

## Динамический механический анализ

Метод, техника, приложения



# Динамический механический анализатор – DMA 242 E *Artemis*

## Самый универсальный ДМА в мире

Динамический механический анализ (ДМА) является незаменимым методом для определения вязкоупругих свойств, главным образом, полимерных материалов.

Новый DMA 242 E *Artemis* сочетает в себе простоту управления с удобным программным обеспечением *Proteus*® для измерений и оценки результатов. С его помощью можно легко и быстро измерять динамические механические свойства в зависимости от частоты, температуры и времени.

Модульная конструкция вместе с широким разнообразием держателей образцов и систем охлаждения позволяет использовать DMA 242 E *Artemis* для широкого спектра образцов и применений. Различные дополнительные возможности делают его идеальным прибором для любой лаборатории и являются надежным вложением капитала в долгосрочной перспективе.

### Дополнительные опции

- Погружная ванна для измерений образцов в определенной жидкой среде.
- Подключение к диэлектрическому анализатору DEA 288 *Epsilon* для одновременного измерения вязкоупругих и диэлектрических свойств, например, при отверждении смолы.
- Подключаемая УФ-лампа для измерения отверждения светореактивных образцов.
- Подключение генератора влажности для определения влияния влажности на динамические механические свойства материала.

### Вертикальная конструкция

с нижним расположением образца обеспечивает легкий доступ, установку и смену различных держателей образца.

### Контролируемый поток газа

(инертного или окислительного), с оптимальной передачей тепла к образцу для заданных условий измерения.

### Различные варианты охлаждения

Две различные системы охлаждения:  
жидкий азот –  
≠ контролируемое охлаждение до -170°C  
и охлаждение воздухом до -50°C.

дополнительная информация

[www.netzsch.com/n11171](http://www.netzsch.com/n11171)



**Контролируемый диапазон нагрузки до 24 Н**  
для измерений очень жестких образцов. Повышенное разрешение по нагрузке в диапазоне измерения 8 Н.

**Статический диапазон хода до 20 мм**  
обеспечивает точное тестирование материалов, которые обладают существенными изменениями по длине во время измерений ДМА. Это особенно важно для различных статических экспериментов, доступных на DMA 242 E Artemis, например, для изучения ползучести, релаксации и при TMA режиме.

**Более 30 различных держателей образца**  
для оптимальной настройки условий измерений свойств материалов.

# Динамический механический анализатор – DMA 242 E Artemis

## Функциональный принцип

Динамический механический анализ дает информацию о вязкоупругих свойствах в основном полимерных материалов при контролируемой температуре и/или при частотной деформации.

Во время испытаний синусоидальная нагрузка (усилие  $\sigma$ ) прикладывается к образцу. Это приводит к синусоидальной деформации (деформация  $\epsilon$ ).

Некоторые материалы, например, полимеры, проявляют вязкоупругое поведение, т.е. они обладают как упругими характеристиками (такими, как идеальная пружина), так и вязкими (такими, как идеальный демпфер).

Это вязкоупругое поведение вызывает смещение кривой деформации относительно кривой приложенного к образцу усилия со сдвигом фазы  $\delta$ .

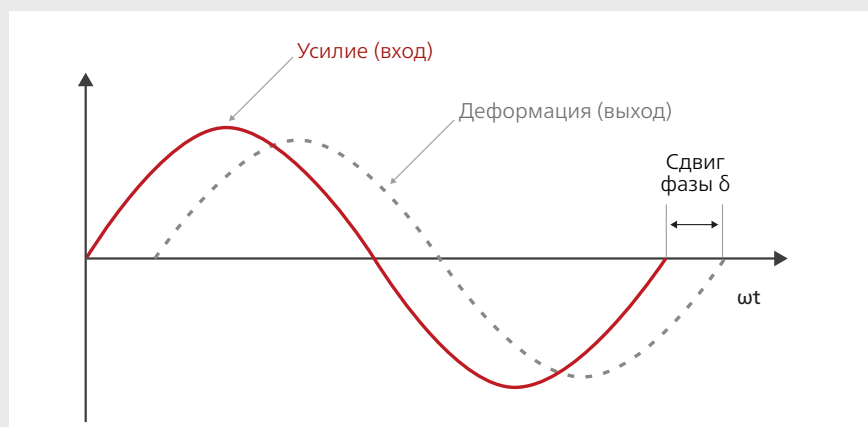
Ответный сигнал (деформация,  $\epsilon$ )

делится на части «в фазе» и «не в фазе» с помощью преобразования Фурье.

Результатами этой математической операции являются модуль упругости  $E'$  (относится к обратимой составляющей «в фазе») и модуль потерь  $E''$  (относится к необратимой части «не в фазе»).

Тангенс угла механических потерь (или фактор потерь)  $\tan \delta$  представляет собой соотношение между модулем потерь и модулем упругости ( $\tan \delta = E'' / E'$ ).

Как правило, модуль упругости ( $E'$ ) относится к жесткости материала, в то время как модуль потерь ( $E''$ ) представляет собой меру энергии колебаний, преобразованной в тепловую энергию.  $\tan \delta$  характеризует механическое демпфирование или внутреннее трение вязкоупругой системы.



DMA - принцип измерения

## Получаемые данные

Комплексная переменная ДМА	Действительная часть	Мнимая часть
Комплексный модуль $E^*$	Модуль упругости $E'$	Модуль потерь $E''$
Модуль сдвига $G^*$	Накопление модуля сдвига $G'$	Потери модуля сдвига $G''$
Податливость $D^*$	$D'$	$D''$
Полная амплитуда $A^*$	$A'$	$A''$
Амплитуда образца $A_s^*$	$A_s'$	$A_s''$
Нагрузка на образец $F_s^*$	$F_s'$	$F_s''$
Константа упругости $c^*$	$c'$	$c''$

