

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ

УДК:: 539.3(043)

На правах рукописи

КУТИМОВ КИЯС САБИРОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
РЕОНОМНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МАЛЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ
(КОНЦЕПЦИЯ ПЕРМАНЕНТНОЙ ПАМЯТИ)**

6D060300 – Механика

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Отечественный научный консультант:	Искакбаев Алибай Искакбаевич, д.ф.-м.н., профессор
Зарубежный научный консультант:	Cesare Oliviero Rossi, PhD, ассоциированный профессор

Республика Казахстан
Алматы, 2025 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ РЕОНОМНОГО МАТЕРИАЛА ДО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ.....	12
1.1 МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЯЮЩЕЙ СТАДИИ ПОЛЗУЧЕСТИ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЧИСТОМ РАСТЯЖЕНИИ	14
1.2 МОДЕЛЬ ПОЛЗУЧЕСТИ, ОПИСЫВАЮЩАЯ УСТАНОВИВШУЮСЯ И УСКОРЯЮЩУЮСЯ СТАДИИ.....	21
1.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ.....	22
1.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ОБРАЗЦОВ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПРИ $\sigma = const$	31
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛЗУЧЕСТИ И РЕЛАКСАЦИИ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ЗАТУХАЮЩЕЙ ПАМЯТИ.....	38
2.1 ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ И ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ	38
2.2 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИМЕРБЕТОНА.	39
2.3 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ СМОЛЫ EDT-10	41
2.4 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ АРАМИДНОГО ВОЛОКНА СВМ.....	42
2.5 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРАФИТА	43
2.6 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА	50
2.7 РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ.....	52
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ	55
3.1 КРИТЕРИЙ ПОДОБИЯ КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИИ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ.....	55
3.2 КРИТЕРИЙ ПОЧТИ-ПОДОБИЯ КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИЙ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ.	63
3.3 КРИВЫЕ РЕЛАКСАЦИЙ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ НЕ ПОДОБНЫ.....	68
Заключение	84
Список использованных источников	87

Приложение 1	92
Приложение 2	94
Приложения 3	112

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В диссертационной работе используются ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.32-2017 — «Отчёт о научно-исследовательской работе». Структура и правила оформления.

ГОСТ 7.1-2003 — Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

СТ РК 1225-2019 — Дорожные и аэродромные асфальтобетонные смеси и асфальтобетон. Технические условия.

СТ РК 1373-2013 — Битумы и битумные вяжущие. Дорожные вязкие нефтяные битумы. Технические условия.

СТ РК 1284-2004 — Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

ε	- деформация, %;
E	- модуль упругости;
σ	- напряжение, МПа;
t	- время,
τ	- время до момента наблюдения;
α	- параметр ползучести, $0 < \alpha < 1$;
δ	- параметр ползучести, $\delta > 0$;
$\psi(\sigma)$	- функция условной мгновенной нагрузки
β	- параметр ползучести, $\beta > 0$;
λ	- параметр ползучести, $\lambda > 0$;
ε_e	- значения экспериментальной деформации ползучести, %
ε_0^e	- экспериментальная условная мгновенная деформация, %;
ε_0^m	- модельная (расчётная) условная мгновенная деформация, %;
ε_m	- расчётные значения деформации ползучести, %;
k_e	- экспериментальный реологический параметр,
k_m	- расчётный (теоретический) или модельный реологический параметр,
$\bar{k}_e$	- средний экспериментальный реологический параметр,
$\bar{k}_m$	- средний расчётный или модельный реологический параметр,
T	- температура,
$\dot{\sigma}$	- скорость нагружения, МПа/с;
A_*	- удельная работа разрушения, Дж/см ³ ;
$\Gamma(\cdot)$	- гамма-функция
a, γ	- коэффициенты корреляции
A, n	- параметры долговечности материала
B, m	- константы материала, характеризующие установившуюся стадию процесса ползучести

ВВЕДЕНИЕ

Многие природные материалы (грунт, горные породы, древесина, природный асфальт) и искусственные материалы (металлы, их сплавы, полимеры, бетон, композиты) проявляют вязкоупругие свойства в зависимости от температуры и уровня нагружения.

Одной из основных задач механики деформируемого твердого тела является моделирование процессов деформирования вязкоупругих материалов. Модели условно делятся на два класса: склерономные и реономные. Склерономные модели характеризуются инвариантностью определяющих соотношений к преобразованиям времени. Реономные модели описываются операторными соотношениями, зависящими от времени. Простейшая реономная физическая линейная модель деформируемого твердого тела – это модель вязкоупругого тела, описывающая свойства ползучести и релаксации. Ползучестью называется увеличение деформации со временем при постоянной нагрузке. Диаграмма закона изменения деформации — кривая ползучести. Релаксация — это уменьшение напряжения при постоянной деформации.

В настоящее время существуют усовершенствованные теории и методы вязкоупругости, позволяющие определять и описывать вязкоупругие свойства материалов. Различают линейную и нелинейную вязкоупругость. Линейная теория хорошо развита. Несмотря на то, что в 1913 году В. Вольтерра предложил описывать нелинейную вязкоупругость интегральным уравнением с двумя членами, её теория и методы всё ещё находятся на стадии развития. Во многих инженерных задачах расчёты прочности, устойчивости и долговечности выполняются без учёта или с незначительным учётом вязкоупругих свойств материалов.

Рассмотрим простейшие одномодульные модели вязкоупругого тела, которые позволяют понять физическую сущность и общую характеристику вязкоупругости. Вязкоупругая модель состоит из двух элементов. Один из них — упругий элемент Гука. Закон Гука записывается в виде:

$$\sigma' = E\varepsilon',$$

где σ — упругое напряжение, E — модуль упругости, ε' — упругая деформация.

Второй элемент — ньютоновский, т.е. вязкий элемент. Закон Ньютона записывается как:

$$\sigma'' = \eta \frac{d\varepsilon''}{dt},$$

где σ'' — вязкое напряжение, η — коэффициент вязкости, ε'' — вязкая деформация.

Законы Гука и Ньютона можно записать в интегральной форме через интегральные операторы:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t P(t - \tau) d\sigma(\tau);$$
$$\sigma(t) = \int_0^t R(t - \tau) d\varepsilon(\tau),$$

где $P(t)$ — функция ползучести, $R(t)$ — функция релаксации.

В теории линейной и нелинейной вязкоупругости задача сводится к нахождению ядра ползучести и релаксации, которые соединены определённым интегральным соотношением между напряжением, деформацией и временем:

$$\phi(\varepsilon(t)) = \int_0^t P(t - \tau) d\sigma(\tau), \quad \sigma(t) = \int_0^t R(t - \tau) \phi'(\varepsilon(\tau)) d\varepsilon(\tau), \quad t \geq 0.$$

Впервые нелинейное определяющее соотношение для описания ползучести вязкоупругих материалов предложил Ю.Н. Работнов. Оно до сих пор является предметом математических исследований и используется для описания свойств различных материалов: стеклопластиков, нейлона, смол, графита, полимербетона, биологических тканей и др. С использованием ядра Работнова задача подробно исследовалась А.В. Хохловым.

Основной задачей при построении модели деформирования нелинейной вязкоупругой среды реономного типа является выбор структуры ядра, его параметров и соответствие экспериментальным данным. Наиболее целесообразно использовать дробно-экспоненциальное или ядро Абеля, так как они позволяют точно описывать кривую ползучести при постоянном напряжении.

Цель диссертационной работы — разработка эффективного метода определения параметров нелинейного уравнения Работнова для описания реономных процессов.

В работе рассматриваются различные материалы:

- стеклопластик ТС 8/3-250 — описан уравнением Работнова и решён через изохронные кривые;
- нейлон 6 — описан уравнением с ядром Работнова и использованы преобразования Лапласа-Карсона;
- СВМ-арамидного волокна и смолы ЕДТ-10 — через уравнение Больцмана-Вольтерры с экспоненциальным ядром;
- полиэфирный полимербетон — также через теорию Больцмана-Вольтерры;
- поликристаллический графит — через уравнение Вольтерра-Фреше;
- эпоксифенольный стеклопластик — через интегральную зависимость Лидермана-Розовского.

Если необходимо оценить механическое состояние материалов при

длительной эксплуатации, то следует учитывать влияние истории нагружения. История нагружения реономных материалов исследовалась многими авторами при постоянных нагрузках и др., при ступенчатых нагрузках и др., при различных типах циклических нагрузок с чередованием нагружения и разгрузки и др., а также при нагрузках с постоянной скоростью и т.д.

Анализ литературы показывает, что параметрическое уравнение нелинейного реономного типа может использоваться для описания поведения материалов при различных режимах нагружения. Применение таких уравнений оказывается эффективным в инженерных расчётах конструкций из материалов.

В данной работе исследуется один из реономных материалов — асфальтобетон. Мелкозернистый горячий плотный асфальтобетон широко применяется в различных странах, в том числе в Казахстане, для покрытия верхнего слоя автомобильных дорог. Асфальтобетонные покрытия подвергаются сложным изменениям под воздействием механических усилий от автомобильных колёс и температурных воздействий окружающей среды. Известно, что механические свойства асфальтобетона зависят от температуры и параметров нагружения, таких как величина, продолжительность и скорость нагружения. Поэтому исследование деформируемости, прочности и долговечности асфальтобетона при различных режимах нагружения и температурах является одной из актуальных практических задач.

С этой целью в «Казахстанском дорожном научно-исследовательском институте» проводятся реальные экспериментальные испытания образцов асфальтобетона на одноосное прямое растяжение в различных режимах. Институт занимается проектированием, строительством, реконструкцией и капитальным ремонтом автомобильных дорог. Здесь исследуется влияние режимов нагружения на процесс ползучести образцов асфальтобетона. Также проводится анализ влияния режимов нагружения на процесс разрушения асфальтобетона с целью определения его прочностных характеристик.

Настоящая диссертационная работа направлена на дальнейшее развитие теоретического и экспериментального исследования процесса ползучести материалов.

В 1920–30-х годах была сформирована концепция накопления повреждений. Эта идея оказалась очень плодотворной и получила дальнейшее развитие в теории разрушения на основе ползучести, предложенной Л.М. Качановым.

Во всех твёрдых телах, особенно в поликристаллах, существуют микронаряжения. Одной из причин их появления является микронеоднородность и микроанизотропия структуры твёрдых тел. Существенным фактором, влияющим на поле микронаряжений, является любое деформирование, особенно пластическое.

В местах максимальных микронаряжений появляются микротрещины и микропоры. В процессе развития пластической деформации их количество и размеры увеличиваются. Этот процесс представляет собой накопление повреждений и является первой стадией разрушения. Когда участки микроповреждений объединяются в макротрещину, первая стадия завершается.

В настоящее время это направление механики сплошной среды называется механикой повреждений (damage mechanics).

Ю.Н. Работнов, учитывая взаимодействие процессов ползучести и разрушения, а также влияние концентрации напряжений на длительную прочность, обобщил критерии Качанова. Можно также отметить критерии В.В. Новожилова, где параметр повреждения тесно связан с историей пластической деформации, а также критерий В.В. Москвитина, учитывающий историю нагружения в предельных условиях. В настоящее время В.В. Болотин и А.И. Искакбаев продолжают развивать континуальную концепцию разрушения Работнова и Качанова. Исследованием процессов повреждения также занимаются многие другие авторы.

Из-за накопления повреждений процесс разрушения в реономных материалах происходит быстрее.

Исследования, проведённые в диссертации, выполнены в соответствии с планом научно-исследовательских работ.

Актуальность темы исследования. Современное материаловедение требует всестороннего изучения поведения материалов при длительном воздействии нагрузок, поскольку процессы ползучести и релаксации напряжений существенно влияют на их долговечность и эксплуатационные характеристики. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью прогнозирования поведения не только асфальтобетона, но и других реономных материалов, которые применяются в строительстве и машиностроении. В этом исследовании проводится комплексный анализ экспериментальных данных, включающий как результаты собственных экспериментов, так и данные, представленные в научных публикациях других авторов. Использование экспериментальных данных различных исследователей позволяет сформировать более точную и обоснованную модель для описания поведения материалов в условиях ползучести и релаксации. Полученные результаты могут быть применены в практике создания более устойчивых материалов, оптимизированных для эксплуатации в условиях длительного воздействия нагрузок, что в конечном итоге улучшит качество и долговечность дорожной и другой инженерной инфраструктуры.

Цель работы. Создание модели, описывающей процессы ползучести и релаксации реономных материалов для предсказания их деформационного поведения при различных температурах и скоростях нагружения.

Задачи исследования:

- Разработка модели для описания стадий ползучести и релаксации напряжений в асфальтобетоне и других материалах.
- Изучение влияния температуры и скорости нагружения на деформационные свойства материалов на различных стадиях ползучести.
- Сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных как в рамках собственного исследования, так и из других источников, для обоснования применимости модели к различным материалам.

Объектом исследования являются различные реономные материалы и их поведение в условиях ползучести и релаксации напряжений, включая влияние температуры.

Предметом исследования являются особенности проявления ползучести и релаксации напряжений в различных реономных материалах.

Методы исследования. Исследование выполняется в соответствии с традиционным подходом механики деформируемого твердого тела, основываясь на положениях механики сплошной среды и экспериментально наблюдаемых фактах. Применяются нелинейные интегральные уравнения, гипотеза перманентной памяти, а также методы математической статистики.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в развитии подходов к описанию процессов ползучести и релаксации напряжений в реономных материалах, таких как асфальтобетон. Применение гипотезы перманентной памяти и нелинейных интегральных уравнений углубляет существующие представления о механике деформируемых тел и позволяет более точно моделировать поведение материалов в условиях длительного воздействия нагрузок. Полученные модели и выводы могут быть использованы для прогнозирования деформационного поведения материалов в реальных условиях эксплуатации, что способствует оптимизации состава материалов и условий их применения в дорожном строительстве и других отраслях. Это исследование предоставляет инструменты для повышения долговечности и надежности конструкций, подвергающихся длительным нагрузкам, что особенно важно для создания устойчивой и безопасной инфраструктуры.

Научная новизна исследования заключается в разработке и обосновании новой модели, описывающей процессы ползучести и релаксации напряжений в реономных материалах с учетом гипотезы перманентной памяти и применения нелинейных интегральных уравнений. Проведен комплексный анализ влияния температурных условий на поведение различных реономных материалов в условиях длительного воздействия, что позволило уточнить механизмы деформации и накопления повреждений. Полученные результаты и предложенные зависимости расширяют существующие представления о поведении материалов под длительной нагрузкой и могут служить основой для дальнейших исследований в механике сплошной среды и реологии.

Постановка задач исследования

Для достижения цели исследования, направленного на создание модели, описывающей процессы ползучести и релаксации реономных материалов при малых деформациях в условиях различных температур и скоростей нагружения, были поставлены следующие задачи:

1. **Разработка математической модели** для описания стадий ползучести и релаксации напряжений в асфальтобетоне и других реономных материалах с учетом гипотезы перманентной памяти и нелинейных интегральных уравнений.
2. **Изучение влияния температуры и скорости нагружения** на деформационные свойства реономных материалов, включая

асфальтобетон, полимербетон, металлические сплавы и другие материалы, на различных стадиях ползучести.

3. **Сравнительный анализ экспериментальных данных**, полученных как в рамках собственного исследования, так и из научных публикаций других авторов, для подтверждения универсальности предложенной модели и её применимости к различным типам материалов.
4. **Определение критериев подобия кривых релаксации** реономных материалов, таких как критерий подобия, критерий почти-подобия и отсутствие подобия, с целью систематизации и улучшения прогноза поведения материалов при длительном воздействии нагрузки.

1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ РЕОНОМНОГО МАТЕРИАЛА ДО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

При испытании образцов на ползучесть при постоянной нагрузке, как известно, скорость ползучести сначала убывает (первая стадия), потом сохраняет в течение некоторого времени почти постоянное значение (вторая стадия), наконец снова начинает возрастать (третья стадия). Третья стадия ползучести предшествует разрушению.

В настоящее время существует относительно небольшое количество надежных экспериментальных данных, характеризующих ползучесть реономных материалов вплоть до разрушения в широком диапазоне напряжений. Это связано с тем, что испытания при малых напряжениях могут продолжаться десятки и сотни тысяч часов. Поэтому зачастую либо такие испытания не доводятся до разрушения (т.е. длительная прочность не рассматривается), либо они проводятся до разрушения без замера деформаций в процессе ползучести. Ограниченность и разрозненность фактического материала приводит к тому, что вопрос о формулировке механического уравнения состояния и кинетических уравнений, позволяющих учесть процесс разрушения, во многом остается открытым.

В данной главе представлены результаты испытаний на ползучесть при чистом растяжении асфальтобетонных образцов до разрушения, проведенных в КаздорНИИ, а также предлагается модель для описания одноосной ползучести реономного материала вплоть до разрушения.

В данной главе даны и проанализированы результаты экспериментального определения характеристик деформирования и разрушения асфальтобетона при одиннадцати скоростях нагружения от 0,000563 МПа/с до 0,652 МПа/с, различающихся в 1158 раз. Для исследования был выбран традиционно используемый в дорожном строительстве горячий мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б, приготовленный с применением вязкого битума марки БНД 100/130. Испытания были выполнены при температуре 22-24°C в специально изобретенной и собранной установке по схеме прямого растяжения. Образцы асфальтобетона имели форму прямоугольной балочки с размерами 5х5х15 см. Установлено, что с начала нагружения до момента разрушения асфальтобетон деформируется нелинейно. Степень нелинейности увеличивается с повышением нагрузки. Скорость нагружения оказывает сильное влияние на характеристики деформирования и разрушения асфальтобетона: при увеличении скорости нагружения в 1158 (почти 1200) раз от 0,000563 МПа/с до 0,652 МПа/с время разрушения, удельная работа разрушения и деформация разрушения уменьшаются в 242, 160 и 3 раза соответственно, а прочность увеличивается в 5 раз. Зависимости характеристик разрушения асфальтобетона (время разрушения, деформация разрушения, удельная работа разрушения и прочность) от скорости нагружения высокой точностью описываются степенной функцией.

Введение

Основные сведения о ползучести получаются в результате стандартных

испытаний на растяжение постоянной нагрузкой. Данные этих испытаний представляются в виде так называемых кривых ползучести. Типичная кривая ползучести изображена на рисунке 1 [1, 2]. Здесь $\varepsilon(t)$ – относительное удлинение; t – время; ε_0 – мгновенная деформация, зависящая только от приложенного напряжения. На первом участке (первая стадия) скорость деформирования переменная, она убывает со временем, достигая минимального значения. На втором участке (вторая стадия) скорость ползучести постоянна. На третьем участке (третья стадия) скорость ползучести опять возрастает, пока не наступит разрыв образца. Не всегда процесс ползучести протекает в соответствии с указанной схемой. На кривой может отсутствовать первый либо третий участок, первый может сразу переходить в третий.

Уменьшение скорости деформации на первом участке Работнов [3] объясняет упрочнением материала, деформация образца сопровождается такими структурными изменениями, которые затрудняют ползучесть. Выход на второй участок означает исчерпание способности материала упрочняться. Ускоренная ползучесть на третьем участке согласно Коста де Андраде [1, 2], связана с изменением площади сечения образца. Следовательно, при постоянном напряжении третья стадия ползучести не должна была бы проявляться. Однако, третья стадия ползучести при постоянном номинальном напряжении существует у многих материалов [4-13]. Разрушение материала в условиях длительного действия нагрузки происходит вследствие образования трещин [14-22]. Появление трещин уменьшает эффективную площадь поперечного сечения образца и согласно Работнову [3, 14] увеличивает эффективное напряжение. Эффективное напряжение не равно номинальному напряжению, вот почему на третьей стадии ползучести происходит увеличение скорости ползучести. Когда эффективная площадь поперечного сечения стремится к нулю и образец ломается [14]. Разрыв происходит, когда микроскопические трещины сливаются и образуют макротрещину разрушения.

Вопрос о движении или равновесии макротрещины в такой постановке не представляет существенного значения, основную роль играет кинетика накопления микротрещин. Когда плотность микротрещин достигает критического значения, происходят разрушения [3, 14].

Под разрушением твердого тела, в прямом смысле, понимается разделение его на части, связанное с образованием новых поверхностей. Процесс образования этих новых поверхностей может быть описан как рост трещины. При этом термин «трещина» по Работнову [3, 14] употребляется здесь в наиболее общем смысле и относится к изменению геометрии.

Названия всех характеристик кривой ползучести реономного материала, приведенных на рис. 1.1, приведены в табл. 1.1.

