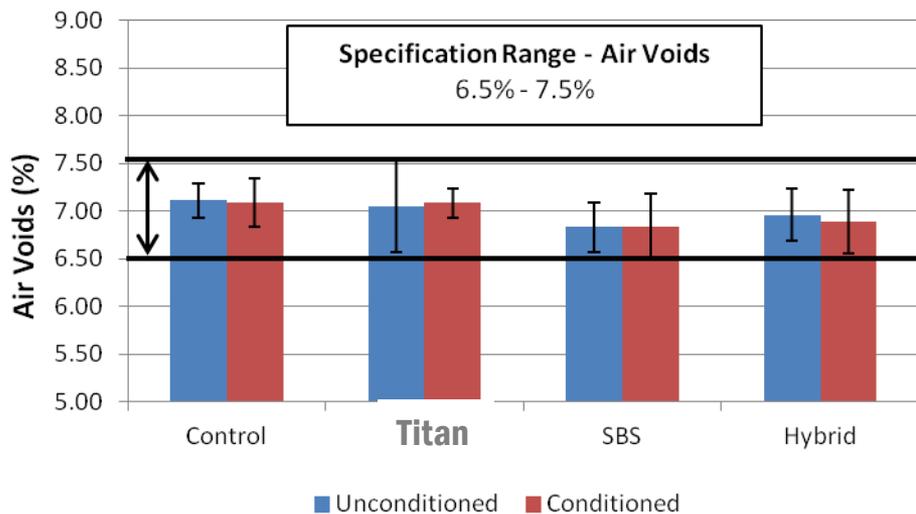
Испытание на растрескивание слоев (Тех-248-F)

Гибридная модификация:

- срок службы **на 19 % больше** (STOA)
- срок службы **на 45 % больше** (LTOA)

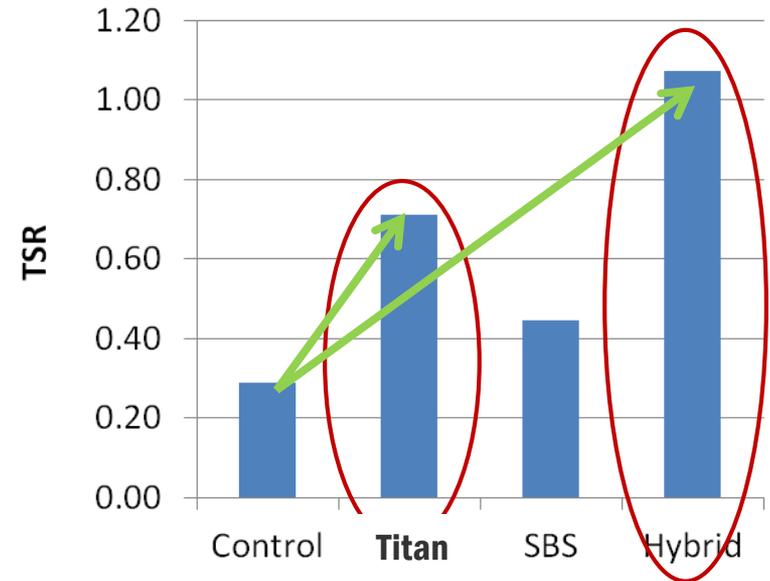
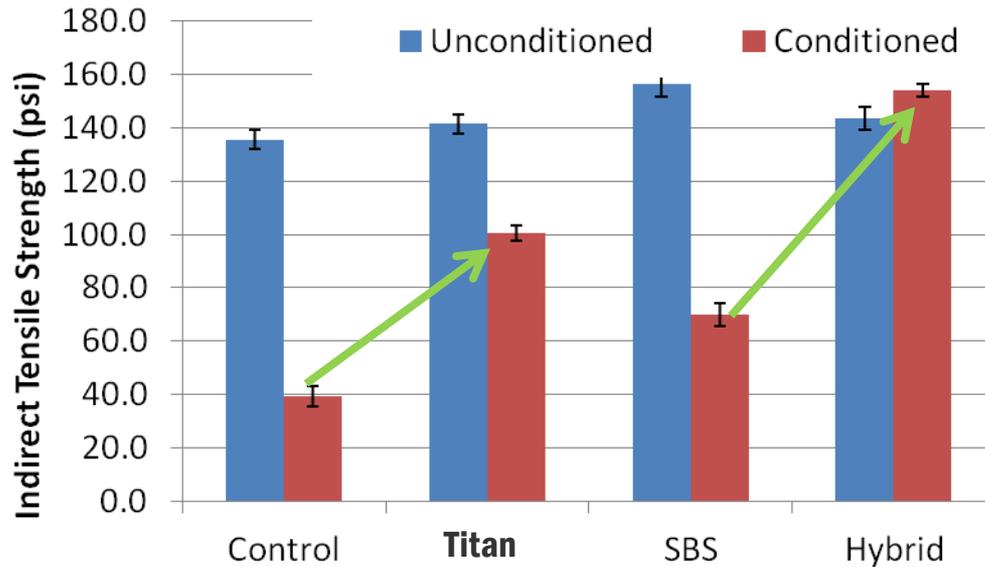
# Эффекты от модификации: повреждение влагой (TSR)

## Подготовка образца



- Все образцы в диапазоне, определенном для данного содержания воздушных пустот
- Соответствие между образцами, приготовленными с различными вяжущими

# Влияние модификации на повреждение влагой: результаты TSR



- **Повышенная косвенная прочность на растяжение во влажном состоянии для образцов, содержащих Titan**
- **Значения TSR показывают существенное повышение влагостойкости при использовании Titan и СБС совместно в гибридной рецептуре**
- **Гибридная модификация повышает остаточную прочность с 30 до 100 %**