## Общие данные

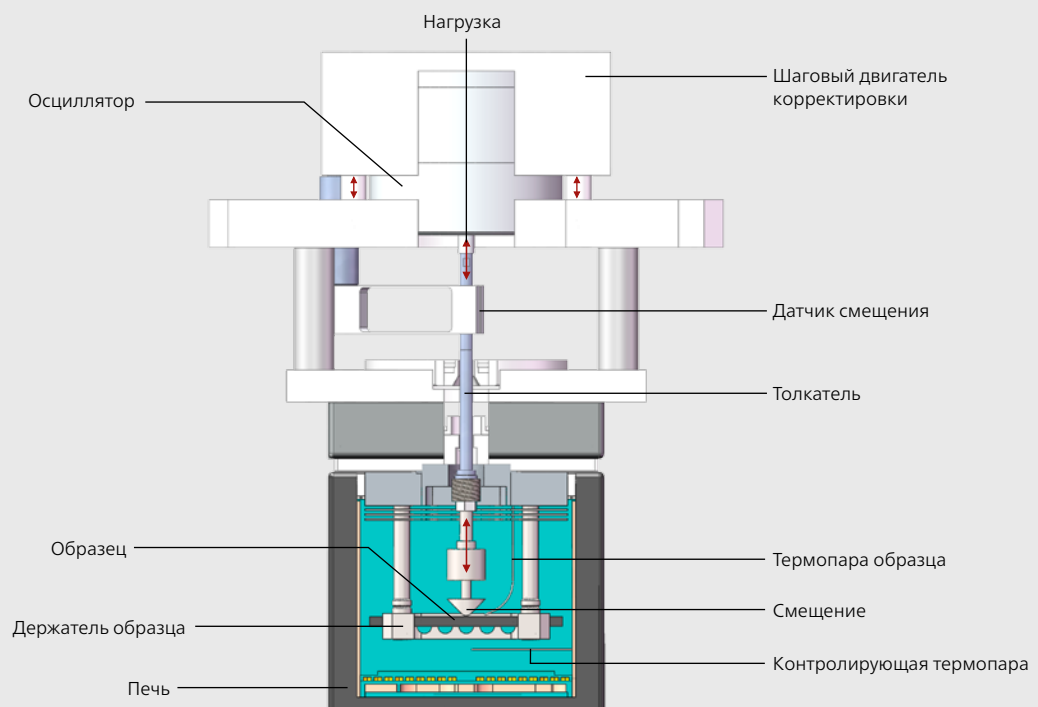
Статическое изменение длины  $dL$

Смещение

Полная динамическая нагрузка  $F_{dyn}$

Статическая нагрузка на образец  $F_{stat}$

Фактор потерь  $\tan\delta$



DMA 242 E Artemis – функциональный принцип

# Динамический механический анализ – DMA 242 E Artemis

## Динамическое механическое тестирование в исследованиях и контроле качества полимеров

### Исследования и разработки

Метод ДМА является очень чувствительным инструментом для получения важных данных о механических свойствах полимеров и композитов при разработке материалов в таких отраслях, как, например, автомобилестроение.

### Контроль качества

$\alpha$ - и  $\beta$ -переходы могут быть использованы для сравнения производимой продукции со стандартами и с продукцией конкурентов. Наши эксперты ДМА помогут вам найти правильный подход для конкретных приложений в области ваших интересов.



DMA 242 E Artemis

### Информация ДМА измерений

- Получение данных о жесткости и демпфирующих свойствах (величина модуля и коэффициента затухания при различных условиях)
- Данные о составе и структуре полимерных смесей (совместимость)
- Температуры стеклования усиленных, аморфных или частично кристаллических полимеров и композитов
- Отверждение / пост-отверждение
- Старение
- Ползучесть и релаксация
- Развертки напряжений и деформаций
- Многочастотные тесты
- Прогнозирование поведения материала с использованием суперпозиции время-температура (TTS)
- Тесты с погружением в жидкость

## Основные технические данные DMA 242 E Artemis

Диапазон температур	от -170°C до 600°C
Скорость нагревания	от 0,01 К/мин до 20 К/мин
Диапазон частот	от 0,01 Гц до 100 Гц
Диапазон нагрузки с повышенным усилием	24 Н (макс.)
Диапазон нагрузки с повышенным разрешением	8 Н (макс.)
Максимальная регулируемая амплитуда деформации	± 240 мкм
Статическая деформация	до 20 мм
Диапазон модуля	10 <sup>-3</sup> до 10 <sup>6</sup> МПа
Диапазон демпфирования (tan δ)	0,005 до 100
Устройство охлаждения	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Жидкий азот до -170°C</li> <li>▪ Сжатый воздух с вихревой трубкой для охлаждения до 0°C</li> <li>▪ Механическое охлаждение воздухом до -50°C</li> </ul>
Режимы деформации	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3-х точечный изгиб</li> <li>▪ Простой / двойной шарнирный изгиб</li> <li>▪ Сдвиг</li> <li>▪ Растяжение</li> <li>▪ Сжатие / пенетрация</li> </ul>
Дополнительные режимы измерений	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Iso-деформация</li> <li>▪ ТМА режим</li> <li>▪ Сдвиг / релаксация</li> <li>▪ Развертка напряжение / деформация</li> </ul>
Геометрия образца	Максимальные размеры образца зависят от режима деформации, например, для 3-х точечного изгиба: длина: 60 мм, ширина: 12 мм; толщина: 5 мм.
Дополнительные аксессуары	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ванна для измерений с погружением в жидкость</li> <li>▪ Генератор влажности</li> <li>▪ УФ-оборудование</li> <li>▪ Диэлектрический анализатор (ДЭА)</li> </ul>

# Держатели образцов для различных режимов

## Держатели образцов для любых приложений

От жидкостей и армированных термопластов до металлов и керамики – все эти материалы могут быть измерены с помощью DMA 242 E *Artemis*. Получение точных результатов требует оптимальной адаптации условий испытаний для каждого

материала и применения. Для этого в NETZSCH разработан широкий набор держателей образцов, аксессуаров и режимов измерений. Все держатели образцов доступны и перечислены в таблице ниже, а также на следующих страницах.

Держатель образца	Размеры образцов			Применения
ОДНО- / ДВУПЛЕЧЕВОЙ	Свободный изгиб Длина *	Ширина (макс.)	Высота (макс.)	Термопласты, эластомеры
	(2x) 1 мм	12 мм	5 мм	
	(2x) 5 мм	12 мм	5 мм	
	(2x) 16 мм	12 мм	5 мм	
	(2x) 17 мм	12 мм	5 мм	
Жесткий зажим	17 мм	12 мм	5 мм	Для определения температуры стеклования ( $T_g$ ) армированных полимеров, используемых в авиационной промышленности
Свободный толкатель	20 мм	12 мм	5 мм	Очень жесткие образцы, например, углепластики
3-х ТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ	Свободный изгиб Длина *	Ширина (макс.)	Высота (макс.)	Волоконно-армированные или высоконаполненные термопласты (металлы, керамики)
	10 мм	12 мм	5 мм	
	20 мм	12 мм	5 мм	
	40 мм	12 мм	5 мм	
	50 мм	12 мм	5 мм	
Острый	20 мм	12 мм	5 мм	Жесткие, армированные волокном или высоконаполненные полимеры, металлы, керамика
	40 мм	12 мм	5 мм	
РАСТЯЖЕНИЕ	Свободное растяжение Длина* (макс.)	Ø/Ширина / Толщина (макс.)		Пленки, волокна, тонкие полоски резины
	15 мм	6,8 мм		

\* Примечание: Образцы должны быть больше в длину, чем указанные здесь значения свободного изгиба и свободного растяжения.



Держатель образца	Размеры образца			Применения
СЖАТИЕ / ПЕНЕТРАЦИЯ	Диаметр образца (макс.)	Диаметр толкателя [мм]	Высота (макс.)	Мягкие образцы; например, резина
	Стандартный	15 мм	0,5, 1, 3, 5, 15	
		30 мм	0,5, 1, 3, 5, 15, 30	6 мм
СДВИГ	Ø/Ширина / Высота (макс.)	Толщина (макс.)	Поперечное сечение (макс.)	Клеи, эластомеры
	Плоские поверхности	15 мм	6 мм	
	Рифленные поверхности	15 мм	6 мм	225 мм <sup>2</sup>



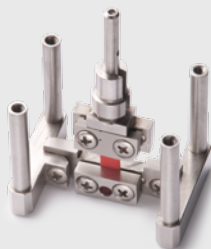
Держатель образца для 3-х точечного изгиба.