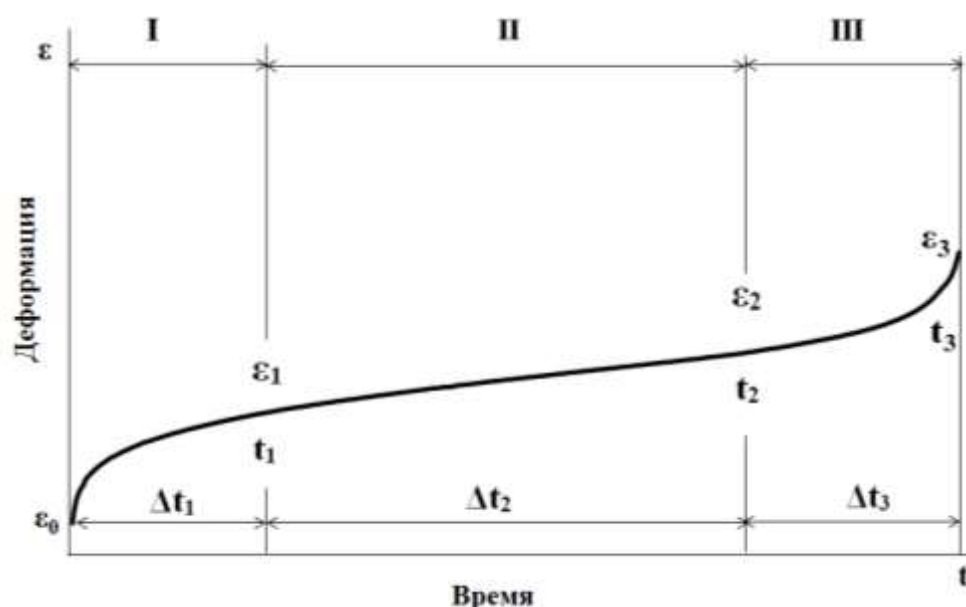


Рисунок 1.1. Кривая ползучести

Таблица 1.1.

Обозначение характеристики	Наименование характеристики
I	участок неуставившейся ползучести (первая стадия)
II	участок установившейся ползучести (вторая стадия)
III	участок ускоренной ползучести (третья стадия)
Δt_1	длительность участка неуставившейся ползучести
Δt_2	длительность участка установившейся ползучести
Δt_3	длительность участка ускоренной ползучести
ε_1	деформация в конце участка I (в начале участка II) кривой ползучести
ε_2	деформация в конце участка II (в начале участка III) кривой ползучести
ε_3	деформация разрушения, соответствующая моменту разрушения

1.1 МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЯЮЩЕЙ СТАДИИ ПОЛЗУЧЕСТИ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЧИСТОМ РАСТЯЖЕНИИ

Концепция Работнова [3, 14, 15]. Согласно этой концепции, предполагается существование некоторой функциональной зависимости скорости ползучести от основных параметров (напряжение, температура) и от ряда параметров, характеризующих структуру материала в рассматриваемый момент времени. Для этих внутренних параметров строятся свои кинетические уравнения, по которым они определяются в зависимости от истории нагружения, температуры и т.д. Используя подобные уравнения и исключив внутренние параметры, можно

найти характеристики ползучести и разрушения реономных материалов по результатам опытов, не изучая саму микроструктуру.

Следуя [3], систему уравнений, определяющих кинетику разрушения и развитие деформации ползучести, запишем в виде:

$$\dot{\varepsilon}^c = B \frac{\sigma^m}{(1-\omega)^q}, \quad \dot{\omega} = A \left(\frac{\sigma}{1-\omega} \right)^n. \quad (1.1)$$

Под ε^c понимается деформация ползучести, полная деформация $\varepsilon = \varepsilon^c + \varepsilon_0(\sigma)$, где $\varepsilon_0(\sigma)$ - мгновенная деформация, состоящая в свою очередь из упругой и пластической части. Поэтому зависимость $\varepsilon_0(\sigma)$ однозначна только при монотонном изменении σ . Точкой обозначено дифференцирование по времени. Константы материала B и m характеризуют установившуюся стадию процесса ползучести, они зависят от температуры. Константы A и n , зависящие от температуры, характеризуют длительную прочность материала. Внутренний параметр $\omega(t)$ – параметр повреждений материала по Работнову. Мера повреждений является скаляром $0 \leq \omega \leq 1$. Нижняя грань соответствует неповрежденному, верхняя – полностью поврежденному. Неизвестную величину q определяем из условия:

$$\varepsilon^c(t^*) = \varepsilon_*^e, \quad (1.2)$$

где t^* - время до разрушения при чистом растяжении $\sigma_0 = \text{const}$ (σ_0 – номинальное напряжение);

ε_*^e - экспериментальная предельная деформация ползучести в момент разрушения материала $t=t^*$.

Влияние переменной температуры можно учитывать, приняв в первом приближении [3]:

$$B = B_0 \exp\left(-\frac{V_c}{kT}\right); \quad A = A_0 \exp\left(-\frac{V_a}{kT}\right).$$

Энергии активации ползучести V_c и трещинообразования V_a являются различными. Следуя [3], чисто хрупким разрушением будем называть такое, которое не сопровождается заметным изменением площади поперечного сечения. При постоянном номинальном напряжении из второго уравнения (1.1) находим:

$$\omega(t) = 1 - \left(1 - \frac{t}{t^*}\right)^{\frac{1}{n+1}}, \quad (1.3)$$

где t^* - время хрупкого разрушения

$$t^* = \frac{1}{A(n+1)\sigma_0^n}. \quad (1.4)$$

Из (1.3) следует $\omega(0)=0$ и $\omega(t^*)=1$. Через $\omega(t)$ обозначена степень уменьшения эффективной площади поперечного сечения образца вследствие повреждения. Пренебрегая изменением площади поперечного сечения образца вследствие ползучести Работнов получил:

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0}{1-\omega(t)}, \quad (1.5)$$

где σ_0 – номинальное напряжение.

Функция $\sigma(t)$ (1.5) может быть истолкована как среднее напряжение на площади поперечного сечения свободной от трещин. График зависимости $\sigma(t)$ (1.5) показан на рис. 1.2.

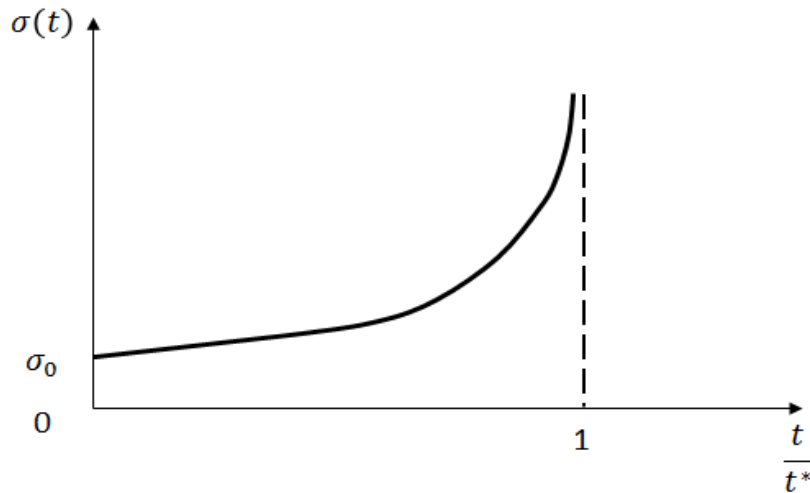


Рисунок 1.2. Эффективное напряжение

С учетом (1.3), из (1.1) находим:

$$\varepsilon^c(t) = B\sigma_0^m \frac{(n+1)t^*}{(n+1-q)} \left[1 - \left(1 - \frac{t}{t^*} \right)^{\frac{(n+1-q)}{n+1}} \right], \quad (1.6)$$

где $n+1-q>0$. Используя (1.6) и (1.4), из (1.2) найдем выражения для определения величины q :

$$q = n+1 - \frac{1}{\varepsilon_*^e} \left(\frac{B}{A} \right) \sigma_0^{(m-n)}. \quad (1.7)$$

Из (1.6) при $t=t^*$ имеем:

$$\varepsilon_*^e = \frac{(n+1)t^*}{(n+1-q)} B \sigma_0^m. \quad (1.8)$$

Из (1.6) и (1.8) получаем уравнение для описания ускоряющейся стадии ползучести реономных материалов

$$\varepsilon^c(t) = \varepsilon_*^e \left[1 - \left(1 - \frac{t}{t^*} \right)^{\left(\frac{n+1-q}{n+1} \right)} \right], \quad (1.9)$$

Здесь

$$n+1-q > 0; \varepsilon^c(0) = 0 \quad (1.10)$$

В качестве примера рассмотрим ползучесть нержавеющей стали Х18Н10Т [5]. Температура во время испытаний была постоянной и равной 850°C. Был испытан 21 образец из одной плавки в состоянии поставки. Образцами служили трубки с внешним диаметром 12 мм, толщиной стенки 0,5 мм и рабочей длиной 70...100 мм. Эксперименты проводились при действии на образец постоянной растягивающей нагрузки.

Экспериментальные кривые ползучести, приведенные на рис. 1.3-1.6 не имеют участка неустановившейся ползучести, поведение материала в этих испытаниях в основном характеризуется стадией ускоряющейся ползучести, однако, при относительно малых временах ползучесть можно условно считать установившейся. На рис. 1.3-1.6 представлены осредненные кривые одноосной ползучести при начальных напряжениях σ_0 , равными 40, 50, 60 и 80 МПа (сплошная линия). Обработка экспериментальных данных ползучести и длительной прочности стали Х18Н10Т методом наименьших квадратов дали следующие значения констант материала:

$$\begin{aligned} m &= 3,2; \quad B = 6,3 \cdot 10^{-9} (\text{МПа})^{-3,2} \text{ час}^{-1}; \\ n &= 3,2; \quad A = 3,3408 \cdot 10^{-8} (\text{МПа})^{-3,2} \text{ час}^{-1}; \end{aligned} \quad (1.11)$$

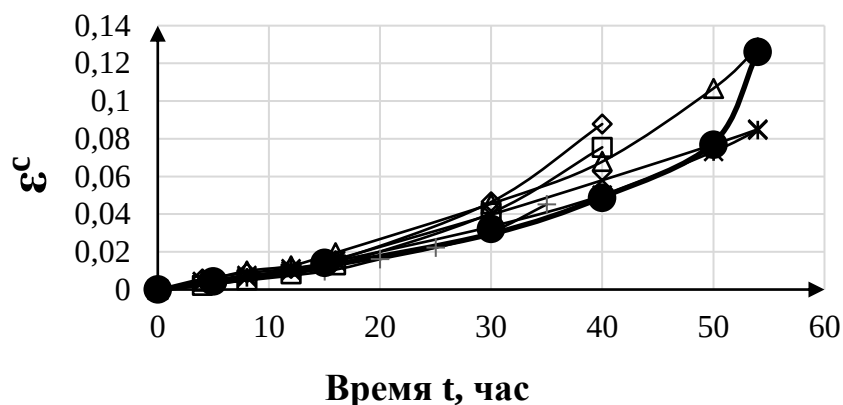


Рисунок 1.3. Кривые ползучести при $\sigma_0 = 40$ МПа

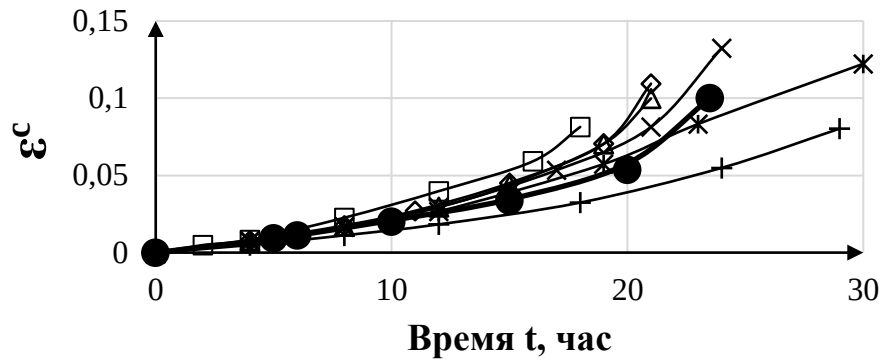


Рисунок 1.4. Кривые ползучести при $\sigma_0 = 50$ МПа

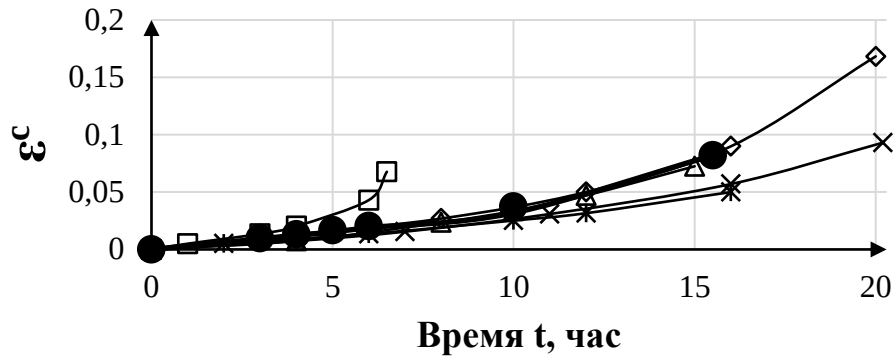


Рисунок 1.5. Кривые ползучести при $\sigma_0 = 60$ МПа

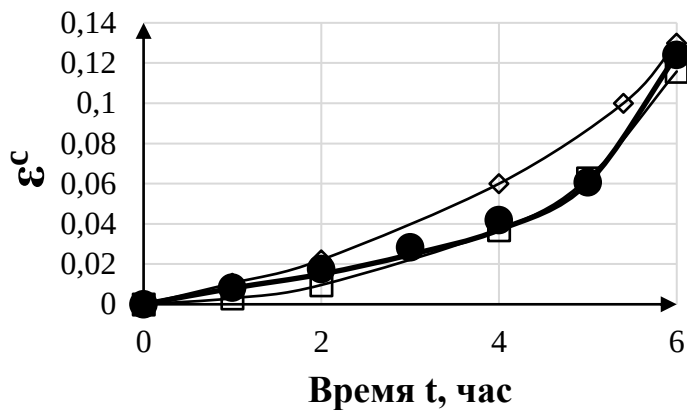


Рисунок 1.6. Кривые ползучести при $\sigma_0 = 80$ МПа

В табл. 1.2 приведены количество N образцов, испытанных при каждом σ_0 , а также полученные в экспериментах средние для каждого σ_0 значения скорости установившейся ползучести $\dot{\varepsilon}_e^c$, времени разрушения t_*^e и предельной деформации ползучести ε_*^e . Найденные с учетом (1.11) параметры ползучести и длительной прочности сведены в табл. 1.2 с индексами «m», при этом принято

$$m = q = 3,2 \quad (1.12)$$

Таблица 1.2.

σ_0 , МПа	N	$\dot{\varepsilon}_e^c$, ч ⁻¹	t_*^e , ч	ε_*^e	$\dot{\varepsilon}_m^c$, ч ⁻¹	t_m^* , ч	ε_*^m
40	6	0,0008	54,0	0,126	0,0008	53,25	0,104

Продолжение таблицы 1.2

50	7	0,0019	23,5	0,100	0,0017	26,07	0,104
60	6	0,0030	15,5	0,082	0,0031	14,55	0,104
80	2	0,0077	6,0	0,124	0,0077	5,79	0,104

Таблица 1.3. $\sigma_0 = 40$ МПа

t, час	0	5	15	30	40	50	54
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0036	0,0123	0,0295	0,049	0,0777	0,126
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0043	0,014	0,032	0,0486	0,0768	0,126
$\varepsilon_1^c(t)$	0	0,0046	0,0147	0,0330	0,0493	0,0750	0,11

Таблица 1.4. $\sigma_0 = 50$ МПа

t, час	0	5	6	10	15	20	23,5
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,009	0,0112	0,0209	0,0345	0,0576	0,1
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0092	0,0112	0,0201	0,0337	0,0537	0,1
$\varepsilon_1^c(t)$	0	0,0099	0,0122	0,0216	0,0361	0,0567	0,1

Таблица 1.5. $\sigma_0 = 60$ МПа

t, час	0	3	4	5	6	10	15,5
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0092	0,0125	0,0151	0,019	0,0319	0,082
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0097	0,0131	0,0167	0,0204	0,0372	0,082
$\varepsilon_1^c(t)$	0	0,0076	0,0103	0,0132	0,0163	0,0308	0,084

Таблица 1.6. $\sigma_0 = 80$ МПа

t, час	0	1	2	3	4	5	6
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,008	0,015	0,0247	0,037	0,0605	0,124
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0082	0,0175	0,0284	0,0419	0,0607	0,124
$\varepsilon_1^c(t)$	0	0,0087	0,0188	0,0302	0,0441	0,0627	0,115

Анализ таблицы 1.2 показывает, что соотношение (1.5) накладывает очень жесткие ограничения на зависимость между участком установившейся ползучести и третьим участком [22]. Недостаток уравнений (1.1), имеющие четыре материальные константы, состоит в том, что они слишком «жестко» определяют геометрию кривой ползучести $\varepsilon^c(t)$.

Достоинство этой модели заключается в том, что она может достаточно просто охарактеризовать основные особенности испытаний, в которых наблюдается третья стадия ползучести до разрушения. Однако четыре материальные константы, входящие в исходные уравнения, не позволяют в общем случае адекватно описывать наблюдаемые в экспериментах зависимости $\varepsilon_e^c(\sigma_0)$, $t_e^*(\sigma_0)$ и $\varepsilon_*^c(\sigma_0)$. В результате определение кривой ползучести при

постоянном напряжении σ_0 сводится к вычислению скорости ползучести $\dot{\varepsilon}_m^c$ в начале испытания (условно скорости установившейся ползучести), времени разрушения t_m^* и предельной деформации ε_*^m (используемые уравнения таковы, что скорость ползучести при $t = t_m^*$ бесконечна). Если зафиксировать на плоскости (t, ε^c) величины $\dot{\varepsilon}_m^c$, t_m^* и ε_*^m , то им соответствуют единственная теоретическая (модельная) кривая ползучести и бесчисленное множество экспериментальных кривых ползучести, различающихся внутренней геометрией [23]. Среди них могут быть, с одной стороны, кривые, которые в течение длительного времени t незначительно отличаются от кривой установившейся ползучести; с другой стороны, могут быть кривые, которые при малых t характеризуются ярко выраженной ускоряющейся стадией; могут быть также промежуточные типы экспериментальных кривых ползучести. Для того, чтобы иметь возможность гибко учитывать внутреннюю геометрию экспериментальных кривых ползучести, следует внести дополнительную величину q . Используя (1.11) из (1.4) и (1.7) находим:

$$\begin{aligned} \sigma_0 = 40 \text{ МПа}; A = 3,2943 \cdot 10^{-8} (\text{МПа})^{-3,2} \text{ час}^{-1}; \\ q = 2,6825, \\ \sigma_0 = 50 \text{ МПа}; A = 3,7066 \cdot 10^{-8} (\text{МПа})^{-3,2} \text{ час}^{-1}; \\ q = 2,5003, \\ \sigma_0 = 60 \text{ МПа}; A = 3,1357 \cdot 10^{-8} (\text{МПа})^{-3,2} \text{ час}^{-1}; \\ q = 1,7498, \\ \sigma_0 = 80 \text{ МПа}; A = 3,2264 \cdot 10^{-8} (\text{МПа})^{-3,2} \text{ час}^{-1}; \\ q = 2,625 \end{aligned} \quad (1.13)$$

С учетом (1.11) и (1.13) по формуле (1.9) вычислены теоретические значения ε_m^c для материала стали при температуре 850°C. Значения $\varepsilon_m^c(\sigma_0)$ на рис. 1.3-1.6 отмечены точками. Для наглядности они сведены в табл. 1.3-1.6. Там же для сравнения приведены экспериментальные значения $\varepsilon_e^c(\sigma_0)$ [23, 24]. Из табл. 1.3-1.6 следует, модель (1.9) достаточно точно описывает внутреннюю геометрию экспериментальных кривых ползучести.

Положим

$$\varepsilon_*^e \approx \varepsilon_*^m, \quad t^* = t_*^e. \quad (1.14)$$

С учетом (1.14), уравнение (1.9) запишем в виде:

$$\varepsilon_1^c(t) = \varepsilon_*^m \left[1 - \left(1 - \frac{t}{t_*^e} \right)^{\left(\frac{n+1-q}{n+1} \right)} \right]. \quad (1.15)$$

Теперь величину q находим из соотношения (1.14):

$$\frac{n+1-q}{n+1} = \frac{\ln(1 - \frac{\varepsilon_1^c(t_k)}{\varepsilon_*^m})}{\ln(1 - \frac{t_k}{t_*^e})} \quad (1.16)$$

где $t_k \in (0, t_*^e)$.

Если q константа материала, то кривая $\left(\frac{t}{t_*^e}; \frac{\varepsilon_1^c(t)}{\varepsilon_*^m}\right)$ - инвариантная кривая.

Для стали Х18Н10Т

$$q=2,352. \quad (1.17)$$

С учетом (1.17) по формуле (1.15) вычислены теоретические значения $\varepsilon_1^c(t)$, они сведены в табл. 1.3-1.6. Из анализа следует модель (1.15) и (1.17) практически точно описывает внутреннюю геометрию кривых ползучести.

Разработана модель для описания ускоренной ползучести до разрушения индивидуальных образцов стали Х18Н10Т при $T=850^\circ\text{C}$ без учета эффекта упрочнения. Экспериментальные значения приведены в Приложении 1.