# Полимеры Titan, повышающие стойкость к повреждению влагой: испытание кипячением по ASTM

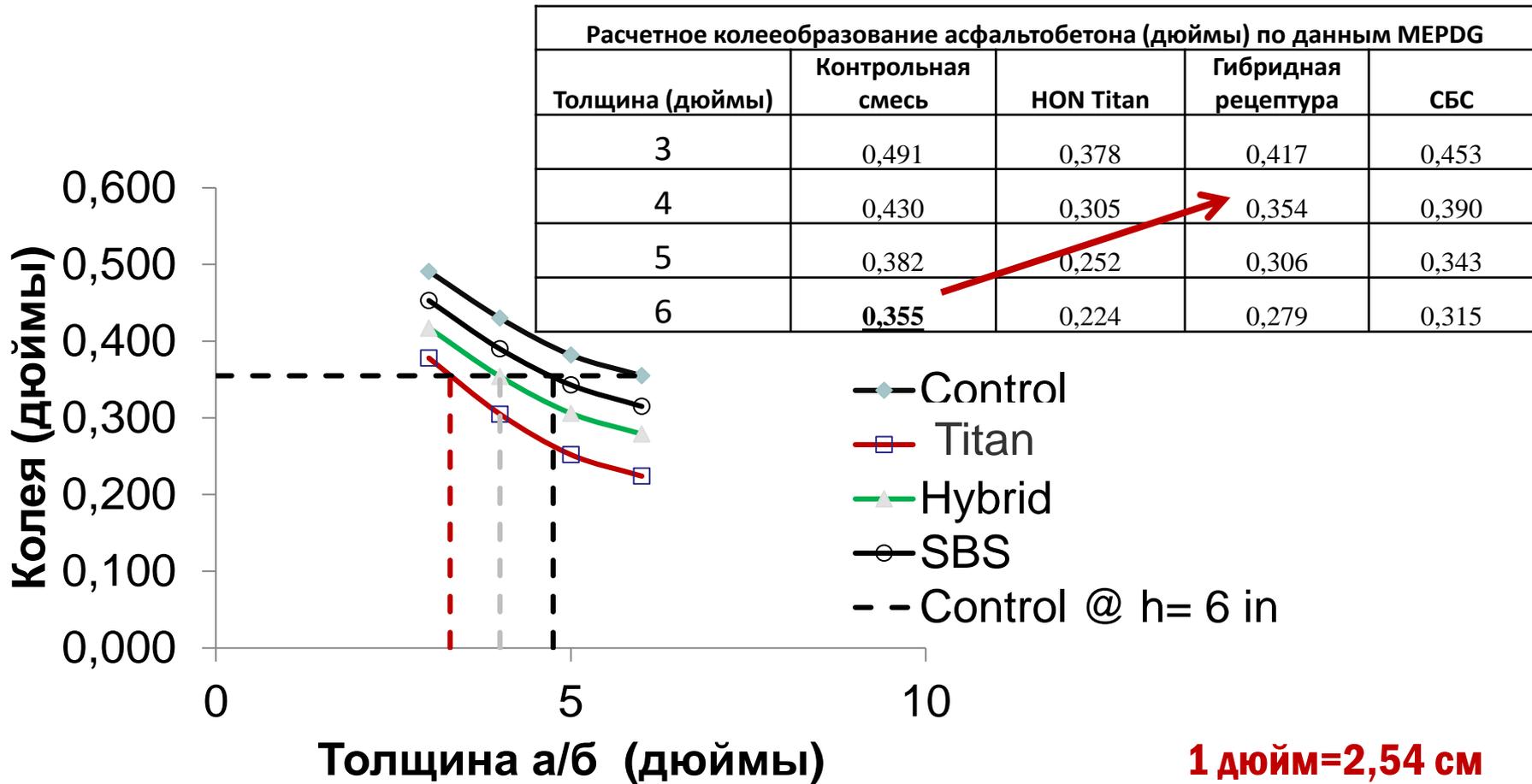


**3% SBS**



**3% Hon 7686**

# Использование полимерных модификаторов для оптимизации толщины слоев и улучшение **колеестойкости**



# Выводы по исследованию характеристик смесей: влияние гибридных модификаторов

- **Стойкость к колееобразованию**, измеряемая числом пластической текучести (FN), повышается в 8–10 раз
  - Интенсивность колееобразования значительно снижается (с 70 до 4)
- **Усталостный ресурс** такой же или немного больше
- **Стойкость к отраженному растрескиванию** повышается на 19–45 %
- **Стойкость к термическому растрескиванию** такая же или значительно выше
- **Улучшение влагостойкости:**
  - остаточная прочность повышается с 30 до 100 %
- Необходимую **толщину слоя можно сократить** (более чем на 25 %)

# Заключительные примечания

- **Выбранные полимеры должны обеспечивать:**
  - Простоту **смешивания**
  - Сохранение **стабильности** к расслаиванию при высоких температурах хранения
  - Эффективное **повышение стойкости к повреждениям, вызванным дорожным движением**
  - Улучшение **удобоукладываемости и достижение нужной плотности быстрее**
  - Повышение адгезии к минеральным заполнителям и **уменьшение повреждений, вызванных влагой**
  - Возможность **комбинирования** с СБС или **другими полимерами**
- **Инновации на этом не заканчиваются. Дороги – важный аспект нашей жизни, и использование более эффективных материалов для дорожных покрытий позволяет увеличить **эффективность государственных инвестиций!****

# Благодарю за внимание!

- Организаторы конференции
- Спонсоры/партнеры MARC
- Участникам семинара

Хусейн Бахия (Hussain U. Bahia), Ph.D.  
[bahia@engr.wisc.edu](mailto:bahia@engr.wisc.edu)