Держатель образца для одно- / двуплечевого изгиба.



Различные размеры рамок и толкателей гарантируют оптимальную адаптацию держателя образца для измерений параметров в режимах сжатие / пенетрация.



Держатель образца для растяжения.



Держатель образца для сдвига.

## Широкий выбор специальных держателей образцов

Широкий выбор специальных держателей образцов	Размеры образца			Применения
	Диаметр образца (макс.)	Диаметр толкателя	Высота (макс.)	
Толкатель изготовлен из кварцевого стекла и свободного диска из оксида алюминия	15 мм	5 мм	6 мм	Пеноизоляция
Вкладыш образца	7 мм	3 мм	2,5 мм	Отверждение пастообразных образцов с высокой вязкостью
Толкатель сферической формы	Контейнер: Ø 19 мм, высота 15 мм. Диаметр шара толкателя: Ø 8 мм			Отверждение вязких образцов
Окно из кварцевого стекла для УФ излучения	15 мм	15 мм	6 мм	Отверждение УФ-чувствительных материалов
Синхронные ДМА - ДЭА измерения	15 мм	15 мм	6 мм	Отверждение реактивных смол



Держатель образца для измерений пастообразных образцов при сжатии с вкладышем.



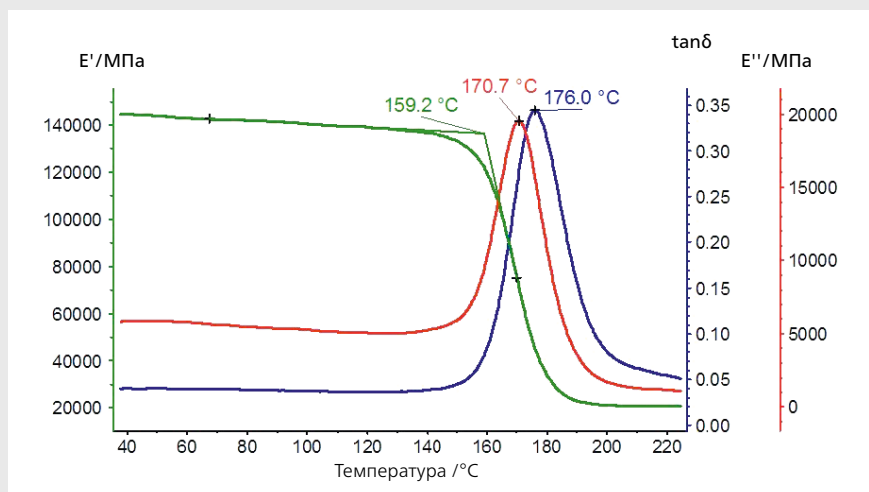
Держатель образца для одноплечевого изгиба со свободным толкателем специально используется для жестких материалов.



## Модуль Юнга углепластика

Держатель образца для одноплечевого изгиба со свободным толкателем был специально разработан для точного измерения очень жестких материалов. Образец жестко закреплен одним концом в держателе, на другой конец образца свободный толкатель оказывает осциллирующую нагрузку.

Результаты теста ДМА эпоксидной смолы, армированной углеродным волокном, представлены на графике с правой стороны. Высокий модуль упругости при 50°C (приблизительно 145000 МПа) демонстрирует, что этот материал жестче, чем металлический титан. Снижение кривой при 159°C (температура начала), связано с максимумом модуля потерь, и кривая коэффициента потерь при 171°C и 176°C показывает переход стеклования в эпоксидной матрице.

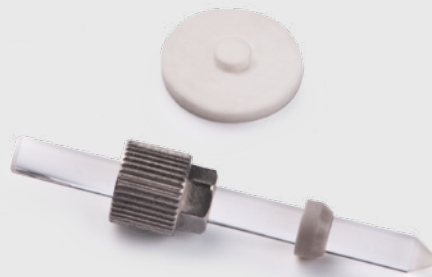


ДМА измерения очень жесткой, армированной углеродным волокном, эпоксидной смолы. Держатель образца для одноплечевого изгиба, 20-мм, со свободным толкателем. Параметры измерения: скорость нагревания 3 К/мин, частота: 10 Гц, амплитуда: ± 40 мкм.

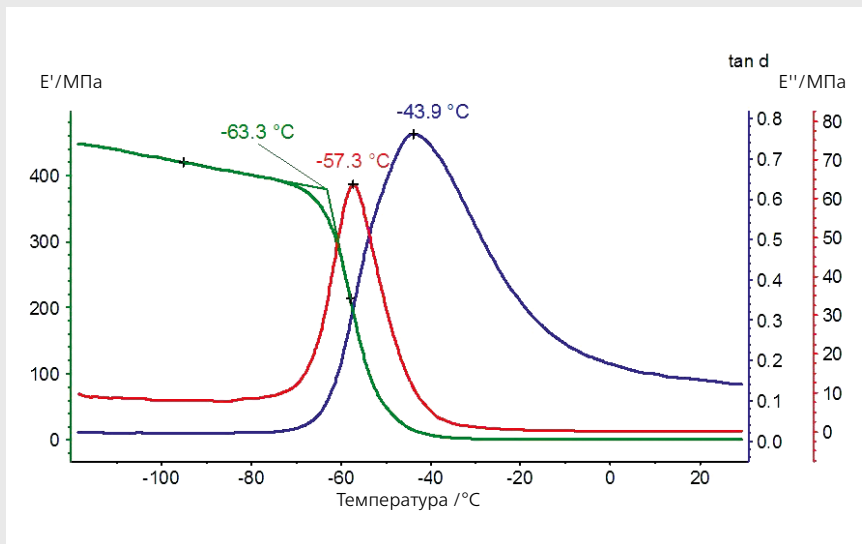
# Широкий выбор специальных держателей образцов

## Держатель образца для вспененной изоляции

Из-за очень низкой теплопроводности пенопластов и изоляционных материалов тепло может быть потеряно, если используется стандартный металлический толкатель. В таких измерениях целесообразно использовать специально разработанный толкатель из кварцевого стекла со свободным диском из оксида алюминия и держатель для режима сжатия.



Толкатель изготовлен из кварцевого стекла со свободным диском из оксида алюминия.



Измерения на сжатие изоляционной пены (толщина 5 мм). Держатель образца для измерений в режиме сжатия: толкатель из кварца/диск из оксида алюминия. Параметры измерения: от -120°C до 30°C при 2 К/мин, частота: 10 Гц, амплитуда: ±30 мкм.

## Вязкоупругие свойства пены

Пеноизоляция становится все более важным компонентом в строительной индустрии как для нового строительства, так и для реконструкции зданий. Пеноизоляция позволяет снизить потери тепла через стены, и, как следствие, снизить потребление энергии. Данный график показывает измерения пеноизоляции в интервале между -120°C и 30°C при частоте 10 Гц.