1.2 МОДЕЛЬ ПОЛЗУЧЕСТИ, ОПИСЫВАЮЩАЯ УСТАНОВИВШУЮСЯ И УСКОРЯЮЩУЮСЯ СТАДИИ

Уравнение кривой ползучести (1.9) Работнова описывает разупрочнение материала на третьей стадии ползучести. Однако в экспериментах вместе с ускоряющейся стадией наблюдается достаточно длинная предшествующая ей установившаяся стадия ползучести. Так как экспериментальные данные обычно имеют значительный естественный разброс, то для аналитического описания кривых ползучести с обеими стадиями будем использовать закон ползучести (1.15).

Обобщенная инвариантная кривая имеет вид:

$$\left(\frac{t_{III}}{\Delta t_3}; \frac{\varepsilon_{III}}{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}\right), \quad (1.18)$$

где Δt_3 -длительность участка ускоренной ползучести;

ε_2 – деформация в конце участка II (в начале участка III) кривой ползучести;

ε_3 – деформация разрушения, соответствующая моменту разрушения;

$$t_{III} \in (0, \Delta t_3); \quad \varepsilon_{III} \in (0, \varepsilon_3 - \varepsilon_2);$$

$$t_{III} = t - t_2; \quad \varepsilon_{III} = \varepsilon(t) - \varepsilon_2(t_2);$$

$$t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_2$$

где Δt_1 -длительность участка неустановившейся ползучести;

Δt_2 - длительность участка установившейся ползучести;
 $\varepsilon(t)$ - полная деформация ползучести реономных материалов.

Модель ползучести запишем в виде:

$$\varepsilon_{III}(t_{III}) = (\varepsilon_3 - \varepsilon_2) \left[1 - \left(1 - \frac{t_{III}}{\Delta t_3} \right)^{\left(\frac{n+1-q}{n+1} \right)} \right]; \quad (1.19)$$

$$\frac{n+1-q}{n+1} = \frac{\ln \left(1 - \frac{\varepsilon_{III}(t_k)}{\varepsilon_3 - \varepsilon_2} \right)}{\ln \left(1 - \frac{t_k}{\Delta t_3} \right)};$$

где $t_k \in (0, \Delta t_3)$.

При $t_2 = 0$, из (1.19) следует (1.15) и (1.16).

1.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Результаты многочисленных испытаний на ползучесть [11-13, 32-35] показали, что по характеру деформирования кривую ползучести асфальтобетона можно разделить на три участка. Все образцы разрушались хрупко при малых деформациях. В данной работе впервые параметр поврежденность материала $\omega(t)$ используется для аналитического описания разупрочняющейся стадии процесса ползучести асфальтобетона, завершающейся разрушением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ АСФАЛЬТОБЕТОН

Для испытания в лабораторных условиях был принят горячий плотный мелкозернистый асфальтобетон типа Б. Этот вид асфальтобетона широко используется в дорожном строительстве в Казахстане и во многих странах мира. Приготовленный асфальтобетон удовлетворяет требованиям стандарта Казахстана STRK 1225 [25]. Более подробную информацию о составе асфальтобетона можно получить в работах [26, 27].

БИТУМ

Для приготовления асфальтобетона был использован дорожный битум марки 100-130 по пенетрации. Битум произведен Павлодарским нефтехимическим заводом (Казахстан) методом прямого окисления из нефти Западной Сибири (Российская Федерация). Битум удовлетворяет требованиям стандарта

Казахстана STRK 1373 [28], его марка по SuperpavePG (Performancegrade) 64-40 [29]. Содержание битума в асфальтобетоне составляет 4,8 % от веса сухого минерального материала. Более подробная информация о характеристиках битума содержится в работах [27, 30].

ИСПЫТАНИЕ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ДО РАЗРУШЕНИЯ

Исследование процесса деформирования асфальтобетона было осуществлено путем испытания образцов (50x50x150 мм) на ползучесть при прямом растяжении при температурах +60°C, +48°C, +36°C, +24°C, +12°C, 0°C, -12°C и -24°C. При каждой температуре было выбрано несколько подходящих уровней напряжения. Все образцы асфальтобетона при испытании находились под приложенной нагрузкой до разрушения. От начала до конца испытания всех образцов приложенная нагрузка и температура поддерживались постоянными. Для анализа процесса деформирования был выбран 241 образец асфальтобетона. Более подробная информация об испытанных образцах асфальтобетона и приложенных напряжениях приведена в таблице 1.7.

Испытания асфальтобетонных образцов при разных постоянных температурах и напряжениях были выполнены в установке (рисунок 1.7), которая была специально изобретена [31] и собрана в Казахстанском дорожном научно-исследовательском институте. Более подробная информация о приготовлении асфальтобетонных образцов и их испытании имеется в статьях [26, 27].



Рисунок 1.7. Установка для определения механических характеристик материалов

Таблица 1.7. Характеристики испытанных образцов асфальтобетона

Температура, °C	Число образцов	Пределы напряжения, МПа	
		min	max
+60	42	0,0081	0,06
+48	35	0,0083	0,1123
+36	30	0,0189	0,146
+24	70	0,0363	0,557

Продолжение таблицы 1.7

+12	12	0,2	0,6
0	26	0,3	2,0
-12	14	0,5	3,0
-24	12	0,785	2,271
Всего:	241	-	-

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧАСТКОВ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПРИ РАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Кривая ползучести асфальтобетона имеет три характерных участка (рисунок 1.8): участок I неустановившейся ползучести; участок II установившейся ползучести; участок III ускоренной (accelerating) ползучести. На участке I деформация увеличивается со временем, но скорость деформирования со временем уменьшается. На участке II деформация увеличивается с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_{II}$. На третьем участке скорость деформирования со временем увеличивается и в конце участка испытываемый образец разрушается. Названия всех характеристик кривой ползучести асфальтобетона, приведенных на рисунке 1.8, приведены в таблице 1.1.

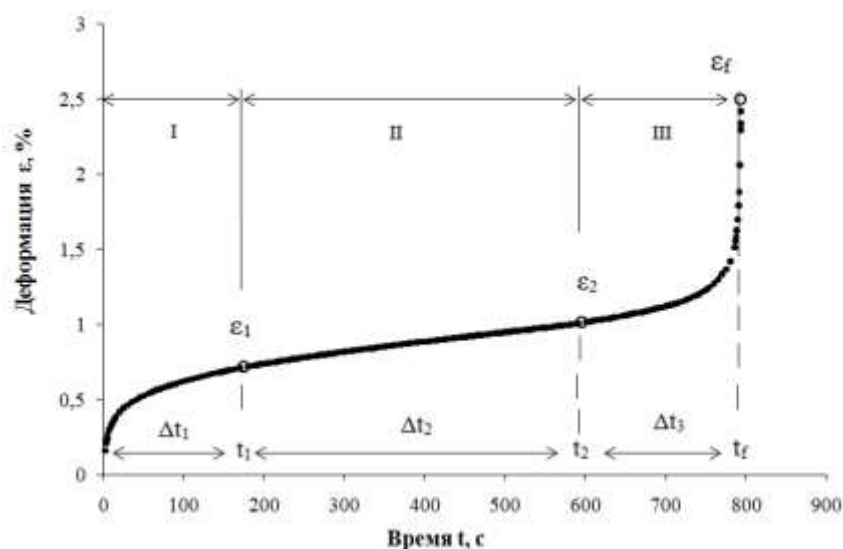


Рисунок 1.8. Кривая ползучести асфальтобетона под напряжением $\sigma = 0,041$ МПа при температуре $T = 48^{\circ}\text{C}$

Скорость неустановившейся ползучести асфальтобетона.

Уменьшение скорости деформации асфальтобетона на первом участке (рисунок 1.9) объясняется упрочнением материала, деформация образца сопровождается такими структурными изменениями асфальтобетона, которые затрудняют ползучесть. Выход на второй участок означает исчерпание способности асфальтобетона упрочняться.

Кривая изменения скорости деформирования асфальтобетона хорошо

моделируется уравнением вида [35]:

$$\dot{\varepsilon}_I(t) = \frac{\varepsilon_0 \cdot \delta}{t^\alpha}, \quad (1.20)$$

где $0 \leq t \leq \Delta t_1$;

Δt_1 - длительность неустановившейся ползучести;

ε_0 - условно мгновенная деформация;

$0 < \alpha < 1$; $\delta > 0$ - параметры ползучести.

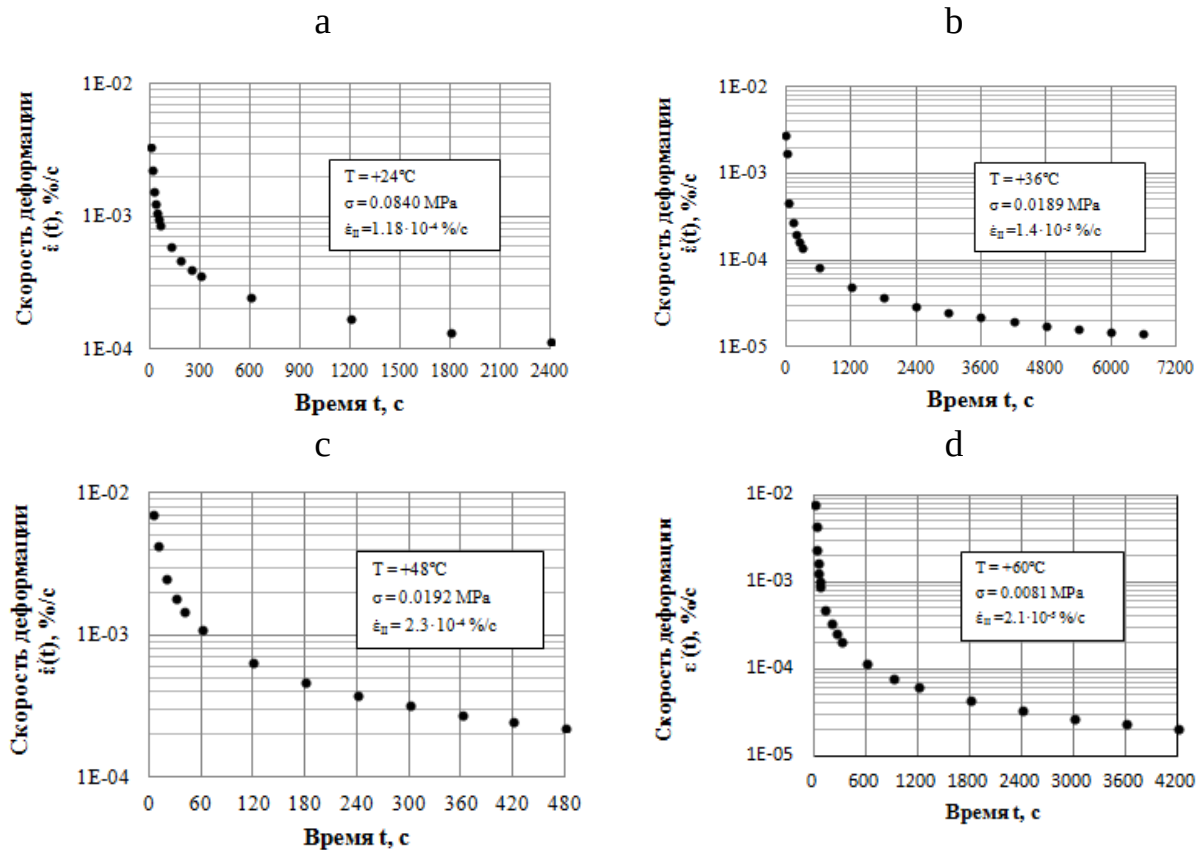


Рисунок 1.9 Графики изменения скорости неустановившейся ползучести асфальтобетона

Скорость установившегося деформирования.

Графики, показывающие зависимость скорости установившегося деформирования асфальтобетона от напряжения при рассмотренных температурах, представлены на рисунке 1.10. Эти графики показывают, что с повышением температуры и напряжения скорость установившегося деформирования асфальтобетона растет. Как видно, эти графики с высокой точностью описываются прямыми линиями в логарифмических координатах, т.е. скорость установившегося деформирования аппроксимируется степенной функцией следующего вида:

$$\dot{\varepsilon}_{II} = B \cdot \sigma_0^m, \quad (1.21)$$

где $\dot{\varepsilon}_{II}$ – скорость установившегося деформирования, %/с;
 σ_0 – номинальное напряжение, МПа;
 B, m – коэффициенты корреляции.

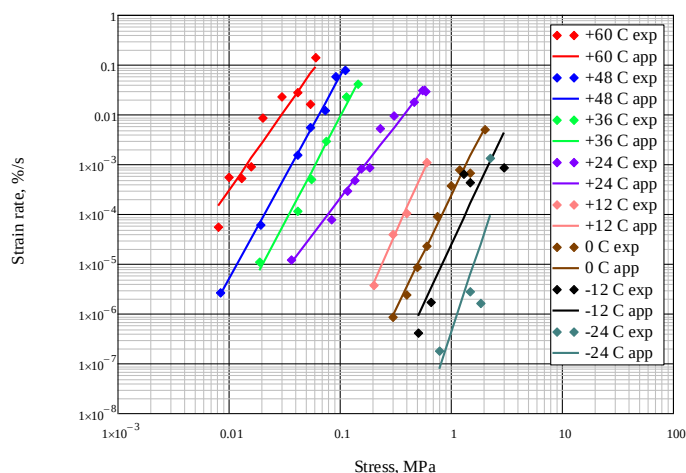


Рисунок 1.10. Графики зависимости скорости установившегося деформирования асфальтобетона от напряжения при разных температурах

На рисунке 1.11 представлены графики зависимости скорости установившегося деформирования асфальтобетона от температуры при разных напряжениях в обычных координатах. Видно, что кривые, соответствующие разным значениям напряжения, имеют одинаковый качественный характер: при низких температурах до некоторого значения температуры, зависящего от напряжения, скорость установившегося деформирования практически равна нулю; при температурах выше этой указанной температуры, скорость установившегося деформирования с повышением температуры увеличивается быстро.

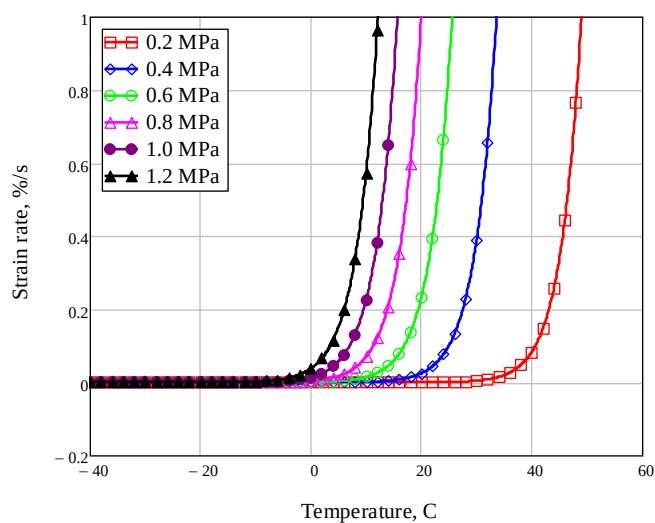


Рисунок 1.11. Графики зависимости скорости установившегося деформирования асфальтобетона от температуры при разных напряжениях

Скорость ускоренной ползучести асфальтобетона

Скорость установившейся ползучести зависит от номинального напряжения σ_0 поэтому она постоянна. Ускоренная ползучесть на третьем участке определяется эффективным напряжением (1.5):

$$\frac{\sigma_0}{1 - \omega'}$$

где $\omega(t)$ новый параметр-структурный параметр, характеризующий степень поврежденности асфальтобетона, накапливающейся в процессе ползучести. Эффективное напряжение $\sigma(t)$ (1.5) не равно номинальному напряжению $\sigma_0 = \text{const}$, вот почему на третьей стадии ползучести асфальтобетона происходит увеличение скорости ползучести.

Длительность участков кривых ползучести и долговечность асфальтобетона

Важной характеристикой неустановившейся ползучести материала является ее длительность t_1 . Весь процесс ползучести, включая и процесс неустановившейся ползучести, происходит во времени. Неустановившаяся ползучесть продолжается только до времени t_1 , за которым начинается другой характерный вид ползучести – установившаяся ползучесть материала с другими физическими механизмами и параметрами. Поэтому очень важно изучить зависимость длительности неустановившейся ползучести от влияющих факторов и желательно иметь для практического использования математическое выражение, описывающее ее [35].

Графики, показывающие зависимость длительности участков кривых ползучести асфальтобетона от напряжения при всех рассмотренных температурах, представлены на рисунках 1.12-1.14. Как видно, длительность участков кривых ползучести сильно зависит как от температуры, так и от напряжения. Как следовало ожидать, она с увеличением напряжения и повышением температуры уменьшается.

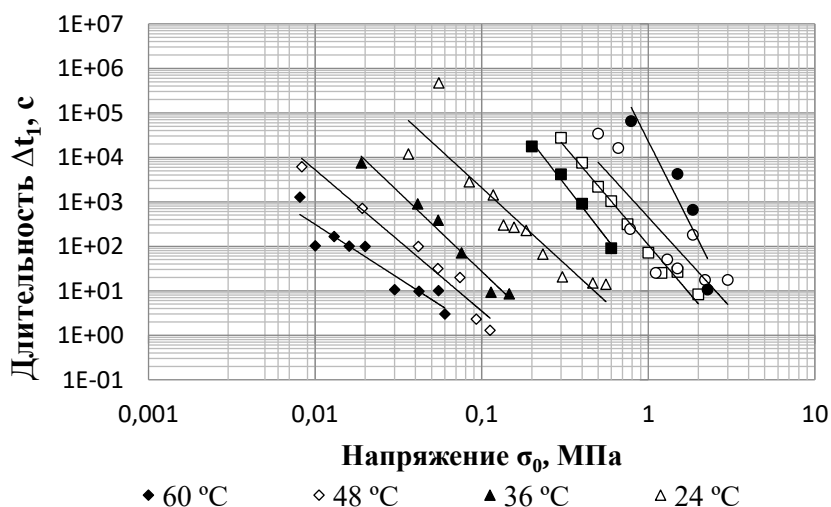


Рисунок 1.12. Графики зависимости длительности неустановившейся ползучести асфальтобетона от напряжения при разных температурах [35]

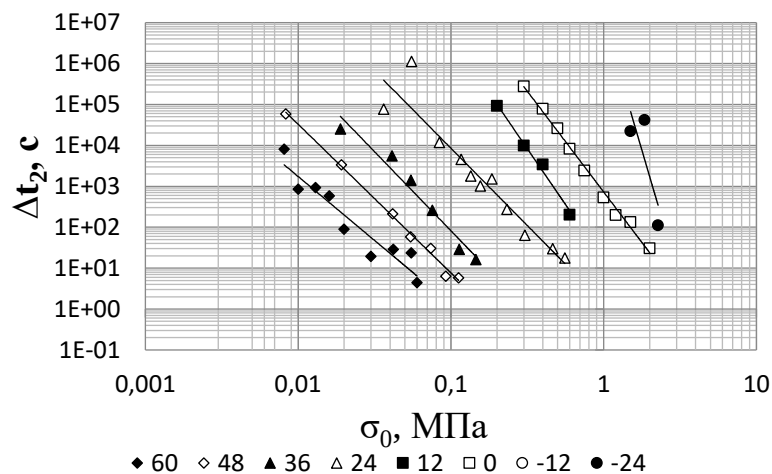


Рисунок 1.13. Графики зависимости длительности установившейся ползучести асфальтобетона от напряжения при разных температурах

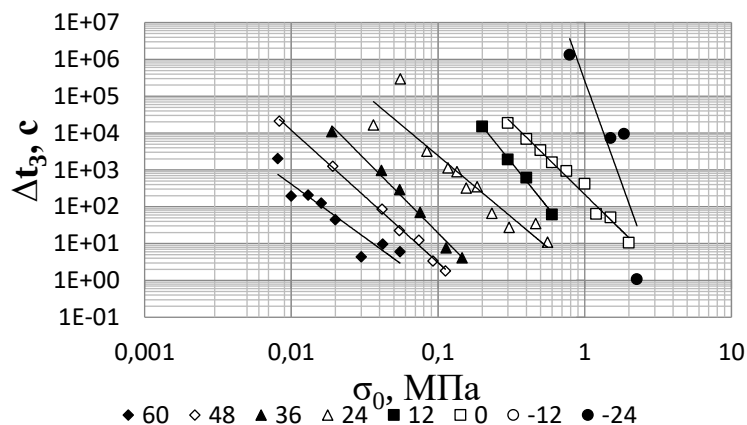


Рисунок 1.14. Графики зависимости длительности ускоренной ползучести асфальтобетона от напряжения при разных температурах

Графики, показывающие зависимость долговечности асфальтобетона от напряжения при рассмотренных температурах представлены на рисунке 1.15. Как видно, эти графики высокой точностью описываются прямыми линиями в логарифмических координатах, т.е. долговечность асфальтобетона аппроксимируется степенной функцией вида (1.4). Время до разрушения асфальтобетона t^* равно:

$$t^* = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3,$$

где Δt_1 - длительность неустановившейся ползучести;
 Δt_2 -длительность установившейся ползучести;
 Δt_3 - длительность ускоренной ползучести;

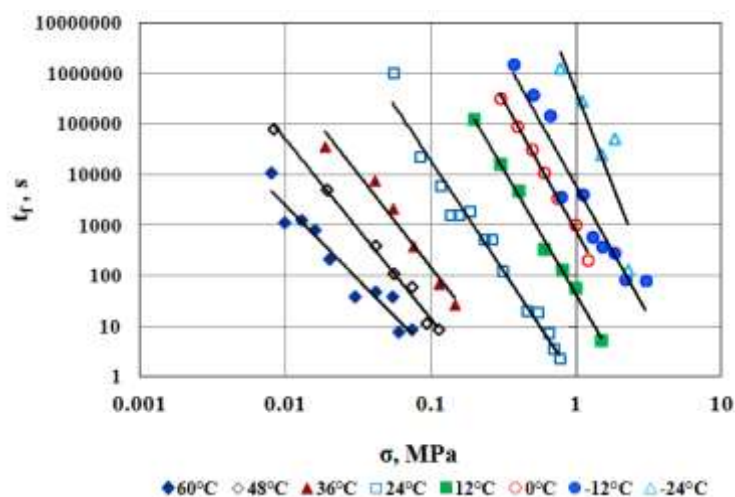


Рисунок 1.15. Графики длительной прочности асфальтобетона при разных температурах

На основе анализа экспериментальных данных приведенных на рис. 1.12-1.15 установлены продолжительность участков кривых ползучести относительно долговечности асфальтобетона. Они сведены в таблице 1.8. Из него следует, что длительность установившейся ползучести составляет (57,8-79,1)% долговечности асфальтобетона. Продолжительность первого и третьего участков кривых ползучести относительно общего времени работы образцов составляет (20,9-42,2)%.