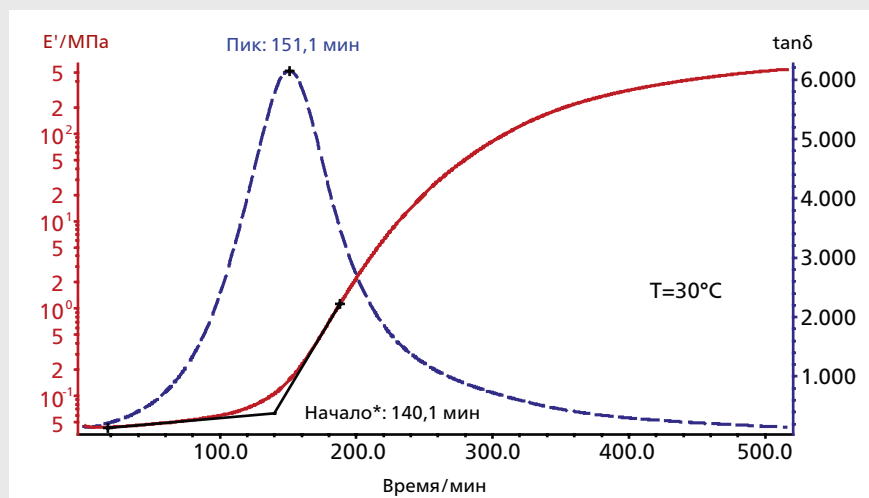
Снижение кривой модуля упругости начинается при -63°C и связано с пиками при -57°C (модуль потерь) и -44°C (tan delta). Это соответствует переходам стеклования данного изоляционного материала, тем самым ограничивая диапазон его применения.

## Отверждение жидкого эпоксидного клея

Результаты измерений ДМА жидкого эпоксидного клея показаны на графике ниже. Для тестирования был использован держатель образца с контейнером и шарообразным толкателем, который был

разработан для исследований отверждения жидких образцов. Увеличение модуля упругости через 140 минут (время начала) является результатом реакции отверждения. Это связано с пиком на кривой  $\tan\delta$

при 151-й минуте. Дальнейшее увеличение значения модуля упругости приблизительно через 500 минут показывает, что отверждение не завершилось.



ДМА измерение с помощью держателя образца с шарообразным толкателем.  
 Образец: эпоксидный клей.  
 Держатель образца: для сжатия с контейнером и шарообразным толкателем.  
 Параметры измерения: изотермический режим 30°C, частота: 1 Гц, амплитуда: ± 20 мкм.



Специальный держатель образца с шарообразным толкателем для исследования отверждения высоковязких жидкостей.

# Широкий выбор аксессуаров – влияние влажности и погружения

## Дополнительные аксессуары для любых специальных применений

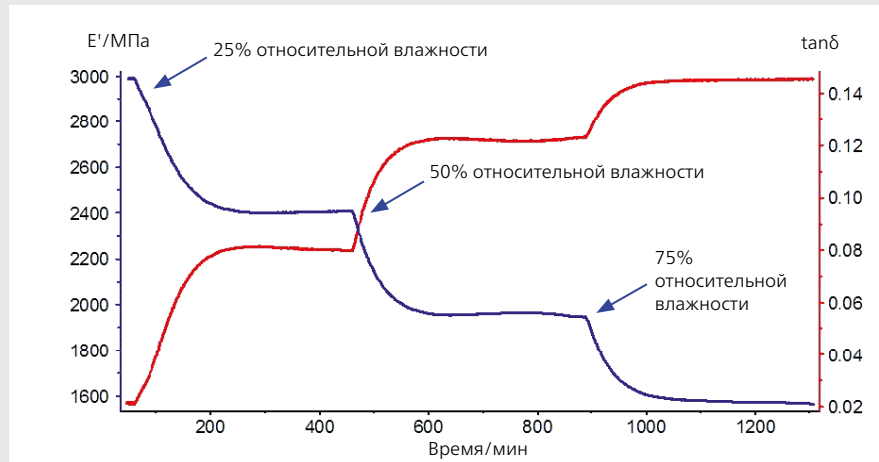
В дополнение к широкому выбору держателей образцов DMA 242 E Artemis предлагает множество других дополнительных аксессуаров. Например, к печи прибора может быть легко подключен генератор

влажности. Измерения могут проводиться с продувкой газом, содержащим определенное количество влаги. Это дополнение является полезным для изучения влияния влажности на дина-

мические механические свойства чувствительных к влажности образцов, таких как полиамиды и полиэфиры.

### Влияние влажности на механические свойства полиамидной пленки\*.

В этом примере полиамидная пленка была высушена и измерена в режиме растяжения с подключением генератора влажности. В начале теста генератор влажности был выключен, и модуль упругости был постоянным – примерно 3000 МПа. Как только влажность воздуха в печи изменилась, модуль упругости полимера резко уменьшился, установившись на уровне примерно 2400 МПа. Увеличение влажности до 50% и 75% (после 7 часов и 14 часов) привело к дальнейшему снижению модуля упругости. Эти результаты показывают, что содержание влаги оказывает большое влияние на модуль упругости полиамида, так как вода действует как пластификатор для полимеров.



**ДМА измерения с генератором влажности.**  
Образец: полиамидная пленка (толщина 50 мкм).  
Держатель образца: для режима растяжения.  
Параметры измерения: изотермический 30°C, частота: 1 Гц, амплитуда: ±75 мкм.  
Параметры генератора влажности: относительная влажность: 25%, 50%, 75% при 30°C, продувочный газ: N<sub>2</sub>, 10 мл/мин.



\*Мы благодарим профессора д-р Т. Родел и М. Вендт из Университета прикладных наук в Мерзебурге за проведенные измерения и обсуждение.

## Удобные измерения в жидкостях: погружная ванна

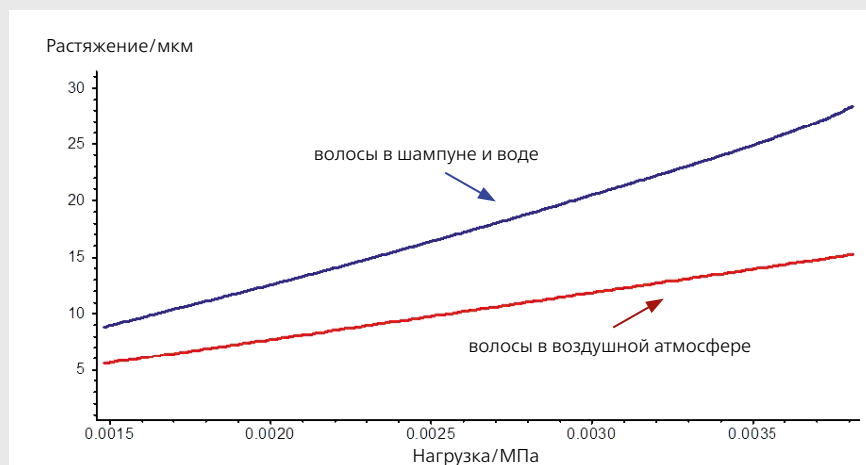
Погружная ванна может быть использована в комбинации с любым из доступных держателей образцов для исследования влияния данной жидкости на вязкоупругие свойства материала. Погружная ванна вставляется в стандартную печь, поэтому температура может варьироваться во время измерения. Единственным ограничением является температурное разложение образца или испарение жидкости.