Таблица 1.8. Продолжительность участков кривых ползучести относительно времени до разрушения асфальтобетона

T, °C	$\Delta t_1/t^*, \%$	$\Delta t_2/t^*, \%$	$\Delta t_3/t^*, \%$
60	20,5	63,0	16,5
48	19,8	57,8	22,3
36	19,2	64,2	16,7
24	17,8	60,4	21,8
12	20,8	65,8	13,3
0	9,6	71,4	19,0
-12	14,3	68,4	17,4
-24	7,4	79,1	13,4

Произведение $\dot{\epsilon}_{II}^c t^*$ как критерий разрушения

Экспериментальное определение времени разрушения в широком диапазоне температур и напряжений сложно и трудоёмко. Необходимо прогнозировать взаимосвязь $t^*(\sigma_0, T)$ только по двум первым участком кривых ползучести. Для этого целесообразно применить часто отмечаемое [1, 36, 37-41] наблюдение о приблизительном постоянстве произведение t_p и минимальной скорости ползучести $\dot{\epsilon}_{min}^c = \dot{\epsilon}_{II}^c$. Данный факт хорошо описывает формула Н. Хоффа [36]:

$$t_p = (Bm\sigma_0^m)^{-1}; \dot{\epsilon}_{II}^c t_p = \frac{1}{m},$$

но только в случае вязкого разрушения и линейности начальных участков ползучести. Возможность вывода аналогичного уравнения для материала, ползучесть которого сопровождается упрочнением, отмечал Ю.Н. Работнов [39]. Рассмотрим эту проблему на основе результатов экспериментального исследования ползучести асфальтобетона (рис.1.16). Математическая обработка экспериментальных данных приведенных на рис.1.16 сведены в таблицу 1.9.

Таблица 1.9.

T, °C	$(\dot{\epsilon}_{II}^c t^*)_e$	m	$\dot{\epsilon}_{II}^c t_p = \frac{1}{m}$
60	0,935220	3,2144	0,311100
48	0,571246	4,0349	0,247838
36	0,977749	4,2483	0,235388
24	1,075215	2,9294	0,342184
12	0,503758	5,0293	0,198835
0	0,262171	4,5785	0,218412
-12	0,264846	4,7269	0,211555
-24	0,112151	6,6776	0,149754

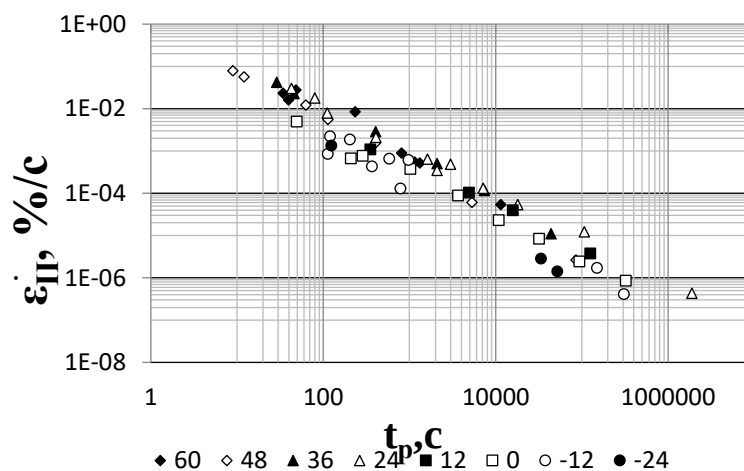


Рисунок 1.16. Зависимость скорости установившейся ползучести от времени до разрушения для асфальтобетона при разных температурах

Как видно из таблицы 1.9, критерий разрушения Хоффа не пригодны для прогнозирования долговечности асфальтобетона.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕЙСЯ И УСКОРЯЮЩУЮСЯ СТАДИИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Аналитическое описание процессов ползучести и накопления поврежденности асфальтобетона проведем уравнением (1.19).

Экспериментальные точки ускоренной ползучести образцов асфальтобетона приведены в Приложении 2.

Обработки экспериментальных данных ускоренной ползучести образцов асфальтобетона показали, что параметр $\frac{n+1-q}{n+1}$ практически не зависит от уровня напряжения, а зависит от изменения температуры испытания. Математическая обработка экспериментальных данных приведенных в Приложении 2 сведены в таблицу 1.10.

Таблица 1.10.

$T^{\circ}\text{C}$	60	48	36	24	12	0	-12	-24
$\frac{n+1-q}{n+1}$	0,3	0,35	0,45	0,44-0,78	0,55	0,47	0,20	0,25

1.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ОБРАЗЦОВ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПРИ $\dot{\sigma} = const$

Известно, что деформационные и прочностные характеристики многих дорожных материалов и грунтов существенно зависят от величины и длительности действия нагрузки [1-6]. По современным автомобильным дорогам двигаются транспортные средства с разными осевыми нагрузками (до 13 т и более) и скорость их движения в зависимости от конкретных дорожных условий изменяется в широких пределах [7-9]: скорость движения равна 0 на остановках, на перекрестках, перед шлагбаумами и т.п., на перегонных участках может достигать 200-220 км/ч и более.

Отмеченные выше положения показывают важность изучения влияния скорости нагружения на деформационные и прочностные свойства дорожных материалов, включая асфальтобетоны, и грунты.

Литературный обзор [1-6, 10-17] показывает, что в дорожном материаловедении исторически сложилось такое положение: практически все виды испытания асфальтобетонов осуществляются при заданных скоростях деформирования. Например, испытания цилиндрических образцов асфальтобетонов при сжатии проводятся при скорости деформирования 3 мм/мин [15]. Прочность асфальтобетонов при одноосном растяжении определяется при скорости деформирования 2 мм/мин. Усталостные характеристики асфальтобетонов выполняются при изменении деформации изгиба по гармоническому закону (амплитуда деформации сохраняется постоянной до разрушения) [17]. При этом указанные стандартные скорости деформации (2 и 3 мм/мин) несопоставимо выше, чем в реальных условиях.

В настоящей работе образцы традиционного горячего мелкозернистого плотного асфальтобетона испытаны по схеме прямого растяжения до разрушения при температуре 22-24 °С в условиях нагружения с постоянной скоростью. Скорость нагружения изменялась от 0,000563 МПа/с до 0,652 МПа/с, т.е. в 1158 (почти 1200) раз. Установлены корреляционные зависимости времени

разрушения, деформации разрушения, прочности и удельной работы разрушения асфальтобетона от скорости нагружения. Построена и проанализирована зависимость «напряжение-деформация» (диаграмма деформирования) асфальтобетона при разных скоростях нагружения.

Испытания были выполнены при температуре 22-24°C в специально изобретенной и собранной установке [24, 25] в Казахстанском дорожном научно-исследовательском институте по схеме прямого растяжения. Скорости нагружения были равны (МПа/с): 1 - 0,000563; 2 - 0,001698; 3 - 0,005507; 4 - 0,007244; 5 - 0,015137; 6 - 0,023918; 7 - 0,048869; 8 - 0,058036; 9 - 0,205869; 10 - 0,467757; 11 - 0,651864. Как видно, скорость нагружения изменяется в широких пределах – 1158 (почти 1200) раз.

Выводы. По результатам испытаний, выполненных по выше изложенному методу, построены графики изменения напряжения, деформации, удельной работы деформирования во времени и графики зависимости «напряжение-деформация» при рассмотренных скоростях нагружения. Для наглядности указанные графики для пяти скоростей нагружения показаны на рисунках (1.17-1.20). Как видно, при линейном изменении напряжения во времени (рисунок 1.17) деформация изменяется существенно нелинейно (рисунок 1.18). Нелинейность деформирования асфальтобетона растет с повышением напряжения. На рисунке 1.19 видно, что трудно выделить некоторый начальный участок, в пределах которого можно было принять линейное деформирование и ввести модуль упругости.

Как следствие нелинейного деформирования, удельная работа деформирования асфальтобетона также изменяется во времени существенно нелинейно (рисунок 1.20). При этом наибольшие значения удельной энергии деформирования имеют место в момент разрушения. Также отметим, что приблизительно в течение первой половины нагружения при всех скоростях нагружения удельная энергия деформирования имеет относительно малые значения; она имеет самые большие значения в последней четверти процесса нагружения.

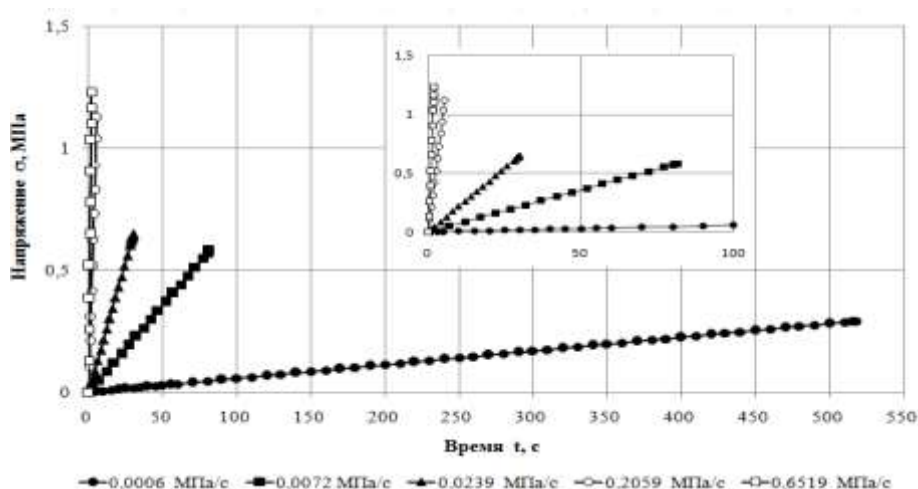


Рисунок 1.17. Графики изменения напряжения во времени при разных скоростях нагружения

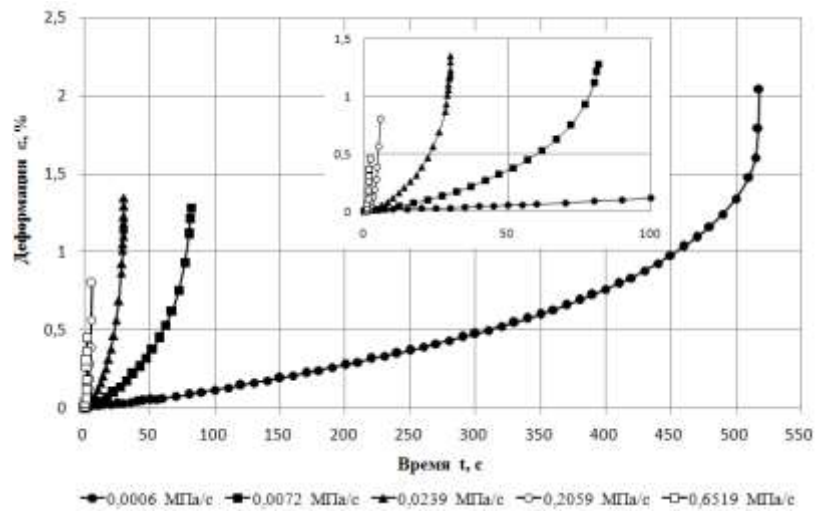


Рисунок 1.18. Графики изменения деформации во времени при разных скоростях нагружения

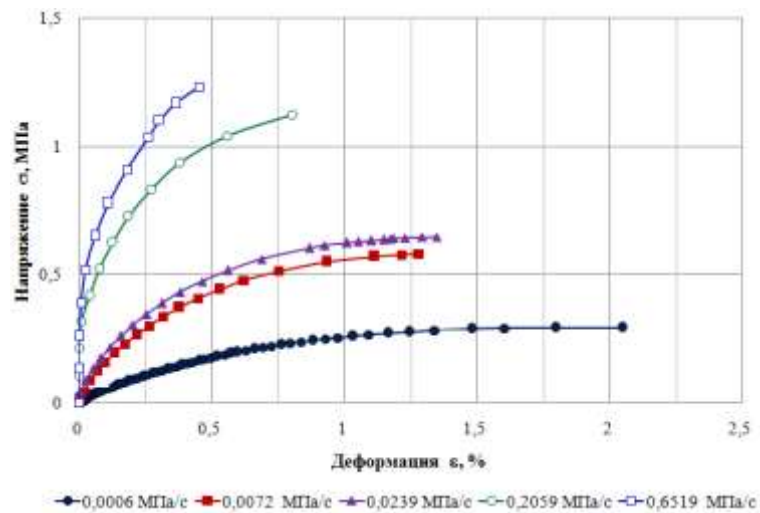


Рисунок 1.19. Графики зависимости «напряжение-деформация» при разных скоростях нагружения

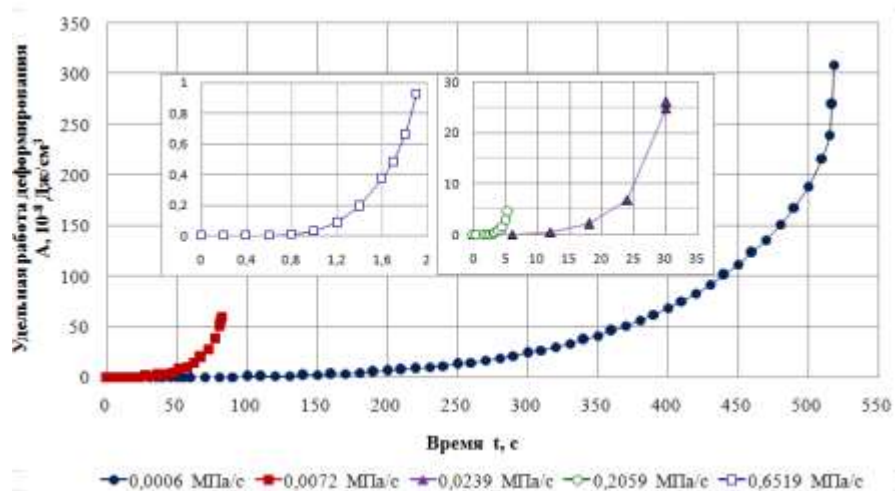


Рисунок 1.20. Графики изменения удельной работы деформирования при разных скоростях нагружения

Важными характеристиками разрушения являются время разрушения, деформация, напряжение (прочность) и удельная работа деформирования материала в момент его разрушения. Зависимость этих характеристик асфальтобетона от скорости нагружения представлены на рисунках 1.21-1.24. Как видно, скорость нагружения оказывает сильное влияние на характеристики разрушения асфальтобетона. При этом при увеличении скорости нагружения в 1158 (почти 1200) раз от 0,000563 МПа/с до 0,652 МПа/с время разрушения, удельная работа разрушения и деформация разрушения уменьшаются в 242, 160 и 3 раза соответственно, а прочность увеличивается в 5 раз.

Известно, что в зависимости от конкретных условий и режимов движения транспортные средства по автомобильным дорогам (на разных участках автомобильных дорог) двигаются с разными скоростями. Результаты экспериментального исследования, выполненного в настоящей работе, показывают, что характеристики деформирования и разрушения асфальтобетона сильно зависят от скорости нагружения. Указанные положения вызывают мысль о том, что автомобильные дороги должны разбиваться на участки с установленными расчетными скоростями движения транспортных средств и при проектировании конструкций дорожных одежд механические характеристики асфальтобетонных слоев должны быть назначены с учетом этих расчетных скоростей.

В ранних работах [21-23, 26] было экспериментально установлено, что зависимости длительной прочности (времени разрушения) и скорости установившейся деформации асфальтобетона при ползучести от напряжения с высокой точностью аппроксимируются степенной функцией. Как видно из рисунков 1.21-1.24, при нагружении с постоянной скоростью характеристики разрушения асфальтобетона также с высокой точностью описываются степенной функцией. При этом, как следовало ожидать, с повышением скорости нагружения (с увеличением во времени действующего напряжения) время разрушения асфальтобетона уменьшается. С повышением скорости нагружения уменьшаются также деформация разрушения и удельная работа разрушения асфальтобетона. А прочность асфальтобетона, наоборот, увеличивается с повышением скорости нагружения. Среди рассмотренных характеристик разрушения асфальтобетона самыми чувствительными к изменению скорости нагружения оказались время разрушения и удельная работа деформирования: при изменении скорости нагружения на один порядок эти характеристики изменяются на 0,77 и 0,70 порядка соответственно. Наименьшую чувствительность к изменению скорости нагружения имеет деформация разрушения: показатель степени равен $n=0,14$. Промежуточную чувствительность имеет прочность асфальтобетона: $n=0,23$.

Существенное влияние скорости деформирования на характеристики деформирования и разрушения асфальтобетонов также установлена в работах других исследователей [10-12, 27]. Fakhri M. и др. [27] сообщили, что скорость деформирования оказывает сильное влияние на энергию разрушения (fracture energy) асфальтобетона при промежуточных температурах (5°C, 15 °C и 25 °C).

Золотарев В.А. и др. [10] и Islam M.D.R. и др. [12] установили, что зависимость прочности асфальтобетонов при трехточечном и четырехточечном изгибе, сжатии, растяжении и начальной жесткости асфальтобетона при трехточечном изгибе от скорости деформирования удовлетворительно описывается степенной функцией.

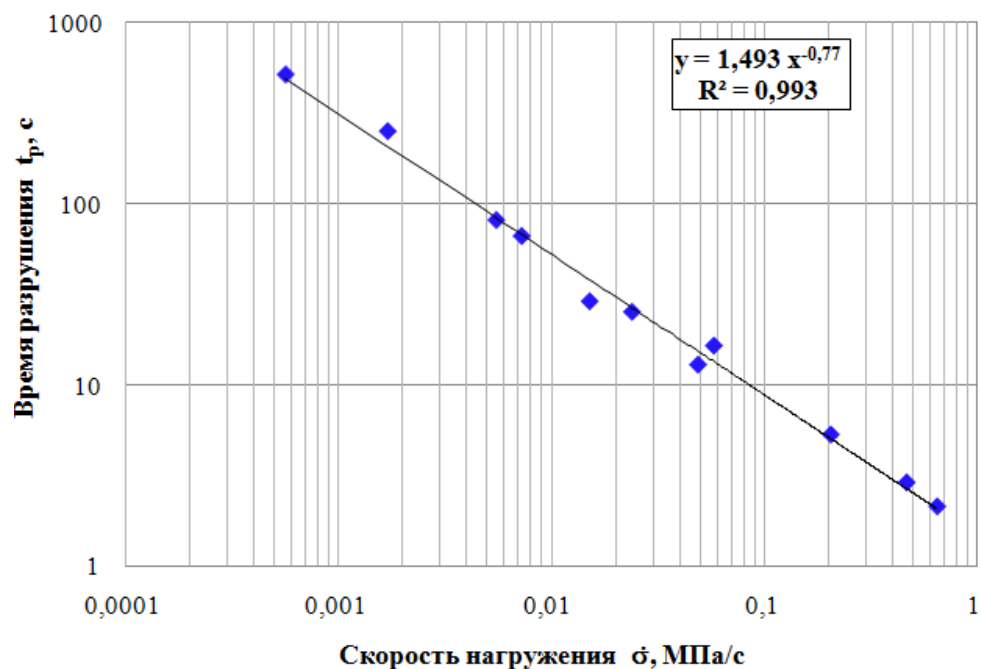


Рисунок 1.21. Зависимость времени разрушения асфальтобетона от скорости нагружения

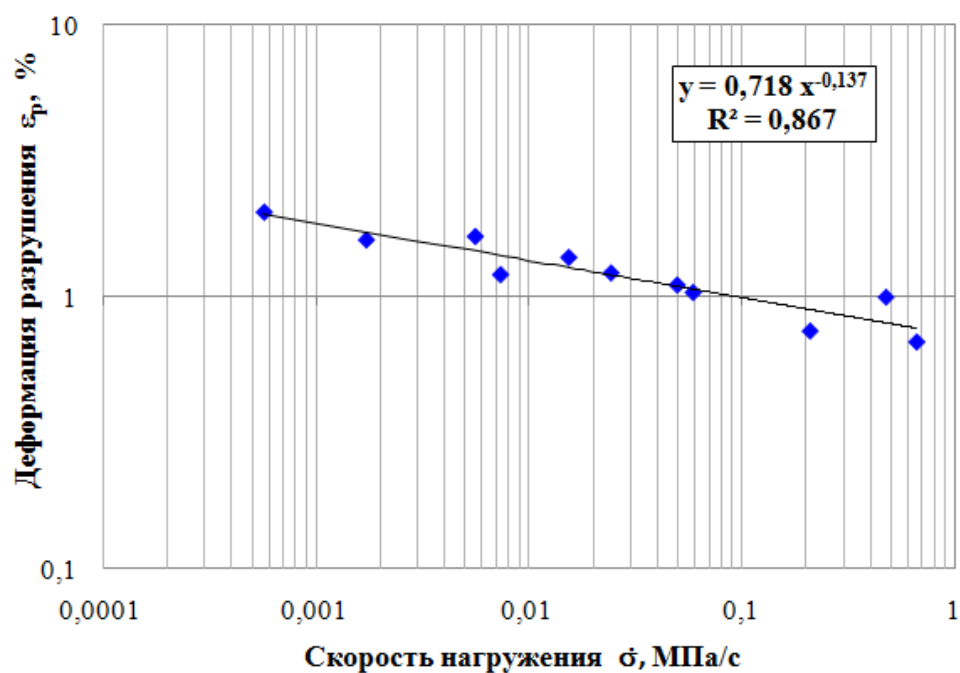


Рисунок 1.22. Зависимость деформации разрушения асфальтобетона от скорости нагружения

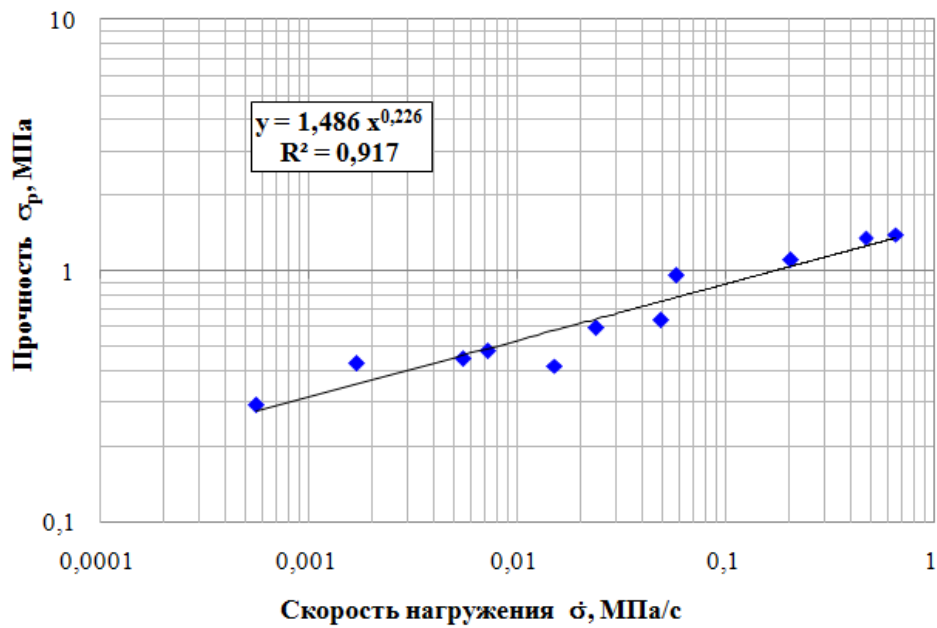


Рисунок 1.23. Зависимость прочности асфальтобетона от скорости нагружения

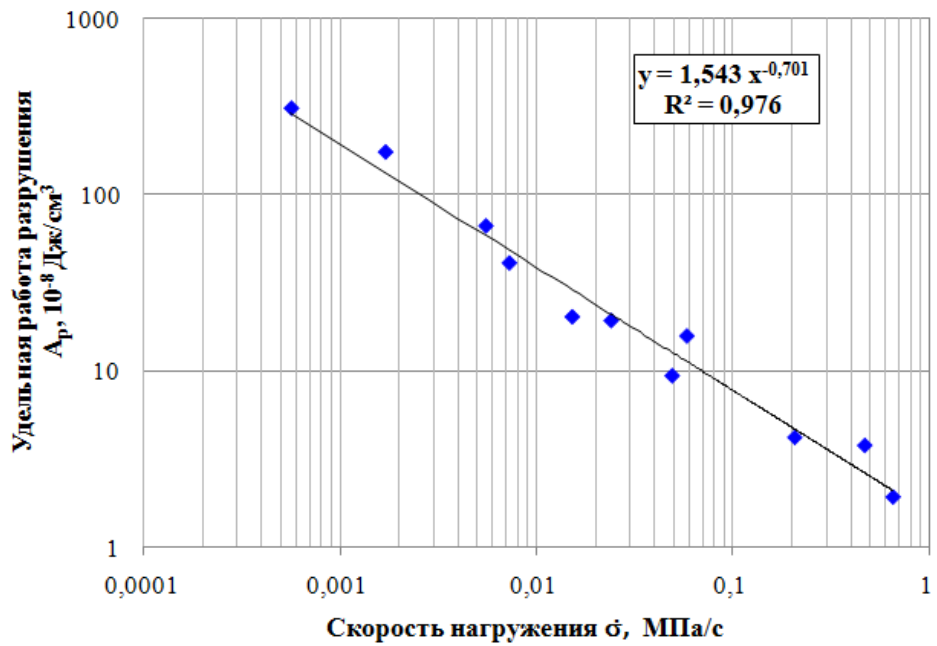


Рисунок 1.24. Зависимость удельной работы разрушения асфальтобетона от скорости нагружения

Для описания процесса ползучести образцов асфальтобетона запишем инвариантную кривую следующего вида:

$$\varepsilon_m^c(t) = \varepsilon_*(\dot{\sigma}) \left(\frac{t}{t_*(\dot{\sigma})} \right)^\xi, \quad (1.22)$$

где t – время, секунд;

$t_*(\dot{\sigma})$ – время разрушения образцов, секунд;

$\varepsilon > 1$ – параметр ползучести;

$\varepsilon_*(\dot{\sigma})$ – предельная деформация в момент разрушения (%) образцов;

$\varepsilon_m^c(t)$ – деформация ползучести образцов при $\dot{\sigma} = const$.

При $\dot{\sigma} = const$ были испытаны образцы асфальтобетона на ползучесть до разрушения. В Приложении 3 представлены экспериментальные и расчетные кривые ускоренной ползучести отдельных образцов асфальтобетона.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛЗУЧЕСТИ И РЕЛАКСАЦИИ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ЗАТУХАЮЩЕЙ ПАМЯТИ

Концепция Работнова существование термомеханической поверхности в теории ползучести. Уравнение изохронных кривых ползучести запишем в виде

$$\phi[\varepsilon(t), T] = \sigma \left[1 + \int_0^t K(t - \tau, T) d\tau \right],$$

где $\sigma = const$ - напряжение; $\varepsilon(t, T)$ - деформация ползучести; $T = const$ - температура; $K(t - \tau, T)$ - ядро ползучести; функция

$$K_m(t, T) = 1 + \int_0^t K(t - \tau, T) d\tau$$

при фиксированных $t = t_s$ дает коэффициенты подобия изохронных кривых ползучести.

Функция $\sigma = \phi[\varepsilon(0), T]$ определяет мгновенную термомеханическую поверхность. В осях (σ, ε) при $T = const$, подобные изохронные кривые ползучести представлены семейством конгруэнтных кривых, исходящих из нуля. Согласно концепции Работнова [43, 44], кривая $\phi[\varepsilon(0)]$ восстанавливается путем экстраполяции с кривых семейства изохронных кривых ползучести. Экспериментальные проверки гипотезы существования термомеханической поверхности в теории ползучести проведены в работах [43-58].

В работах [43-58] подобие изохронных кривых ползучести материала

$$\sigma = \frac{\phi[\varepsilon(0), T]}{k_m(t_s, T)}$$

трактовались как достаточное условие применимости определяющего соотношения Работнова.

В работе [59] показано, что подобие изохронных кривых ползучести является одним из необходимых признаков применимости определяющего соотношения Работнова.

В настоящей работе предлагается алгоритм построения термомеханической поверхности реономных материалов по Работнову.

2.1 ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ И ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Уравнение семейства кривых ползучести запишем в виде [60]:

$$\varepsilon_m(t, T) = \varepsilon_0(\sigma, T) \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{(1-\alpha)} \right) = \varepsilon_0(\sigma, T) k_m(t, T); \quad (2.1)$$

где $\sigma = const$ - напряжение; $T = const$ - температура; $K_m(t)$ - расчетный реологический параметр ползучести; $\alpha(T) \in (0; 1)$; $\delta(T) > 0$; α, δ определены в [61].

$$\varepsilon_0(\sigma, T) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \frac{\varepsilon_e(t_s)}{k_m(t_s)}. \quad (2.2)$$

Здесь

$$k_m(t = t_s, T) = 1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t_s^{(1-\alpha)} \quad (2.3)$$

расчетные коэффициенты подобия изохронных кривых ползучести по Работнову, $\varepsilon_e(t, T)$ - экспериментальные значения деформации ползучести.

Уравнение семейства изохронных ползучести по Работнову запишем в виде

$$\sigma = \frac{\phi(\varepsilon_0, T)}{k_m(t_s)}, \quad (2.4)$$

где $t_s \in [0; t_*]$, t_* - время окончания эксперимента, $\phi(\varepsilon_0, T)$ – термомеханическая поверхность реономных материалов или кривые мгновенного деформирования.

На основе концепции Работнова будет разработан алгоритм построения термомеханическую поверхность $\sigma = \phi(\varepsilon_0, T)$.

2.2 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИМЕРБЕТОНА.

Экспериментальные значения деформации ползучести $\varepsilon_e(t, \sigma)$ полимербетона при $T = 20^\circ\text{C}$ сведены в таблицу 2.1 [62], экспериментальные и расчетные реологические параметры ползучести полимербетона сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.1. Деформация ползучести полимербетона

σ , МПа	t, час	0	50	1000	1500	2000	2300	2500	3000
10	ε_e %	0,0318	0,0419	0,0543	0,0557	0,0566	0,0571	0,0573	0,0578
	ε_m , %	0,0318	0,0433	0,0535	0,0555	0,057	0,0577	0,0582	0,0592
20	ε_e , %	0,0637	0,0838	0,1087	0,1115	0,1133	0,1141	0,1146	0,1155
	ε_m , %	0,0636	0,0867	0,1071	0,111	0,1139	0,1154	0,1164	0,1184
30	ε_e , %	0,0955	0,1257	0,163	0,1672	0,1699	0,1712	0,1719	0,1733
	ε_m , %	0,0955	0,13	0,1606	0,1665	0,1709	0,1732	0,1746	0,1777
40	ε_e , %	0,1274	0,1676	0,2174	0,2229	0,2266	0,2282	0,2291	0,231

Продолжение таблицы 2.1

	$\varepsilon_m, \%$	0,1273	0,1734	0,2142	0,2219	0,2279	0,2309	0,2327	0,2369
50	$\varepsilon_e, \%$	0,1592	0,2094	0,2717	0,2786	0,2832	0,2853	0,2864	0,2888
	$\varepsilon_m, \%$	0,1591	0,2167	0,2677	0,2774	0,2848	0,2886	0,2909	0,2961

Таблица 2.2. Экспериментальные и расчетные реологические параметры ползучести полимербетона

t, час	0	50	1000	1500	1700	2000	2300	2500	2700	3000
k_e	1	1,3176	1,7075	1,7516	1,7642	1,7799	1,7956	1,8019	1,8082	1,8176
k_e	1	1,3155	1,7064	1,7504	1,7630	1,7786	1,7912	1,7991	1,8053	1,8132
k_e	1	1,3162	1,7068	1,7508	1,7634	1,7791	1,7927	1,8	1,8063	1,8147
k_e	1	1,3155	1,7064	1,7496	1,7630	1,7786	1,7912	1,7983	1,8053	1,8132
k_e	1	1,3153	1,7067	1,75	1,7632	1,7789	1,7921	1,7990	1,8053	1,8141
$\bar{k}_e$	1	1,3161	1,7068	1,7505	1,7633	1,779	1,7926	1,7996	1,8061	1,8145
k_m	1	1,362	1,6824	1,7435	1,7634	1,7901	1,8139	1,8283	1,8419	1,8609

Анализ таблицы 2.2 показывает, что экспериментальный реологический параметр ползучести $k_e(t, \sigma, T)$ практически не зависит от величины σ . Используя среднее значение $\bar{k}_e(t, T)$ найдены параметры ползучести $k_m(t, T)$:

$$\alpha(T) = 0,788423; \delta(T) = 0,033477 \text{ час}^{-1+\alpha}. \quad (2.5)$$

Подставляя (2.5) в (2.3) находим коэффициенты подобия полимербетона, они сведены в таблицу 2.2. На основе таблиц 2.1 и 2.2 из (2.2) найдем значения $\varepsilon_0(\sigma, \tau)$, затем по формуле (2.1) вычисляем расчетные значения деформации ползучести полимербетона $\varepsilon_m(t_s, T), t_s \in [0; 3000]$. Значения $\varepsilon_m(t_s)$ сведены в таблицу 2.1. Уравнение изохронных кривых ползучести полимербетона запишем в виде:

$$\sigma = A(t_s) \varepsilon_m(t_s), \quad (2.6)$$

где $t_s \in [0; 3000]$.

Из анализа данных таблиц 2.1 и 2.2 следует:

$$A(0)k_m(0) = A(t_1)k_m(t_1) = \dots = A(t_s)k_m(t_s) = A(0) = 314,12; \\ A(t_s) = \frac{A(t_0=0)}{k_m(t_s)}; t_s \in [0; 3000]. \quad (2.7)$$

С учетом (2.7), уравнение (2.4) имеет вид:

$$\sigma = \frac{314,12 \varepsilon_0}{k_m(t_s)}, \quad (2.8)$$

где $t_s \in [0; 3000]$, значения $K_m(t_s)$ берутся из таблицы 2.2.

Деформация ползучести полимербетона описывается уравнением вида

$$\varepsilon_m(t, T) = \frac{\sigma}{314,12} k_m(t_s),$$

где $t_s \in [0; 3000]$; $\varepsilon_0(\sigma) = \frac{\sigma}{314,12}$.

Согласно (2.8), в качестве уравнение кривой мгновенного нагружения выступает реальная кривая нагружения полимербетона. Экспериментальные и расчетные изохронные кривые ползучести полимербетона показаны на рис. 2.1. На отрезке $[0, 3000]$ изохронные кривые ползучести полимербетона подобны по Работнову, если выполняются условия (2.7).

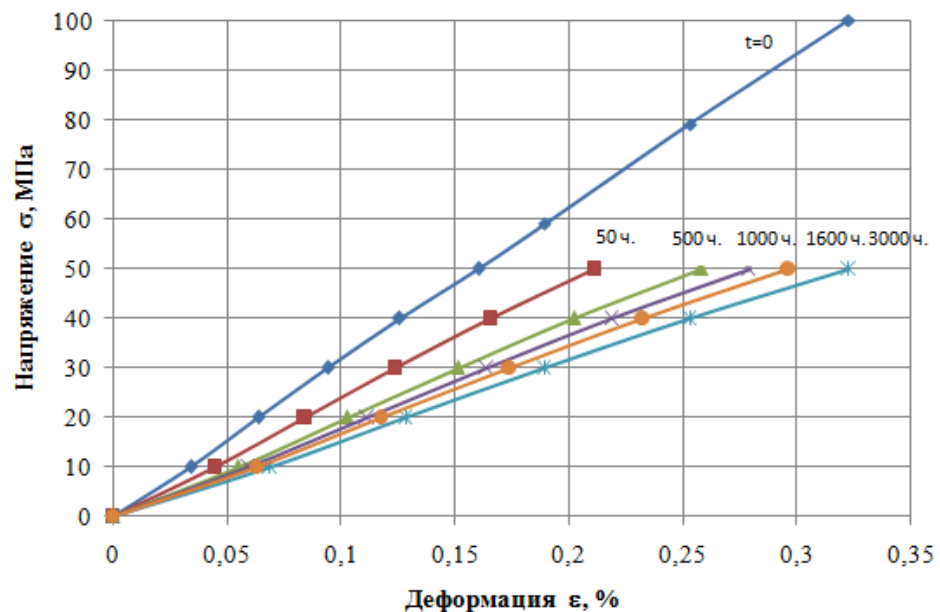


Рисунок 2.1. Изохронные кривые полимербетона

● — эксперимент, — — расчет.

2.3 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ СМОЛЫ EDT-10

Анализ кривых ползучести смолы EDT-10 [63] показывает, что экспериментальный реологический параметр практически не зависит от величины напряжения σ . Коэффициенты подобия имеют вид:

$$k_m(t_s, T) = 1 + 0,056279 t_s^{0,389468}, \quad (2.9)$$

где $t_s \in [0; 50000]$; t — время в часах.

$$\alpha = 0,610532; \delta = 0,021969 \text{ час}^{\alpha-1}.$$

Уравнение (2.4) примут вид:

$$\sigma = \frac{32,0623\varepsilon_0}{k_m(t_s)}, \quad (2.10)$$

где $k_m(t_s)$ - определяется соотношением (2.9); $t_s \in [0; 50000]$; $\varepsilon_0 \in [0; 0,3]$. Деформация ползучести смолы EDT-10 описывается уравнением вида

$$\varepsilon_m(t_s, T) = \frac{\sigma}{32,0623} k_m(t_s),$$

где $t_s \in [0; 50000]$; $\varepsilon_0(\sigma) = \frac{\sigma}{32,0623}$; σ - напряжение, МПа.

Согласно (2.10), в качестве уравнение кривой мгновенного деформирования выступает реальная кривая мгновенного нагружения смолы EDT-10. На отрезке $[0; 50000]$, выполняются условия вида (2.7), поэтому изохронные кривые ползучести смолы EDT-10 подобны по Работнову. Экспериментальные и расчетные изохронные кривые ползучести EDT-10 показаны на рис. 2.2.

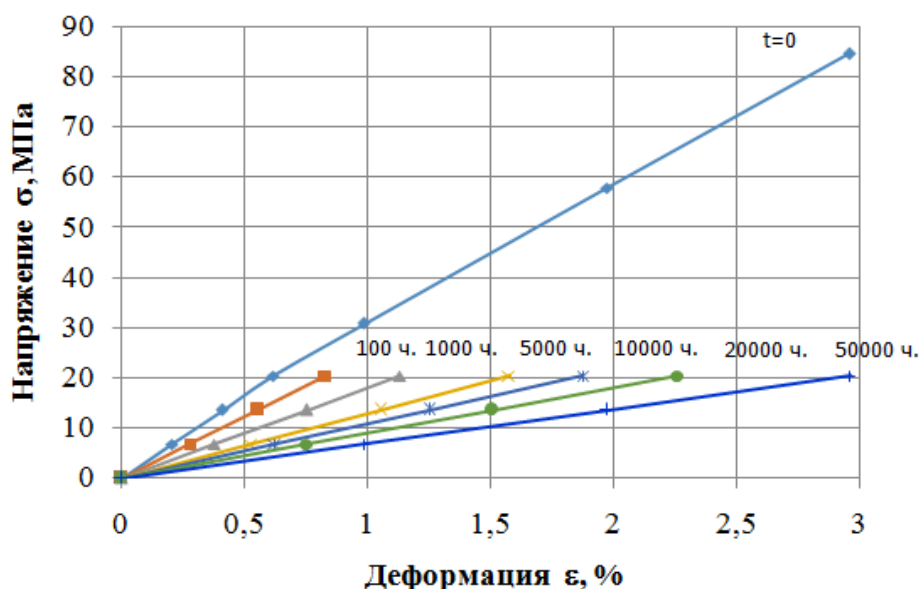


Рисунок 2.2. Изохронные кривые смолы EDT-10

● – эксперимент, — - расчет.

2.4 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ АРАМИДНОГО ВОЛОКНА СВМ

Расчетные изохронные кривые ползучести арамидного волокна СВМ при $T = 20^{\circ}\text{C}$ удовлетворяют условиям вида (2.7), поэтому они подобны по Работнову.