Контейнер для погружных измерений.

## Влияние шампуня на человеческие волосы

Деформационные испытания с нагрузкой проводились на человеческих волосах в воздушной атмосфере и в смеси воды и шампуня. Затем эти волосы были использованы для измерений. Нагрузка варьировалась от 0,1 Н до 1 Н, при этом измерялось растяжение. График представляет собой участок напряженно-деформированного измерения. Кривые отличаются по наклону: волосы имеют более низкий модуль упругости - то есть мягче - при контакте со смесью воды и шампуня, чем с воздухом.



Влияние шампуня на мягкость волос.  
Пример: человеческий волос (толщина от 70 мкм до 80 мкм).  
Параметры измерений: режим растяжения, температура: 25°C, частота: 1 Гц, нагрузка варьировалась между 0,1 и 1 Н.

# Широкий выбор аксессуаров – УФ подключение и ДМА-ДЭА

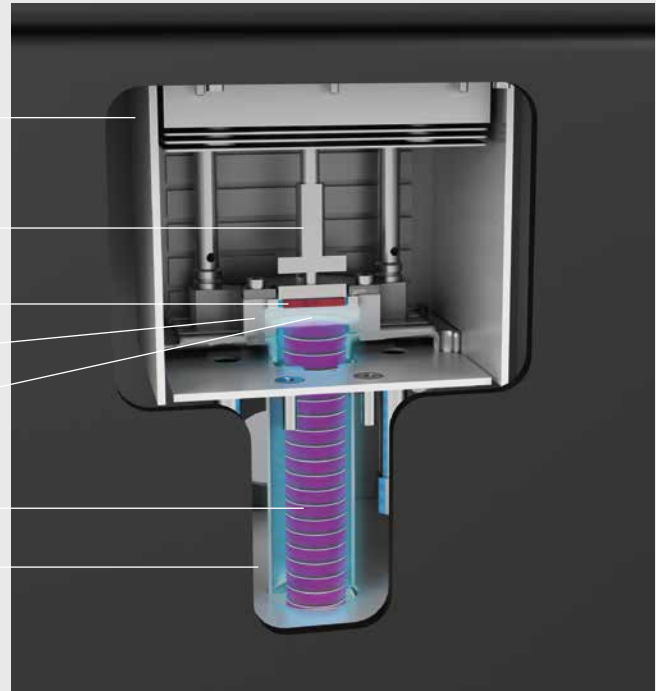
## Светоотверждение: подключение к источнику УФ излучения

Печь прибора DMA 242 E *Artemis* может быть подключена к источнику света для исследований отверждения УФ-реактивных материалов. Специальный держатель образца для сжатия позволяет свету проходить через окно из кварцевого стекла.

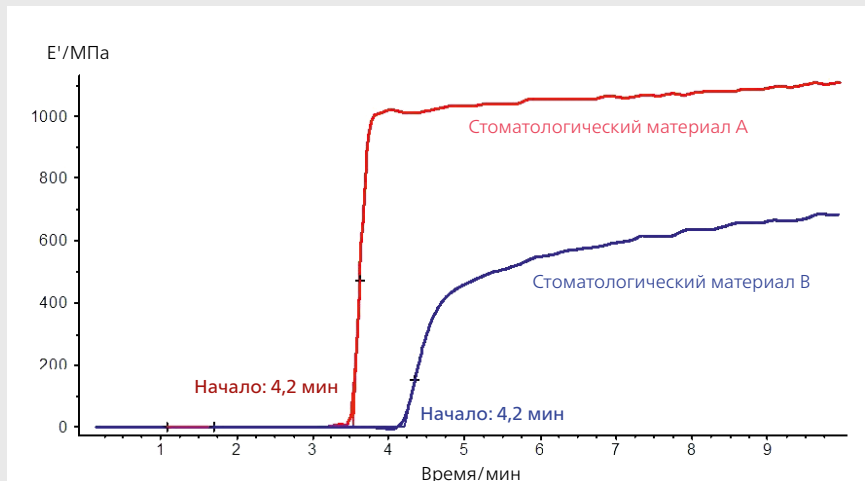


Специальный держатель образца с окном из кварцевого стекла для ДМА измерений под воздействием УФ излучения.

- печь
- толкатель
- образец
- держатель образца
- диск из кварцевого стекла
- источник ультрафиолетового излучения
- опорная трубка



Набор инструментов для подключения DMA 242 E *Artemis* к источнику УФ излучения.



Сравнение процессов отверждения двух стоматологических материалов. Параметры измерений: режим сжатия, температура: 30°C, частота: 10 Гц, амплитуда: ±15 мкм.

## УФ отверждение двух стоматологических материалов

Процессы отверждения двух стоматологических материалов под воздействием УФ излучения были сопоставлены для сравнения. Модуль упругости стоматологического материала А (красный) резко возрос после 3,5 минут, что может быть связано с его отверждением. Реакция стоматологического материала В (синий) началась почти через одну минуту и проходила медленнее, как можно видеть из сравнения наклонов графиков двух измерений. Разница окончательных значения модулей упругости (1100 МПа для материала А и 700 МПа для материала В) связана с различиями механических свойств отвержденных материалов.

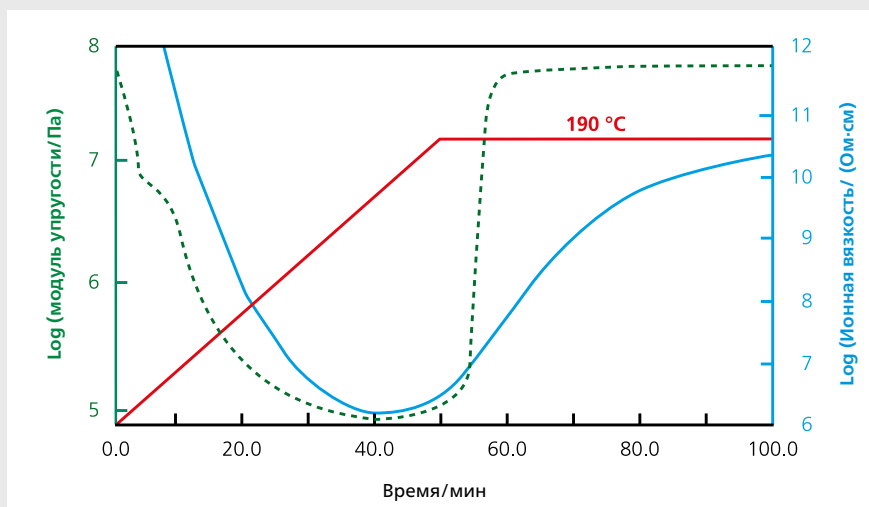




Держатель образца для синхронных ДМА-ДЭА измерений.

## Синхронные ДМА-ДЭА измерения: два измерения в одном

ДЭА (Диэлектрический анализ) представляет собой способ исследований отверждения реактивных смол с помощью мониторинга ионной вязкости. В синхронном ДМА-ДЭА измерении сенсор ДЭА установлен на специальном ДМА держателе образца для режима сжатия, и оба измерения ДМА и ДЭА выполняются одновременно по одной и той же температурной программе.



### Отверждение эпоксидной смолы.

Держатель образца: специальный держатель образца для сжатия и синхронных ДМА-ДЭА измерений.

Параметры измерений: нагревание от комнатной температуры до 190°C, скорость нагревания 3 К/мин и изотермический режим при 190°C, частота: 10 Гц.

## ДМА-ДЭА измерения эпоксидной смолы

В этом примере неотвержденную эпоксидную смолу нагревают до 190°C и далее поддерживают постоянную температуру. Из-за размягчения образца при нагревании сначала происходит снижение модуля упругости и ионной вязкости. Увеличение модуля упругости связано с началом отверждения. Последующее резкое увеличение модуля упругости демонстрирует чувствительность ДМА в начале реакции отверждения.

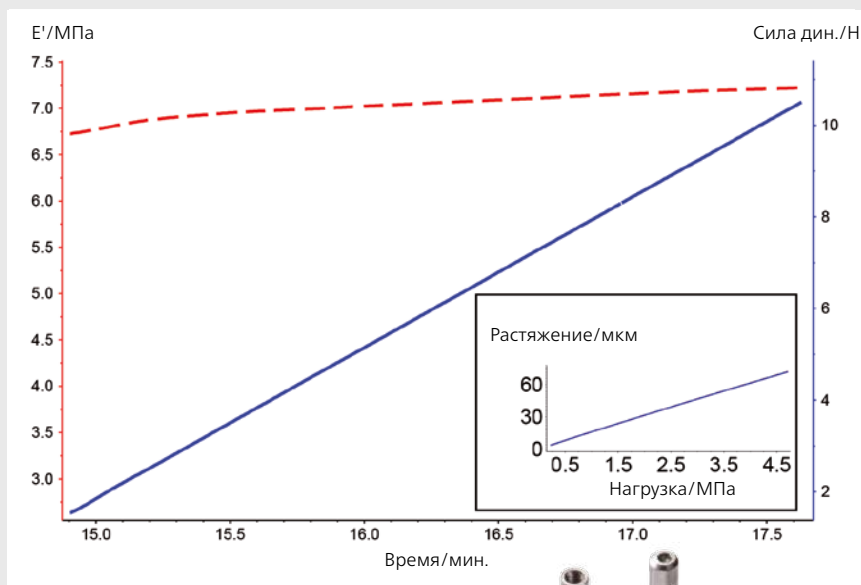
При изотермической выдержке при 190°C модуль упругости стабилизируется в режиме сжатия. Тем не менее, ионная вязкость продолжает увеличиваться; более чувствительный ДЭА метод позволяет определить, что отверждение не закончилось через 100 минут.

# Различные режимы измерения – повышенная нагрузка, ТМА режим



## Повышенная нагрузка для дополнительной информации

Новый DMA 242 E Artemis работает с нагрузкой до 24 Н. Благодаря такому широкому диапазону могут быть исследованы очень толстые и жесткие образцы, особенно в режимах сжатия и растяжения. В этом примере натуральный каучук измеряли в режиме сжатия. Максимум статической нагрузки был установлен до 12 Н. Динамическая нагрузка изменялась в пределах от 0,5 Н до 10,5 Н, при этом измерялась полученная деформация (напряженно-деформированный тест). На графике показаны динамическая нагрузка и результирующий модуль упругости. Кроме того, деформация показана как функция от приложенной нагрузки (вставка), чтобы убедиться, что испытания проводились в области Гука (линейность кривой).



Stress-sweep тест (напряженно-деформированное измерение) натурального каучука толщиной 2,01 мм.

Держатель образца: для сжатия, диаметр 15 мм. Параметры измерения: комнатная температура, частота: 10 Гц.



Держатель образца для измерений при сжатии.

## Статический режим: ползучесть, релаксация, ТМА

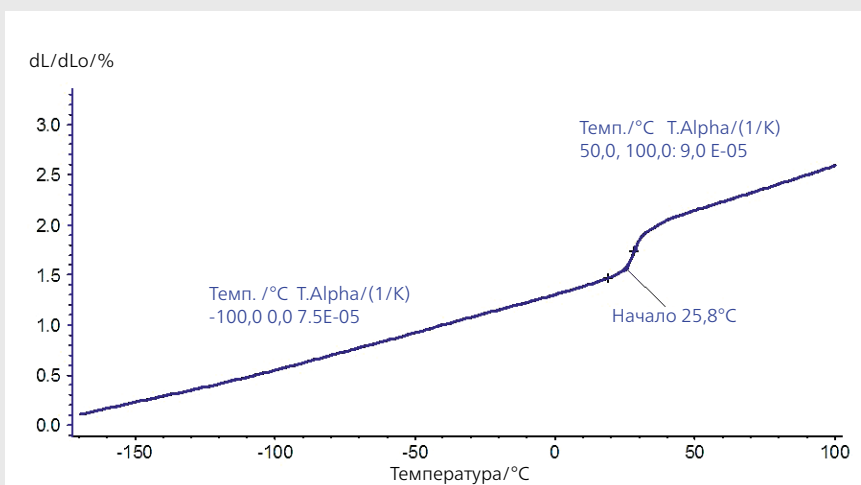
Наряду с динамическими измерениями DMA 242 E *Artemis* также позволяет проводить измерения в трех статических режимах: ползучести, релаксации и ТМА.

В режиме ползучести к образцу приложено постоянное статическое усилие, и измеряется результирующая деформация.

В измерениях релаксации определяется статическое усилие,

необходимое для достижения определенной постоянной деформации.

В режиме ТМА определяется термическое расширение материалов. Для этого небольшое приложенное к образцу статическое усилие и полученное при этом изменение длины измеряют как функцию от повышения температуры.



### ТМА измерение ПТФЭ.

Держатель образца: сжатие в режиме ТМА.

Параметры измерения: -170°C до 100°C со скоростью нагревания 2 К/мин, статическое усилие: 0,1 Н.

## ТМА режим: тепловое расширение ПТФЭ

В этом примере изменение длины ПТФЭ было измерено в температурном диапазоне от -170°C до 100°C с DMA 242 E *Artemis* в ТМА режиме.

В начале измерения длина образца линейно возрастает. Ступенька в графике расширения образца при 26°C связана с переходом ПТФЭ от хорошо упорядоченной фазы к неупорядоченной фазе.