Уравнение (2.4) имеет вид:

$$\sigma = \frac{1300.2313\varepsilon_0}{k_m(t_s)}, \quad (2.11)$$

где $t_s \in [0,50000]$; t — время в часах; σ - напряжение, МПа; $\varepsilon_0 \in [0,2.75]$;

$$k_m(t_s, T) = 1 + 0.325286t_s^{0.117798};$$

$$\alpha = 0.882202; \delta = 0.038318 \text{ час}^{\alpha-1}. \quad (2.12)$$

Деформация ползучести СВМ определяется соотношением

$$\varepsilon_m(t, T) = \frac{\sigma}{1300.2313} k_m(t_s), \varepsilon_0(\sigma) = \frac{\sigma}{1300.2313}; k_m(t_s)$$

определяется выражением (2.12).

Согласно (2.11), в качестве уравнение кривой мгновенного деформирования выступает реальная кривая мгновенного нагружения волокна СВМ. Экспериментальные и расчетные изохронные кривые ползучести волокна СВМ показаны на рис. 2.3.

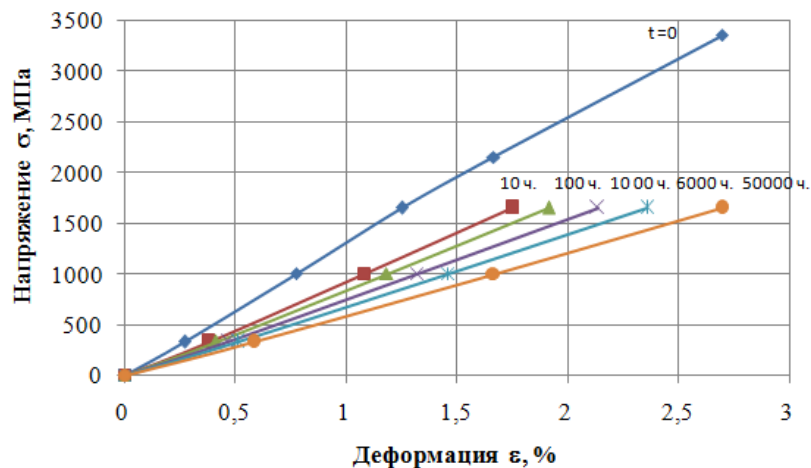


Рисунок 2.3. Изохронные кривые арамидного волокна СВМ
● — эксперимент, — - расчет.

2.5 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРАФИТА

УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРАФИТА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ $T = 2000^\circ\text{C}$.

Экспериментальные значения деформации ползучести графита сведены в таблицу 2.3 [55].

Таблица 2.3. Экспериментальные и расчетные значения деформаций ползучести графита при температуре $T = 2000^\circ\text{C}$

σ , МПа	t , мин	0	40	80	120	160
10	ε_e , %	0,06814	0,110523	0,118934	0,12318	0,124734
	ε_m , %	0,074247	0,11015635	0,11770404	0,12283465	0,126838185

Продолжение таблицы 2.3

14	$\varepsilon_e, \%$	0,104852	0,161261	0,170414	0,177067	0,178387
	$\varepsilon_m, \%$	0,10691	0,15861597	0,16948402	0,17687167	0,182636427
18	$\varepsilon_e, \%$	0,150427	0,209609	0,22508	0,233715	0,238331
	$\varepsilon_m, \%$	0,14101	0,20920843	0,22354297	0,233287	0,240890492
22	$\varepsilon_e, \%$	0,20774	0,282001	0,312233	0,332453	0,348782
	$\varepsilon_m, \%$	0,198037	0,29381533	0,31394696	0,32763162	0,338310078

Величины $k_e(t, T, \sigma_\xi)(\xi = 1, 2, 3, 4)$ приведены в таблице 2.4. Определяем $\bar{K}_e(t, T)$:

$$\bar{k}_e(t, T) = \frac{1}{4} \sum_{\xi=1}^4 k_e(t, T, \sigma_\xi);$$

с учетом $\bar{k}_e(t, T)$, находим $k_m(t, T)$, они сведены в таблицу 2.4;

$$\alpha(T = 2000^\circ\text{C}) = 0.724765;$$

$$\delta = (T = 2000^\circ\text{C}) = 0.048225_{\text{мин}}^{\alpha-1}.$$

Таблица 2.4. Экспериментальные и расчетные реологические параметры ползучести графита при температуре $T = 2000^\circ\text{C}$

$\sigma, \text{МПа}$	$t, \text{мин}$	40	80	120	160
10	$k_e(t)$	1,62199883	1,74543587	1,80774875	1,83055474
14	$k_e(t)$	1,53798688	1,62528135	1,68873269	1,70132186
18	$k_e(t)$	1,39342671	1,49627394	1,5536772	1,58436318
22	$k_e(t)$	1,35747088	1,50299894	1,60033215	1,67893521
	$\bar{k}_e(t)$	1,47772082	1,59249752	1,6626227	1,69879375
	$k_m(t)$	1,48363474	1,58529037	1,65439173	1,7083131

Коэффициенты подобия вычисляются по формуле

$$k_m(t_s, T) = 1 + 0.175214 t_s^{0.275235}, \quad (2.13)$$

где $t_s \in [0, 160]$, t – время в минутах.

По формуле (2.2) находим

$$\varepsilon_0(\sigma, T) = \left(\frac{\sigma}{67}\right)^{1.4286}, \quad (2.14)$$

σ - напряжение, МПа. С учетом (2.13) и (2.14) из (2.1) найдем расчетные значения деформаций ползучести $\varepsilon_m(t_s, T)$ графита при температуре $T = 2000^\circ\text{C}$. Экспериментальные и расчетные изохронные кривые ползучести графита при температуре $T = 2000^\circ\text{C}$ приведены на рис.2.4. Совпадение удовлетворительное.

Расчетные значения деформации ползучести графита $\varepsilon_m(t, T, \sigma_\xi)$ ($\xi = 1, 2, 3, 4$) найдены по формуле (2.1) сведены в таблицу 2.3.

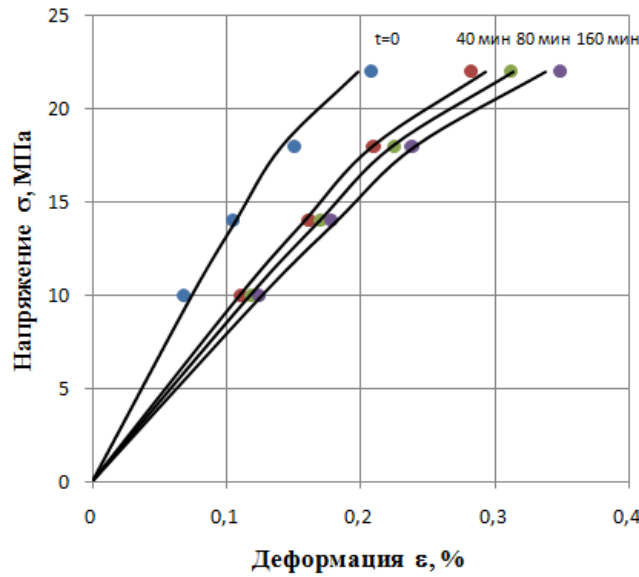


Рисунок 2.4. Изохронные кривые ползучести поликристаллического графита при температуре $T=2000^\circ\text{C}$
 ● – эксперимент, — - расчет.

Из (2.14) найдем

$$\sigma = 67\varepsilon_0^{0.7}. \quad (2.15)$$

Уравнение изохронных кривых ползучести графита при температуре $T = 2000^\circ\text{C}$ запишем в виде:

$$\sigma = A(t_s)\varepsilon_m^{0.7}(t_s), \quad (2.16)$$

где $t_s \in [0, 160]$. С учетом (2.13), из (2.16) вычисляем:

$$\begin{aligned} 1) A(t_0 = 0) &= 67 \text{ МПа}; A(40) = \frac{A(0)}{k_m^{0.7}(40)} = 50.82 \text{ МПа}; \\ A(80) &= 48.53 \text{ МПа}; A(120) = 47.10 \text{ МПа}; A(160) = 46.05 \text{ МПа}; \\ 2) A(0)k_m(0) &= 67 \text{ МПа}; A(40)k_m(40) = 75.41 \text{ МПа}; \\ A(80)k_m(80) &= 76.93 \text{ МПа}; A(120)k_m(120) = 77.92 \text{ МПа}; \\ A(160)k_m(160) &= 79.44 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

На основе анализа данных (2.17), уравнение (2.4) запишем в виде

$$\sigma = \frac{77.90}{k_m(t_s, T)} \varepsilon_0^{0.7}, \quad (2.18)$$

где $k_m(t_s, T)$ - определяется соотношением (2.13); $t_s \in [0, 160]$; $\varepsilon_0 \in [0, 0.3530]$.

Сравнивая (2.15) с (2.18) при $t_s = 0$ заметим, что кривая мгновенного нагружения не совпадает с кривой мгновенного деформирования по Работнову. Этот случай назовем почти-подобными по Работнову.

Деформация ползучести графита при температуре $T = 2000^\circ\text{C}$ описывается уравнением вида

$$\varepsilon_m(t_s, T) = \left(\frac{\sigma k_m(t_s, T)}{77.90} \right)^{1.4286}, \quad (2.19)$$

где $k_m(t_s)$ - определяется соотношением (2.13); $t_s \in [0, 160]$; $\sigma \in [0, 22]$.

УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРАФИТА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ $T = 2200^\circ\text{C}$.

Экспериментальные значения деформации ползучести графита при температуре $T = 2200^\circ\text{C}$ сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5. Экспериментальные и расчетные значения деформаций ползучести графита при температуре $T = 2200^\circ\text{C}$

σ , МПа	t, мин	0	40	80	120	160
10	ε_e , %	0,078853	0,146549	0,169378	0,186493	0,194203
	ε_m , %	0,087369	0,14950503	0,16895765	0,18304938	0,1945003
14	ε_e , %	0,126288	0,222827	0,252645	0,26751	0,275954
	ε_m , %	0,128126	0,21924691	0,24777388	0,2684392	0,2852318
18	ε_e , %	0,206712	0,286902	0,326876	0,355719	0,373243
	ε_m , %	0,168535	0,28839351	0,32591738	0,35310017	0,3751888
22	ε_e , %	0,238153	0,427892	0,486202	0,533862	0,568407
	ε_m , %	0,252904	0,43276483	0,48907336	0,52986399	0,5630103

Значения параметра $k_e(t, T, \sigma_\xi)(\xi = 1, 2, 3, 4)$ приведены в таблице 2.6. Для среднего значения $\bar{k}_e(t, T)$ находим значения параметра $k_m(t, T)$, они сведены в таблицу 2.6:

$$\alpha(T = 2200^\circ\text{C}) = 0.607057; \delta(T = 2200^\circ\text{C}) = 0.065582 \text{ мин}^{\alpha-1}.$$

Таблица 2.6. Экспериментальные и расчетные реологические параметры ползучести графита при температуре $T = 2200^\circ\text{C}$

σ , МПа	t, мин	40	80	120	160
10	$k_e(t)$	1,8585089	2,14802227	2,36507172	2,46284859
14	$k_e(t)$	1,7644353	2,00054637	2,11825352	2,18511656
18	$k_e(t)$	1,387931	1,5813112	1,72084349	1,80561844
22	$k_e(t)$	1,7967105	2,04155312	2,24167657	2,38673038
	$\bar{k}_e(t)$	1,7018964	1,94285824	2,11146132	2,21007849
	$k_m(t)$	1,7111772	1,93382439	2,09511291	2,2261754

Коэффициенты подобия определяются по формуле

$$K_m(t_s, T) = 1 + 0.166900t_s^{0.322943}, \quad (2.20)$$

где $t_s \in [0, 160]$, t – время в минутах.

По формуле (2.2) найдем

$$\varepsilon_0(\sigma, T) = \left(\frac{\sigma}{58.57} \right)^{1.4286}, \quad (2.21)$$

где σ - напряжение, МПа. Расчетные значения деформации ползучести графита при температуре $T = 2200^\circ\text{C}$ найденные по формуле (2.1) $\varepsilon_m(t, T, \sigma_\xi)$ ($\xi = 1, 2, 3, 4$) сведены в таблицу 2.5. Экспериментальные и расчетные изохронные кривые ползучести графита при температуре $T = 2200^\circ\text{C}$ приведены на рис. 2.5. Совпадение удовлетворительное.

Из (2.21) находим

$$\sigma = 58.57\varepsilon_0^{0.7}, \quad (2.22)$$

На основе алгоритма построение термомеханическую поверхность (2.16) и (2.17), уравнение (2.4) при температуре $T = 2200^\circ\text{C}$ запишем в виде

$$\sigma = \frac{71.94}{K_m(t_s, T)} \varepsilon_0^{0.7}, \quad (2.23)$$

где $k_m(t_s, T)$ - определяется (2.20); $t_s \in [0, 160]$; $\varepsilon_0 \in [0, 0.5774]$. Сравнивая (2.22) и (2.23) при $t_s = 0$ заключаем, что они не совпадают.

Деформация ползучести графита при температуре $T = 2200^\circ\text{C}$ описывается уравнением вида

$$\varepsilon_m(t_s, T) = \left(\frac{\sigma k_m(t_s, T)}{71.94} \right)^{1.4786}, \quad (2.24)$$

где $k_m(t_s, T)$ - определяются (2.20); $t_s \in [0, 160]$; $\sigma \in [0, 22]$.

Экспериментальные и расчетные изохронные кривые ползучести графита при температуре $T = 2000^\circ\text{C}$ приведены на рис.2.5.

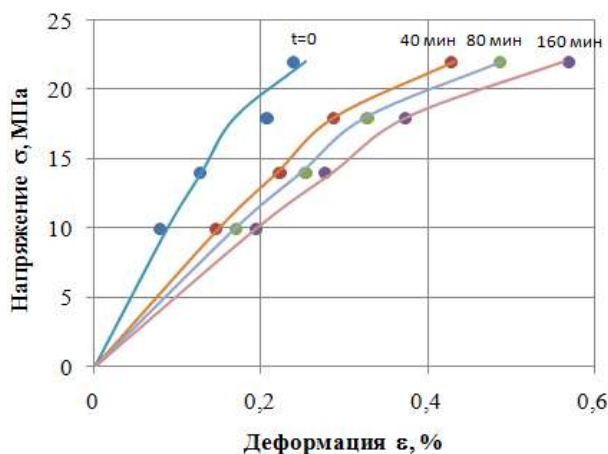


Рисунок 2.5. Изохронные кривые ползучести поликристаллического графита при температуре $T=2200^{\circ}\text{C}$
 ● – эксперимент, – - расчет.

УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРАФИТА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ $T = 2400^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальные значения деформации ползучести графита $\varepsilon_e(t, \sigma)$ при температуре $T = 2400^{\circ}\text{C}$ сведены в таблицу 2.7.

Таблица 2.7. Экспериментальные и расчетные значения деформаций ползучести графита при температуре $T = 2400^{\circ}\text{C}$

σ , МПа	t , мин	0	40	80	120	160
10	ε_e , %	0,132872	0,24446	0,27783	0,297269	0,307402
	ε_m , %	0,125353	0,23755606	0,273202251	0,299095546	0,32017311
14	ε_e , %	0,223617	0,341641	0,378225	0,404671	0,422566
	ε_m , %	0,172216	0,326364168	0,375336354	0,410909614	0,43986682
18	ε_e , %	0,250706	0,493317	0,575164	0,631866	0,676285
	ε_m , %	0,263454	0,499268895	0,574186094	0,628605739	0,67290421
22	ε_e , %	0,3101	0,685153	0,832388	0,936678	1,012372
	ε_m , %	0,3831	0,726007215	0,834947363	0,914081184	0,97849739

Значения параметра $k_e(t, T, \sigma_\xi)(\xi = 1, 2, 3, 4)$ приведены в таблице 2.8. Для среднего значения $\bar{k}_e(t, T)$ найдем данные параметра $k_m(t, T)$, они сведены в таблицу 2.8;

$$\alpha(T = 2400^{\circ}\text{C}) = 0.601982; \delta(T = 2400^{\circ}\text{C}) = 0.082057_{\text{мин}}^{\alpha-1}.$$

Коэффициенты подобия определяются по формуле

$$k_m(t_s, 2400^{\circ}\text{C}) = 1 + 0.206164 t_s^{0.398018}, \quad (2.25)$$

где $t_s \in [0, 160]$, t – время в минутах.

Таблица 2.8. Экспериментальные и расчетные реологические параметры ползучести графита при температуре $T = 2400^{\circ}\text{C}$

σ , МПа	t, мин	40	80	120	160
10	$k_e(t)$	1,839815763	2,090959721	2,237258414	2,313519778
14	$k_e(t)$	1,527795293	1,69139645	1,809661162	1,889686383
18	$k_e(t)$	1,967711184	2,294177243	2,520346541	2,697522197
22	$k_e(t)$	2,209458239	2,684256691	3,020567559	3,264663012
	$\bar{k}_e(t)$	1,88619512	2,190197526	2,396958419	2,541347843
	$k_m(t)$	1,895082262	2,179446571	2,386008017	2,554152366

По формуле (2.2) найдем

$$\varepsilon_0(\sigma, T) = \left(\frac{\sigma}{44.90} \right)^{1.4286}, \quad (2.26)$$

где σ - напряжение, МПа. Расчетные значения деформации ползучести графита, найденные по формуле (2.1) $\varepsilon_m(t, T, \sigma_\xi)$ ($\xi = 1, 2, 3, 4$) при температуре $T = 2400^{\circ}\text{C}$ сведены в таблицу 2.7. Экспериментальные и расчетные изохронные кривые ползучести графита при температуре $T = 2400^{\circ}\text{C}$ приведены на рис. 2.6. Совпадение удовлетворительное.

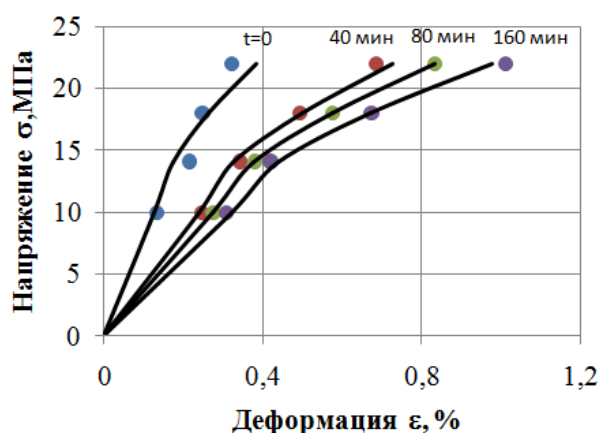


Рис. 2.6. Изохронные кривые ползучести поликристаллического графита при температуре $T=2400^{\circ}\text{C}$

● — эксперимент, — - расчет.

Из (2.26) найдем

$$\sigma = 44.90 \varepsilon_0^{0.7}, \quad (2.27)$$

На основе алгоритма построения термомеханической поверхности (2.16) и (2.17), уравнение (2.4) при температуре $T = 2400^{\circ}\text{C}$ запишем в виде

$$\sigma = \frac{54.22}{k_m(t_s, T)} \varepsilon_0^{0.7}, \quad (2.28)$$

где $k_m(t_s, T)$ - определяется (2.25); $t_s \in [0, 160]$; $\varepsilon_0 \in [0, 1.0523]$. Сравнивая (2.27) и (2.28) при $t_s = 0$ видим, что они не совпадают.

Деформация ползучести $\varepsilon_m(t, T)$ при температуре $T = 2400^\circ\text{C}$ моделируется

$$\varepsilon_m(t_s, T) = \left(\frac{\sigma k_m(t_s, T)}{54.22} \right)^{1.4786}, \quad (2.29)$$

где $k_m(t_s, T)$ - определяются (2.25); $t_s \in [0, 160]$; $\sigma \in [0, 22]$.

УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРАФИТА.

Экстраполированные кривые мгновенного нагружения приведены на рис. 2.7.