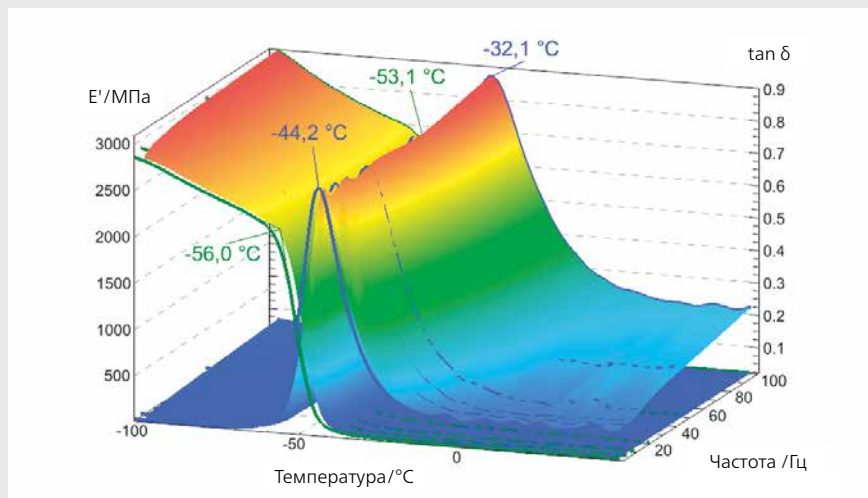
# Различные режимы работы – 3D-представление, мультимастотные режимы

## Мультимастотные измерения эластомера

Дополнительно к возможности проведения измерений на нескольких частотах, пользователь также имеет возможность увидеть результаты в трехмерном представлении: вязкоупругие свойства исследуемого материала можно рассматривать как функцию температуры и частоты.



Держатель образца для двухплечевого изгиба.



В этом примере вязкоупругие свойства эластомера были определены при нагревании от  $-100^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$  и при частотах от 1 до 100 Гц.

График показывает кривые модуля упругости и фактора потерь в зависимости от температуры и частоты. Для каждой частоты снижение кривой  $E'$  связано с пиком в кривой  $\tan\delta$ . Этот эффект обусловлен стеклованием образца. Как и ожидалось, переход стеклования смещается в сторону значительно более высоких температур с увеличением частоты. Значения, приведенные на графике, являются температурами onset кривой модуля упругости и пиковых температур кривой фактора потерь для 1 Гц и 100 Гц.

3D-график вязкоупругих свойств эластомера (высота: 2,66 мм, ширина: 7,77 мм).

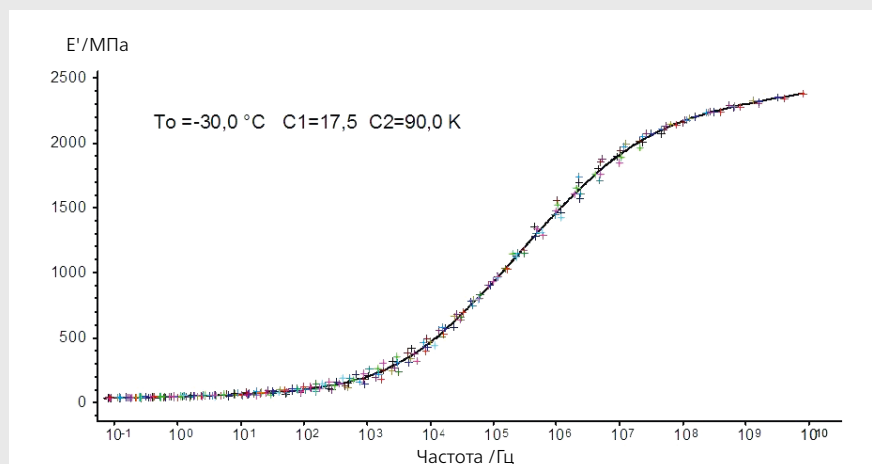
Держатель образца: для двухплечевого изгиба 2x16 мм.

Параметры измерения: нагревание от  $-100^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$  при 2 К/мин, частота: 1, 5, 10, 20, 50 и 100 Гц, амплитуда:  $\pm 40$  мкм.

## Мастер-кривая и кривая Аррениуса для эластомера

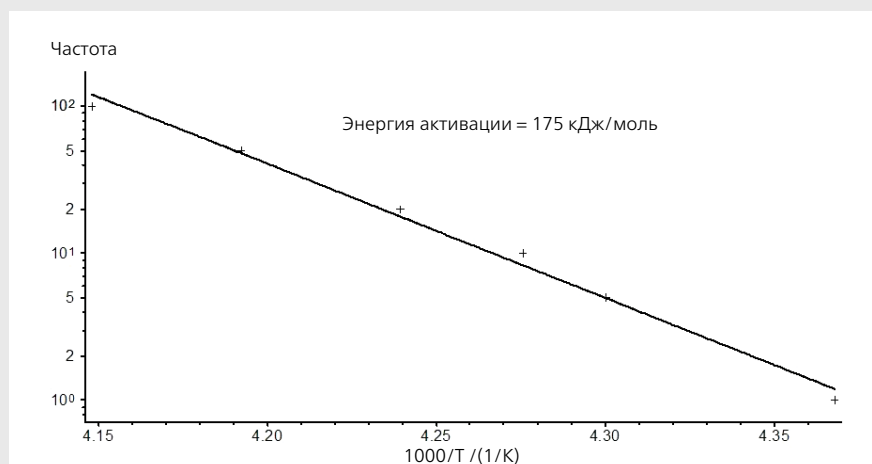
Вязкоупругое поведение полимера как функция частоты может легко и быстро быть определено с использованием мастер-кривой, рассчитанной из одного многочастотного измерения. Чтобы сделать это, используется температурно-временная суперпозиция: зависимость отношения  $E'$ ,  $E''$  и  $\tan\delta$

от частоты могут быть экстраполированы на частоты, превышающие диапазон измерения прибора. С уравнением WLF (Williams-Landel-Ферри) фактор сдвига может быть вычислен и мастер-кривая может быть установлена в указанной эталонной температуре.



Мастер-кривая эластомера при эталонной температуре от  $-30^{\circ}\text{C}$ .

В этом примере мастер-кривая динамического модуля упругости рассчитывалась при эталонной температуре  $-30^{\circ}\text{C}$ . Программное обеспечение ДМА оценивало коэффициенты  $C1$  и  $C2$  фактора сдвига согласно уравнению WLF. Значение  $E'$  может быть получено в экстраполированном диапазоне частот до  $10^{10}$  Гц.



Кривая Аррениуса для эластомера.

Кроме того, программное обеспечение *Proteus*<sup>®</sup> позволяет рассчитывать энергию активации для перехода стеклования. Чтобы сделать это, логарифмическая зависимость фактора потерь ( $\tan\delta$ ) построена от абсолютной температуры. Энергия активации определяется как наклон линейной аппроксимации через полученные точки. Была определена энергия активации  $175$  кДж/моль для перехода стеклования эластомера.

# DMA 242 E *Artemis* – программное обеспечение *Proteus*<sup>®</sup>

DMA 242 E *Artemis* управляется программным обеспечением *Proteus*<sup>®</sup>, работающим в 32- и 64-битной операционной системе Windows<sup>®</sup> и включает в себя все необходимое для проведения измерений и обработки полученных результатов. Удобное меню в сочетании с автоматизированными процедурами делают *Proteus*<sup>®</sup> очень простым в использовании и позволяют проводить самые тонкие анализы.