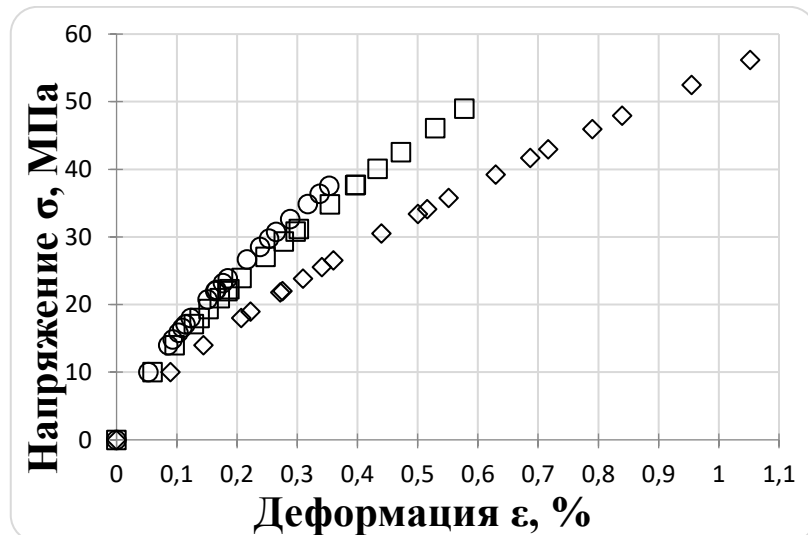


Рис. 2.7. Экстраполированные кривые мгновенного нагружения $\sigma = \phi(\varepsilon_0, T)$ графита ($\circ$ - при температуре $T=2000^\circ\text{C}$; $\square$ - при температуре $T=2200^\circ\text{C}$; $\diamond$ - при температуре $T=2400^\circ\text{C}$)

2.6 УРАВНЕНИЕ СЕМЕЙСТВА ИЗОХРОННЫХ КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Экспериментальные значения деформации ползучести $\varepsilon_e(t, \sigma)$ асфальтобетона представлены в таблице 2.9 [60]. В работе [60] определены расчетные параметры ползучести асфальтобетона:

$$\alpha(T = 24^\circ\text{C}) = 0.3; \delta(T = 24^\circ\text{C}) = 0.0138 \text{сек}^{\alpha-1};$$

Коэффициенты подобия:

$$k_m(t_s, T) = 1 + 0.0197t_s^{0.7}, \quad (2.30)$$

где $t_s \in [0, 570]$, t - время в секундах.

С учетом (2.2) и (2.30) по формуле (2.1) вычислены расчетные значения деформации ползучести $\varepsilon_m(t, \sigma)$ асфальтобетона, они представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9. Экспериментальные и расчетные значения деформаций ползучести асфальтобетона при температуре $T = 24^\circ \text{C}$

σ , МПа	t, час	0	90	210	330	450	570
0.041	ε_e , %	0,0475	0,0849	0,1099	0,1255	0,1415	0,1488
	ε_m , %	0,0582	0,0850	0,1066	0,1247	0,1408	0,1556
0.074	ε_e , %	0,0543	0,0932	0,1232	0,1457	0,1627	0,1759
	ε_m , %	0,0664	0,0969	0,1217	0,1422	0,1606	0,1776
0.111	ε_e , %	0,0805	0,1338	0,1643	0,1937	0,2158	0,2349
	ε_m , %	0,0905	0,1321	0,1658	0,1939	0,2189	0,2420
0.148	ε_e , %	0,1313	0,1782	0,2484	0,2839	0,3293	0,3632
	ε_m , %	0,1284	0,1875	0,2353	0,2751	0,3106	0,3434
0.183	ε_e , %	0,1782	0,2855	0,3710	0,4482	0,5105	0,5741
	ε_m , %	0,2066	0,3016	0,3786	0,4426	0,4998	0,5526

Уравнение изохронных кривых ползучести асфальтобетона запишем в виде:

$$\sigma = A(t_s) \varepsilon_m^{0.79}(t_s), \quad (2.31)$$

где $t_s \in [0, 570]$. С учетом (2.30), из (2.31) определяем:

$$\begin{aligned}
 &1) A(0) = 0.6275 \text{ МПа}; A(90) = 0.4654 \text{ МПа}; \\
 &A(210) = 0.3890 \text{ МПа}; A(330) = 0.3437 \text{ МПа}; \\
 &A(450) = 0.3235 \text{ МПа}; A(570) = 0.2885 \text{ МПа}; \\
 &A(t_s) = \frac{A(0)}{k_m^{0.79}(t_s)}; \\
 &2) A(0)k_m(0) = 0.6275 \text{ МПа}; A(90)k_m(90) = 0.6795 \text{ МПа}; \\
 &A(210)k_m(210) = 0.7128 \text{ МПа}; A(330)k_m(330) = 0.7363 \text{ МПа}; \\
 &A(450)k_m(450) = 0.7826 \text{ МПа}; A(570)k_m(570) = 0.7716 \text{ МПа}; \\
 &\frac{1}{6} \sum_{s=1}^6 A(t_s)k_m(t_s) = 0.7184 \text{ МПа}.
 \end{aligned} \quad (2.32)$$

На основе анализа данных (2.32), уравнение (2.4) запишем в виде:

$$\sigma = \frac{0.7184}{k_m(t_s, T)} \varepsilon_0^{0.79}, \quad (2.33)$$

где $k_m(t_s, T)$ - определяется соотношением (2.30); $t_s \in [0, 570]$; $\varepsilon_0 \in [0, 0.6156]$.

Деформация ползучести асфальтобетона по Работнову определяется уравнением

$$\varepsilon_m(t_s, T) = \left(\frac{\sigma k_m(t_s, T)}{0.7184} \right)^{1.2658}, \quad (2.34)$$

где $t_s \in [0, 570]$, $k_m(t_s, T)$ - определяются (2.30).

Графики используя значения напряжений и деформаций, соответствующие разным длительностям действия нагрузки, построенные по результатам расчетов с использованием данных таблицы 2.9, приведены на рисунке 2.8.

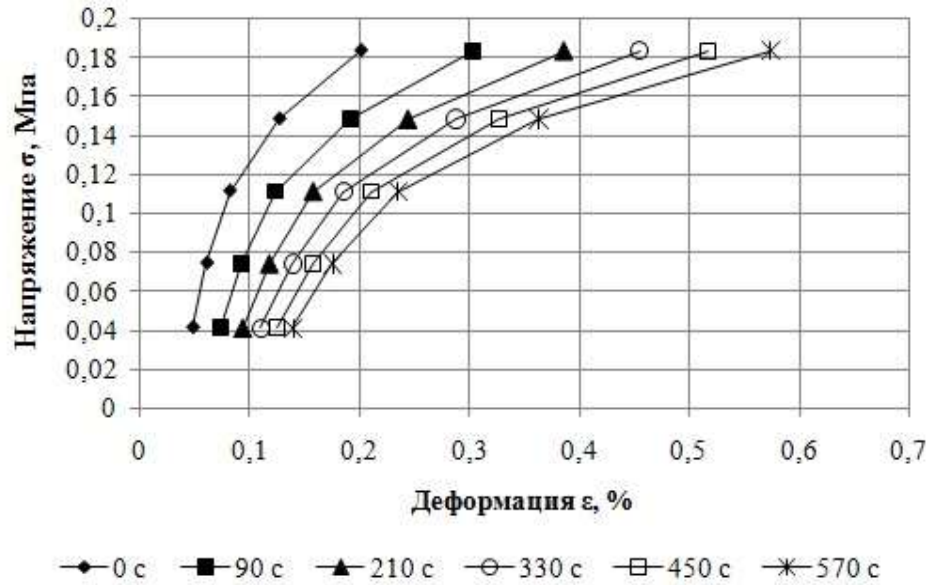


Рисунок 2.8. Изохронные кривые ползучести асфальтобетона

2.7 РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Если ползучесть реономных материалов моделируется уравнением наследственной теории Работнова

$$\phi[\varepsilon(t, T)] = \sigma k_m(t, T),$$

то закон релаксации описывается уравнением Работнова [50, 55, 64]:

$$\sigma(t) = \sigma_0(1 - \beta t^{1-\alpha} F_2), \quad (2.35)$$

где $k_m(t, T) = 1 + \frac{\delta(T)}{1-\alpha(T)} t^{1-\alpha(T)}$; $\sigma_0 = \phi[\varepsilon(0, T)]$, $\beta(T) = \delta(T)\Gamma(1 - \alpha(T))$; $\Gamma(\cdot)$ - гамма функция;

$$F_2[\alpha(T), x(T)] = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^n}{\Gamma[(1-\alpha)(n+1)+1]}; x(T) = \beta(T)t^{1-\alpha(T)}.$$

Функция $F_2[\alpha(T), x(T)]$ табулирована в книге [64]. Из формулы (2.35)

следует, что кривые релаксации для разных начальных напряжений должны быть подобны. Теперь (2.35) запишем в виде

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} = 1 - \beta(T)t^{1-\alpha(T)}F_2. \quad (2.36)$$

Последнее означает, что кривая релаксации в координатах $(\bar{\sigma}, t)$ не зависит от условий опыта, то есть от σ_0 , а зависит только от констант $\alpha(T), \delta(T), \beta(T)$. По формуле (2.36) построены кривые релаксации графита и асфальтобетона. Они приведены на рис. 2.9 и рис. 2.10.

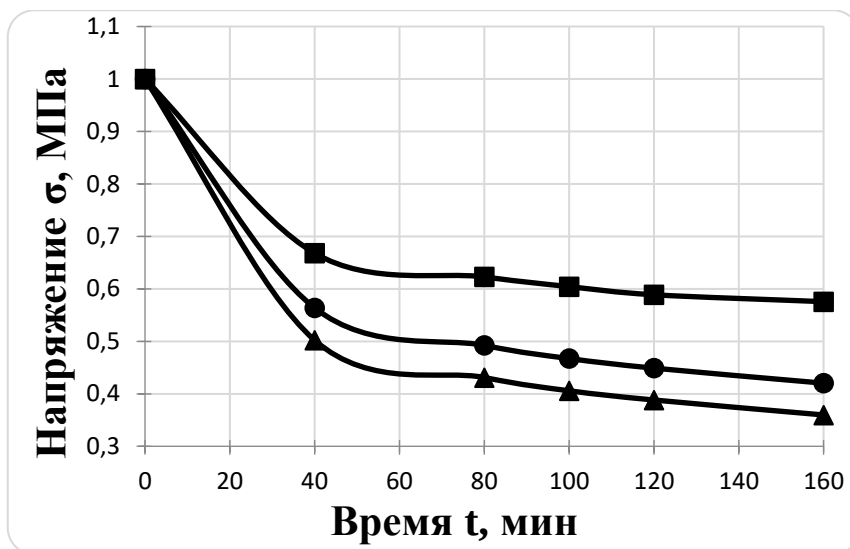


Рис. 2.9. Кривые релаксации напряжений графита (■- при температуре $T=2000^\circ\text{C}$; ●- при температуре $T=2200^\circ\text{C}$; ▲- при температуре $T=2400^\circ\text{C}$)

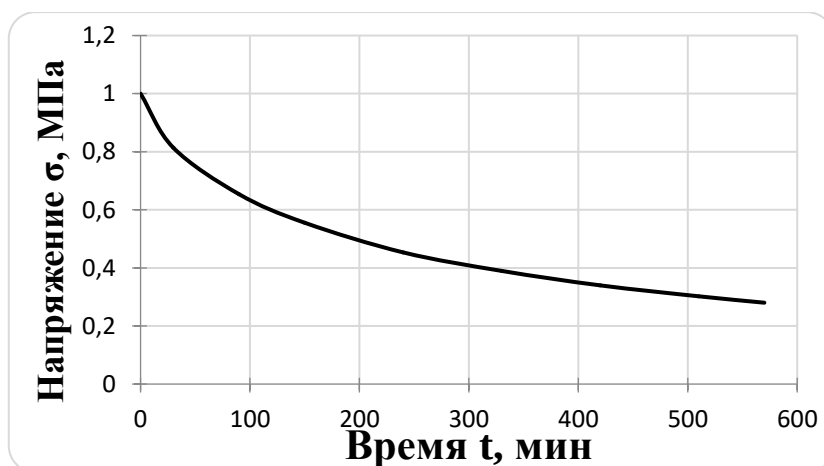


Рис. 2.10. Кривая релаксации напряжений асфальтобетона

В работе [59] показано, что материальная функция $\phi(\varepsilon)$ не влияет на форму кривых релаксации и на время релаксации материалов.

Выводы. Используя схематические кривые ползучести и изохронные кривые, наглядно объяснен метод изохронных кривых ползучести Ю.Н. Работнова. Приведено нелинейное интегральное уравнение для математического

описания процесса нелинейного деформирования наследственных материалов, предложенное Ю.Н. Работновым.

Из нелинейного интегрального уравнения Ю.Н. Работнова для случаев использования дробно-экспоненциального ядра Работнова и ядра Абеля получены соответствующие уравнения нелинейного деформирования наследственных материалов при ползучести.

Путем обработки и использования результатов испытания полимербетона, смолы EDT-106 арамидного волокна СВМ, графита при температурах 2000°C, 2200°C, 2400°C и асфальтобетона произведены расчеты и показаны результаты по предложенной методике построения изохронных кривых ползучести. Точность предложенной методики высокая.

На основе гипотезы затухающей памяти ползучести разработана компьютерная программа для определения параметров ползучести и релаксаций напряжения реономных материалов. Определены термомеханические поверхности полимербетона ($T=20^{\circ}\text{C}$), смолы EDT-10, арамидного волокна СВМ ($T=20^{\circ}\text{C}$), графита ($T=2000^{\circ}\text{C}$, $T=2200^{\circ}\text{C}$, $T=2400^{\circ}\text{C}$) и асфальтобетона ($T=60, 48, 24, 12, 0, -12, -24^{\circ}\text{C}$). Исследование процессов релаксации напряжений с помощью параметров ползучести.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 КРИТЕРИЙ ПОДОБИЯ КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИИ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ

Релаксация напряжений

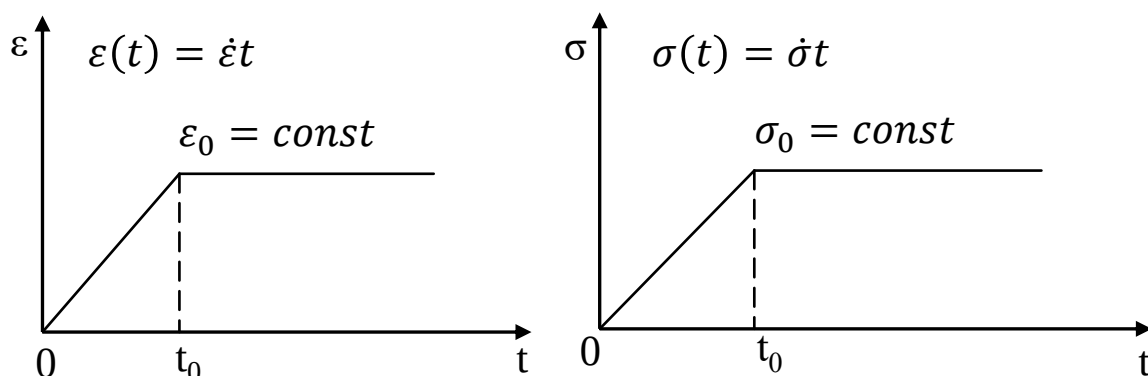


Рис. 3.1.1. Схема нагружения

Если образец из реономного материала растянуть с некоторой постоянной скоростью деформации $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ (или с постоянной скоростью изменения напряжений $\dot{\sigma} = \text{const}$) (Рис. 3.1.1) до деформации ε_0 и затем сохранить величину деформации неизменной, то в образце будет наблюдаться падение (релаксация) со временем напряжения $\sigma(t, T)$ при $T = \text{const}$. Схематические кривые релаксации реономных материалов показаны на Рис. 3.1.2.

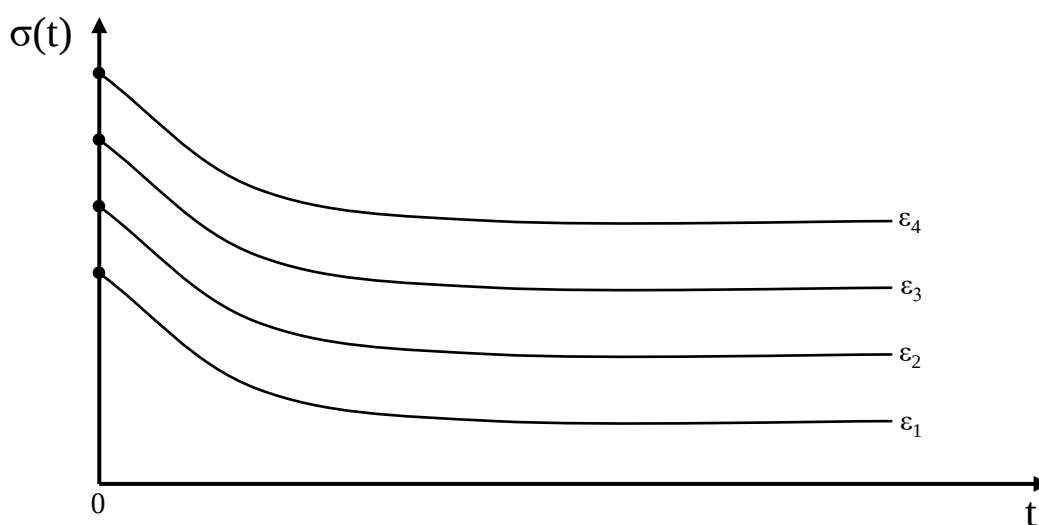


Рис. 3.1.2. Кривые релаксации напряжений реономных материалов

Введем экспериментальный параметр релаксации:

$$r_e(t, T, \varepsilon) = \frac{\sigma_e(t, T, \varepsilon)}{\sigma_0^e(\varepsilon, T)}, \quad (3.1)$$

где

$\sigma_e(t, T, \varepsilon)$ – значение релаксации напряжений в момент времени t определяемое экспериментально.

$\sigma_0^e(\varepsilon, T)$ – условно мгновенное напряжение в момент времени $t=0$ определяемое экспериментально.

КРИТЕРИЙ ПОДОБИЯ КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИЙ.

Вычисляются значение $r_e(t)$ (3.1) при фиксированном времени $t=t_s$ (коэффициенты подобия):

$$r_e(t_s, T, \varepsilon) = \frac{\sigma_e(t_s, T, \varepsilon)}{\sigma_0^e(\varepsilon, T)}, \quad (3.2)$$

где

$t_s \in [0, t_*]$; t – время окончания эксперимента на релаксацию;

$T = const$ – температура испытания образцов;

$\varepsilon = \varepsilon_0^e$ – условно мгновенная деформация в момент времени $t=0$, определяемая экспериментально.

Если коэффициенте подобия кривых релаксаций (3.2) удовлетворяет следующим условиям:

$$r_e(t_s, T, \varepsilon_1) = r_e(t_s, T, \varepsilon_2) = \dots = r_e(t_s, T, \varepsilon_N), \quad (N - \text{число деформаций}), \quad (3.3)$$

то кривые релаксации реономных материалов будут подобными.

В этом случае экспериментальный реологический параметр релаксации (3.1) зависит только от времени t и не зависит от величины деформации $\varepsilon = \varepsilon_0^e$ (Рис. 3.1.3).

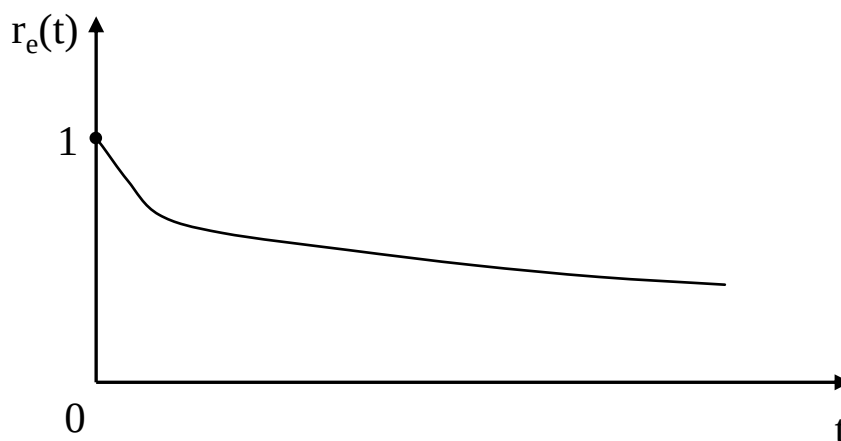


Рис. 3.1.3. Кривая экспериментального реологического параметра релаксаций

Уравнение релаксации нелинейной наследственности запишем в виде:

$$\sigma(t, T) = f[\varepsilon(t, T), T] - \int_0^t R(t - \tau) f[\varepsilon(\tau), T] d\tau, \quad (3.4)$$

где

$T = const$ – температура испытания образцов;

$f(\varepsilon)$ – нелинейная функция при фиксированном значении температуры испытания образцов;

$R(t - \tau)$ – ядро релаксации реономного материала.

Положим $\varepsilon(t) = \varepsilon = const$. Тогда из (3.4) найдем:

$$\sigma(t, T) = f(\varepsilon, T) \left[1 - \int_0^t R(t - \tau) d\tau \right] = f(\varepsilon, T) \cdot r_m(t), \quad (3.5)$$

где

$f(\varepsilon, T) = \sigma_0^e(\varepsilon, T)$ – условно мгновенная кривая деформирования при $T = const$;

$r_m(t, T)$ – расчетный (модельный) реологический параметр релаксации при $T = const$.