## Ключевые характеристики основного программного обеспечения

- Для операционных систем Windows XP Professional<sup>®</sup>, Vista<sup>®</sup> (Enterprise, Business), Windows 7 (Professional<sup>®</sup>, Enterprise<sup>®</sup>, Ultimate<sup>®</sup>).
- Многозадачность: одновременное измерение и оценка.
- Многомодульность: одновременное управление несколькими различными приборами (до 4) с одного компьютера.
- Комбинированный анализ: сравнение и/или оценка ДСК, ТГА, СТА, ДИЛ, ТМА, ДМА и ДЭА измерений в одном окне.
- Сравнительный анализ до 64 кривых/температурных сегментов из одинаковых или различных измерений (кривая сравнения).
- Хранение результатов анализа и состояния, когда все окна анализа и просмотр графиков сохраняются в файл для последующего восстановления и продолжения анализа.
- Распечатка возможна на 9 языках.
- Экспорт графики с результатами оценки в буфер обмена или распространенные форматы, такие как EMF, PNG, BMP, JPG, TIF или PDF.
- ASCII-файл экспорт данных для обработки данных с более обширными программами анализа (например, расстояние между пиками).

- Поддержка по электронной почте: сообщения о состоянии измерений или файлы могут быть отправлены автоматически после измерения или при возникновении ошибки.
- Online оценка измерения в процессе (снимок).

## Основные характеристики программного обеспечения для измерений

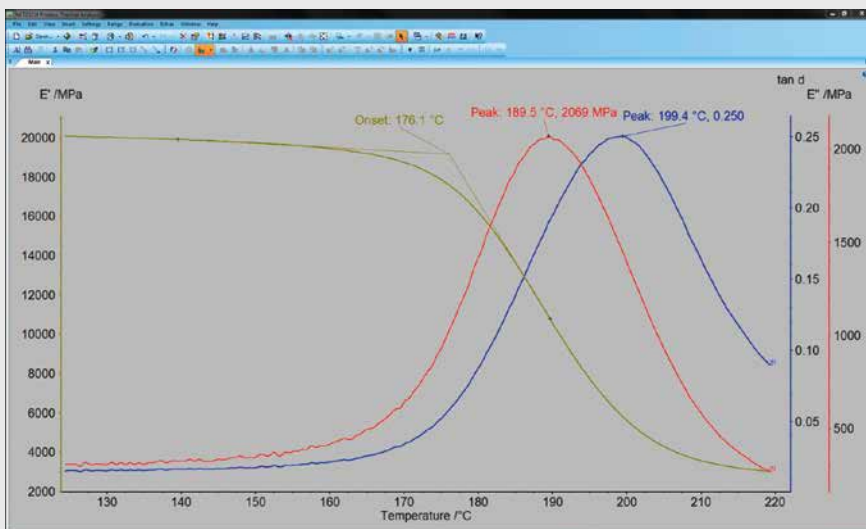
- Несколько программируемых температурных сегментов (изотермический, динамический) и температурных наклонов с одной или несколькими частотами, свободный выбор значений нагрузки, амплитуды деформации и частоты для каждого сегмента.
- Онлайн графики до восьми различных свободно выбираемых осей, с онлайн масштабированием, масштабированием времени или температуры, одного сегмента или кривой в полном виде.
- Процедуры калибровки: динамическая масса, пустая система, жесткость системы, настройка вращения, температура.
- Управление колебаниями: легкий выбор контроля напряжений, деформаций и специального управления в смешанном режиме (управление деформацией с дополнительным ограничением усилия) для материалов с вязко-упругими свойствами, проявляющими значительные изменения.

## Встроенные специальные режимы измерений

- Режим ползучести.
- Режим релаксации с диапазоном деформации до 20 мм (в зависимости от размера образца и выбранной геометрии держателя образца).
- Stress-деформационный режим.
- Strain-деформационный режим.
- Iso деформация.
- TMA режим.
- Режимы нагрузки: диапазон нагрузки с максимальным усилием (24 Н), диапазон нагрузки с повышенным разрешением (8 Н).

## Ключевые особенности аналитического программного обеспечения

- Определение модуля упругости  $E'$  модуля потерь  $E''$  и фактора потерь  $\tan\delta$ .
- 1-я и 2-я производные.
- Суперпозиция частотно-масштабируемых кривых (мастер-кривые).
- Графическое представление кривых измерения с возможностью масштабирования по оси Y, например, модуля упругости  $E'$ , модуля потерь  $E''$ , фактора потерь  $\tan\delta$ , амплитуды.
- Функциональная возможность 3-D представления для многочастотных данных ДМА - для визуализации, например, частотно-зависимого сдвига температуры стеклования.
- Определение энергии активации (Аррениус-анализ).
- Определение Cole-Cole участка (графическое представление ( $E''$ ) или  $(\tan\delta)$  как функции ( $E'$ )).
- Графическое представление статических изменений длины, в абсолютных единицах (dL в мкм) для всех видов держателей образцов, а также в относительных единицах ( $dL/L_0$ ,  $dL/L_0$  в %) для всех держателей образцов типа «сжатия» или «растяжения».
- TMA режим: графическое представление статического изменения длины, „dL“ (режим TMA), с возможностью для коррекции калибровки и вычисления коэффициентов расширения (КТР) в динамических сегментах.
- Графическое представление поведения ползучести и релаксации.
- Графическое представление усилия и напряженно-деформированного поведения, график напряженно-деформированного поведения.



Типичные измерения ДМА с графическим представлением  $E'$ ,  $E''$  и  $\tan\delta$ .

Группа NETZSCH является средней компанией в сфере машино- и приборостроения, находящейся в семейном владении, располагающей производственными, сбытовыми и сервисными организациями в разных странах мира.

Три бизнес подразделения – Анализ & Тестирование, Измельчение & Диспергирование и Насосы & Системы предлагают высокотехнологичные индивидуальные решения для потребностей самого высокого уровня. Более 3000 сотрудников в 163 центрах по производству и продажам в более чем 28 странах мира, обеспечивают нашим заказчикам всестороннюю и квалифицированную сервисную поддержку.

Если Вам необходим термический анализ, адиабатическая реакционная калориметрия или определение теплофизических свойств – обращайтесь в NETZSCH. Более 50 лет опыта в прикладных исследованиях, современная линейка приборов и широкий спектр предлагаемых услуг гарантируют, что наши технические решения не только смогут соответствовать всем Вашим потребностям, но и превзойдут Ваши ожидания.

[www.netzsch.com/n11171](http://www.netzsch.com/n11171)



NETZSCH-Gerätebau GmbH  
Wittelsbacherstraße 42  
95100 Selb  
Germany  
Tel.: +49 9287 881-0  
Fax: +49 9287 881 505  
[at@netzsch.com](mailto:at@netzsch.com)

[www.netzsch.com](http://www.netzsch.com)