Положим:

$$R(t - \tau) = \delta(t - \tau)^{-\alpha}, \quad (3.6)$$

$$\alpha \in (0, 1); \delta > 0.$$

С учетом (3.6), из (3.5) найдем

$$\sigma(t, T) = \sigma_0^e(\varepsilon, T) \left[1 - \frac{\delta}{1 - \alpha} t^{(1-\alpha)} \right], \quad (3.7)$$

где

$\sigma_0^m(\varepsilon, T)$ – нелинейная функция при фиксированном значении температуры $T = const$;

$$\alpha = \alpha(T), \delta = \delta(T).$$

Следуя [65], параметр α будем считать известным в интервале $(0, 1)$, а

неизвестные параметры $\sigma_0^m(\varepsilon, T)$ и $\delta(T)$ определяем, используя метод наименьших квадратов. Согласно методу наименьших квадратов значения параметров $\sigma_0^m(\varepsilon, T)$ и $\delta(T)$ должны удовлетворять следующее условие:

$$S[\sigma_0^m(\varepsilon, T), \delta(T)] = \sum_{i=1}^M \left[\sigma_0^m(\varepsilon, T) \left(1 - \frac{\delta}{1-\alpha} t_i^{(1-\alpha)} \right) - \sigma_{ei} \right]^2 \rightarrow \min, \quad (3.8)$$

где

$S(\sigma_0^m, \delta)$ – сумма квадратов отклонений;

$\sigma_{ei} = \sigma_e(t = t_i)$ – значения релаксации напряжений, определенные экспериментально при $T = \text{const}$;

M – число релаксации напряжений.

Из соотношения

$$\frac{\partial S(\sigma_0^m, \delta)}{\partial \sigma_0^m} = 0, \quad \frac{\partial S(\sigma_0^m, \delta)}{\partial \delta} = 0.$$

Найдем выражения для определения параметров $\sigma_0^m(\varepsilon, T)$ и $\delta(T)$:

$$\sigma_0^m(\varepsilon, T) = \frac{\sum_{i=1}^M \sigma_{ei} \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\alpha)} - \sum_{i=1}^M t_i^{(1-\alpha)} \sum_{i=1}^M \sigma_{ei} t_i^{(1-\alpha)}}{M \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\alpha)} - \left[\sum_{i=1}^M t_i^{(1-\alpha)} \right]^2}, \quad (3.9)$$

$$\delta(T) = \frac{\sum_{i=1}^M \left(1 - \frac{\sigma_{ei}}{\sigma_0^m} \right) t_i^{(1-\alpha)}}{\frac{1}{1-\alpha} \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\alpha)}}. \quad (3.10)$$

Положим:

$$\sigma_0^m(\varepsilon, T) \approx \sigma_0^e(\varepsilon, T), \quad (3.11)$$

где

$\sigma_0^e(\varepsilon, T)$ – условно мгновенные напряжение в момент времени $t = 0$, определяемое экспериментально при $T = \text{const}$.

Из (3.9) и (3.11) находим:

$$1 = \frac{\sum_{i=1}^M r_{ei} \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\alpha)} - \sum_{i=1}^M t_i^{(1-\alpha)} \sum_{i=1}^M r_{ei} t_i^{(1-\alpha)}}{M \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\alpha)} - \left[\sum_{i=1}^M t_i^{(1-\alpha)} \right]^2}, \quad (3.12)$$

здесь

$r_{ei} = \frac{\sigma_e(t=t_i, T)}{\sigma_0^e(\varepsilon, T)}$ – экспериментальный реономный параметр релаксации.

Из (3.10) и (3.11) имеем:

$$\delta(T) = \frac{\sum_{i=1}^M (1 - r_{ei}) t_i^{(1-\alpha)}}{\frac{1}{1-\alpha} \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\alpha)}}. \quad (3.13)$$

Теперь вычисляем коэффициенты подобия:

$$r_m(t_s, T) = 1 - \frac{\delta}{1-\alpha} t_s^{1-\alpha}, \quad (3.14)$$

где

$t_s \in [0, t_*]$, t_* – время окончания эксперимента

С учетом (3.14) находим величину $\bar{\sigma}_0(\varepsilon, T)$:

$$\bar{\sigma}_0(\varepsilon, T) = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \frac{\sigma_e(t_s, T)}{r_m(t_s, T)}, \quad (3.15)$$

где M – число напряжений.

Процесс релаксации во времени может быть выражено аналитически:

$$\sigma_m(t, T) = \bar{\sigma}_0(\varepsilon, T) \left(1 - \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha} \right), \quad (3.16)$$

где $\bar{\sigma}_0(\varepsilon, T)$ – определяется соотношением (3.15).

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ АЛГОРИТМА И МЕТОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОДОБНЫХ КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИЙ.

ПОЛИУРЕТАНОВАЯ МАТРИЦА, СОДЕРЖАЩАЯ КРИСТАЛЛЫ СОЛИ И АЛЮМИНОВЫЙ ПОРОШОК, ПРИ 26,1°C ПО ГОТТЕНБЕРГУ И КРИСТЕНСЕНУ [66].

Функция релаксации определен из опытов на чистый сдвиг при динамических испытаниях. Это дало возможность определить процесс

релаксаций, начиная со времени 10^{-4} с. Следуя рекомендациям Кристенсена [66], мы рассмотрим процесс релаксаций начиная со временем 10^{-1} с. Экспериментальные данные о функции релаксации приведены в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1. Экспериментальные данные о функции релаксации

t, с	10^{-1}	1	10	100
$\frac{\tau_e(t)}{\gamma/2}$, МПа	6,5791	4,9745	4,06	3,5729

Здесь $\tau_e(t)$ – касательное напряжение,
 γ – относительный сдвиг образца.

На отрезке $[0,1; 100]$ экспериментальный реологический параметр релаксации $r_e(t)$ (3.1) не зависит от величины деформаций сдвига γ , поэтому подобны (Рис. 3.1.3). С помощью формул (3.12) и (3.13) находим значения $\alpha(T)$ и $\delta(T)$:

$$\begin{aligned}\alpha(26,1^\circ\text{C}) &= 0,8725; \\ \delta(26,1^\circ\text{C}) &= 0,033363 c^{-0,1275}.\end{aligned}\quad (3.17)$$

Значения коэффициентов подобия $r_e(t_S)$ и $r_m(t_S)$ сведены в таблицу 3.1.2.

Таблица 3.1.2. Значения $r_e(t_S)$ и $r_m(t_S)$.

t, с	10^{-1}	1	10	100
$r_e(t_S)$	1	0,7561	0,6171	0,5431
$r_m(t_S)$	1	0,7382	0,6490	0,5292

Теперь с учетом данных таблиц 3.1.1 и 3.1.2 найдем величину $\tilde{\tau}_0(t_0 = 10^{-1} \text{ с})$ по формуле (3.15):

$$\tilde{\tau}_0 = 6,5818 \text{ МПа.} \quad (3.18)$$

С учетом (3.17), (3.18) и (3.16) функция релаксации при сдвиге имеет вид:

$$\frac{\tau_e(t)}{\gamma/2} = 6,5818 \left[1 - 0,26174(t - 0,1)^{0,127466} \right], \quad (3.19)$$

где

$t \in [10^{-1}, 100]$, t – в секундах.

Расчетные данные о функции релаксации (3.19) приведены в таблице 3.1.3.

Таблица 3.1.3. Расчётные данные о функции релаксации.

t, с	10 ⁻¹	1	10	100
$\frac{\tau_e(t)}{\gamma/2}$, МПа	6,5818	4,8821	4,2744	3,4837

На рис. 3.1.4 по данным таблицы 3.1.1 и таблицы 3.1.3 представлены графики процесса релаксации при чистом сдвиге при 26,1°С по Готтенбергу и Кристенсену [66].

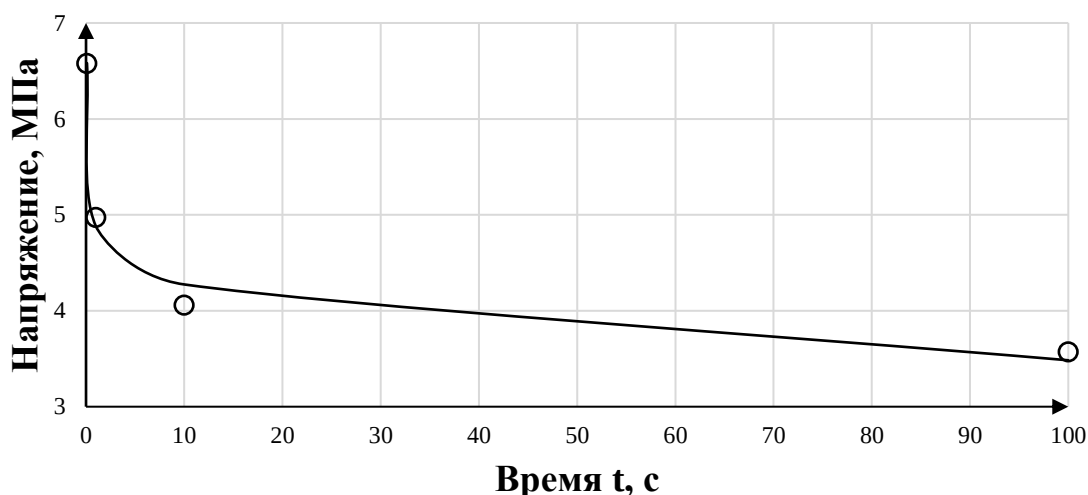


Рисунок 3.1.4. Функция релаксации при сдвиге. Точки – эксперимент, линия – расчет

ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Топлива состоит полиуретанового связующего и 80% частей (весовых) мелкодисперсного перхлората аммония и алюминиевого порошка. В статье [67] модуль релаксации определен из опытов на чистый сдвиг при динамических испытаниях с частотой до 1000 Гц. Это дало возможность определить величину модуля релаксации начиная со времени 10⁻⁵ сек. По экспериментальным данным работы [67], в книге [68] построен график модуля релаксации при чистом сдвиге для твердого ракетного двигательного топлива на отрезке [10⁻⁵ с, 10² с]. Следуя рекомендациям Кристенсена [66], мы рассмотрим изменение модуля релаксации начиная со временем 10⁻¹ с. Экспериментальные данные о модуле релаксации приведены в таблице 3.1.4.

Таблица 3.1.4. Изменение со времени модуля релаксации твердого топлива [68].

t, с	10 ⁻¹	1	10	100
$\frac{\tau_e(t)}{\gamma}$, МПа	1,88	1,421	1,16	1,02

Здесь $\tau_e(t)$ – касательные напряжение; γ – относительный сдвиг;

$\frac{\tau_e(100 \text{ с})}{\gamma} = 1,02 \text{ МПа}$. На отрезке $[0,1; 100]$ экспериментальный реологический параметр релаксации $r_e(t)$ (3.1) не зависит от величины деформаций сдвига γ , поэтому кривые релаксаций образцов твердого топлива подобны (Рис. 3.1.3). с помощью формул (3.12) и (3.13) найдем значения α и δ :

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,8725; \\ \delta &= 0,033391 \text{ с}^{-0,1275}.\end{aligned}\tag{3.20}$$

Значения коэффициентов подобия $r_e(t_s)$ и $r_m(t_s)$ сведены в таблицу 3.1.5.

Таблица 3.1.5. Значения $r_e(t_s)$ и $r_m(t_s)$

t, с	10^{-1}	1	10	100
$r_e(t_s)$	1	0,7558	0,6170	0,5426
$r_m(t_s)$	1	0,7380	0,6487	0,5288

Теперь с учётом данных таблиц 3.1.4 и 3.1.5 находим величину $\bar{\tau}_0(t_0 = 10^{-1} \text{ с})$ по формуле (3.15):

$$\bar{\tau}_0 = 1,88078 \text{ МПа}.\tag{3.21}$$

С учетом (3.20), (3.21) и (3.16) модуль релаксации твердого топлива при сдвиге имеет вид:

$$\frac{\tau_m(t)}{\gamma} = 1,88078 \left[1 - 0,26196 \cdot (t - 0,1)^{0,127466} \right],\tag{3.22}$$

где

$t \in [0,1; 100]$, t – в секундах.

Расчетные данные модуля релаксации твердого топлива (3.22) приведены в таблице 3.1.6.

Таблица 3.1.6. Расчетные данные процесса релаксации твердого топлива

t, с	10^{-1}	1	10	100
$\frac{\tau_e(t)}{\gamma/2}$, МПа	1,88078	1,3947	1,2209	0,9947

На рис. 3.1.5 по данным таблиц 3.1.4 и 3.1.6 представлены графики процесса релаксации твердого топлива при сдвиге [68].

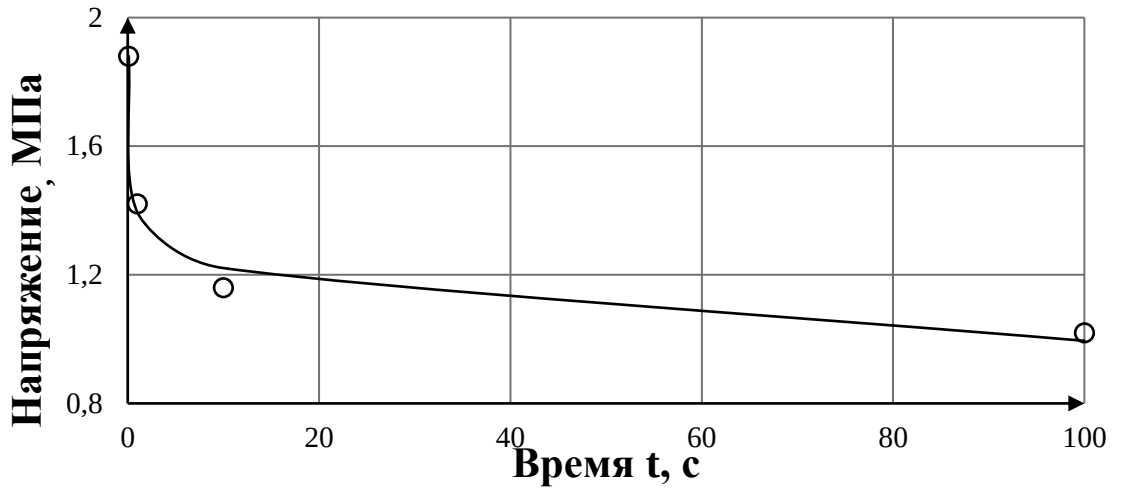


Рис. 3.1.5. Модуль релаксации твердого топлива при сдвиге.
Точки – эксперимент, линия – расчет

3.2 КРИТЕРИЙ ПОЧТИ-ПОДОБИЯ КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИЙ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Рассмотрим случай, когда коэффициенты подобия $r_e(t_s, T)$ (3.2) не удовлетворяют условиям (3.3). В этом случае экспериментальный реологический параметр релаксации $r_e(t_s, T, \varepsilon_0)$ (3.1) становятся функцией времени t и начальных деформаций ε_0 (Рис. 3.2.1).

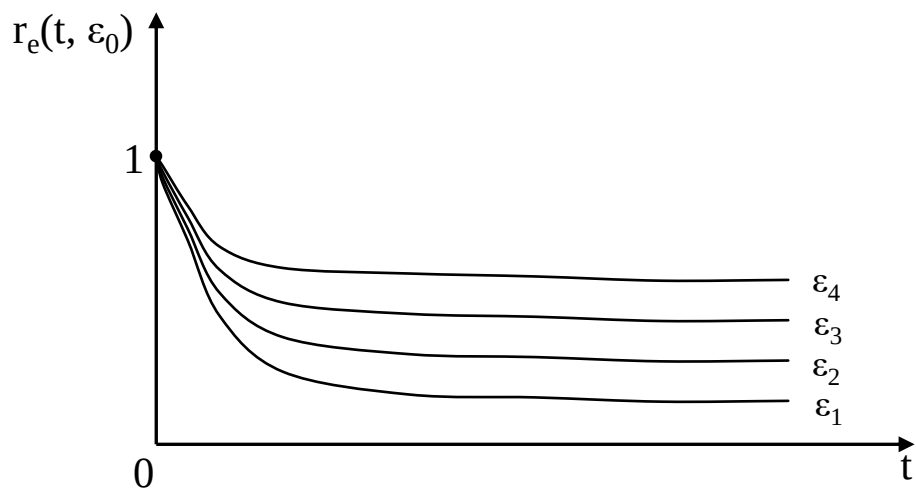


Рис. 3.2.1. Кривые экспериментального реологического параметра релаксаций при разных деформациях при $T = const$

Теперь рассмотрим разность:

$$\Delta r(t_s, T, \varepsilon_0) = |r_e(t_s, T, \varepsilon_i) - r_e(t_s, T, \varepsilon_j)|;$$

где $i \neq j$, $T = const$, $t_s \in [0, t_*]$, t_* – время окончания эксперимента.

Если, коэффициенты подобия $r_e(t_s, T, \varepsilon_0)$ удовлетворяют следующим условиям (3.23),

$$\Delta r(t_s, T, \varepsilon_0) \cdot 100(\%) < 10(\%), \quad (3.23)$$

то кривые релаксаций реономных материалов будут почти-подобными.

Теперь вместо коэффициентов подобия $r_e(t_s, T, \varepsilon_0)$ вводим коэффициент подобия

$$\bar{r}_e(t_s, T) = \frac{1}{N} \sum_{\xi=1}^N r_e(t_s, T, \varepsilon_\xi), \quad (3.24)$$

где N – число деформаций, $t_s \in [0, t_*]$, t_* – время окончания эксперимента.

Если кривые релаксаций реономных материалов будут почти-подобными, то экспериментальный реологический параметр релаксации определим следующим образом:

$$\bar{r}_e(t, T) = \frac{1}{N} \sum_{\xi=1}^N r_e(t, T, \varepsilon_\xi); \quad (3.25)$$

где $T = \text{const}$, N – число начальных деформаций ε_0 . Экспериментальный реологический параметр релаксации (3.25) зависит только от времени t и не зависит от величины деформации $\varepsilon = \varepsilon_0^e$ (Рис. 3.1.3).

С учетом (3.25) из (3.12) и (3.13), найдем соотношения для определения значения $\alpha = \alpha(T)$ и $\delta = \delta(T)$:

$$1 = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{r}_{ei} \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\alpha)} - \sum_{i=1}^M t_i^{(1-\alpha)} \sum_{i=1}^M \bar{r}_{ei} t_i^{(1-\alpha)}}{M \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\alpha)} - \left[\sum_{i=1}^M t_i^{(1-\alpha)} \right]^2}. \quad (3.26)$$

$$\delta(T) = \sum_{i=1}^M (1 - \bar{r}_{ei}) t_i^{(1-\alpha)} \left[(1 - \alpha)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\alpha)} \right]^{-1}, \quad (3.27)$$

где $\bar{r}_{ei} = \bar{r}_e(t = t_i, T)$.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ АЛГОРИТМА И МЕТОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОЧТИ-ПОДОБНЫХ КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИЙ. МАТЕРИАЛ ПОЛИОКСИМЕТИЛЕН ПРИ $T = 20^\circ\text{C}$.

В статье [69] эксперименты на релаксацию были проведены на материале

полиоксиметилена и получены две кривые релаксации с уровнями деформации 2(%) и 10(%) при $T = 20^{\circ}\text{C}$. Экспериментальные данные процесса релаксации полиоксиметилена приведены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1. Релаксация напряжений полиоксиметилена при $T = 20^{\circ}\text{C}$.

$\varepsilon, \%$	t, сек	0	10	50	100	200	400	600	800	1000
10%	$\sigma_e(t)$, МПа	70	68,35	61,75	54,81	51,21	49,47	48,50	48,17	47,83
2%	$\sigma_e(t)$, МПа	45,8	44,93	40,91	36,39	33,15	31,02	29,82	29,08	28,76

Таблица 3.2.2. Коэффициенты подобия $r_e(t_s, \varepsilon_0)$.

t, сек	0	10	50	100	200	400	600	800	1000
$r_e(t_s, 10\%)$	1	0,976	0,882	0,783	0,732	0,707	0,693	0,688	0,683
$r_e(t_s, 2\%)$	1	0,981	0,893	0,794	0,724	0,677	0,651	0,635	0,628

Таблица 3.2.3. Коэффициенты подобия $\bar{r}_e(t_s, T)$ и $r_m(t_s, T)$.

t, сек	0	10	50	100	200	400	600	800	1000
$r_e(t_s)$	1	0,9787	0,8877	0,7887	0,7277	0,6921	0,6720	0,6616	0,6556
$r_m(t_s)$	1	0,9259	0,8680	0,8307	0,7830	0,7217	0,6782	0,6432	0,6135

Таблица 3.2.4. Значения $\sigma_m(t, 20^{\circ}\text{C}, 10\%)$ и $\sigma_m(t, 20^{\circ}\text{C}, 2\%)$

$\varepsilon, \%$	t, сек	0	10	50	100	200	400	600	800	1000
10%	$\sigma_m(t)$ МПа	71,16	65,88	61,76	59,11	55,71	51,36	48,26	45,77	43,66
2%	$\sigma_m(t)$ МПа	45,11	41,76	39,15	37,47	35,32	32,56	30,59	29,02	27,67

С помощью данных таблицы 3.2.1 вычислены коэффициенты подобия кривых релаксации образцов полиоксиметилена $r_e(t_s, 10\%)$, $r_e(t_s, 2\%)$ и они сведены в таблицу 3.2.2. Анализ данных показывает что коэффициенты подобия $r_e(t_s, 10\%)$ и $r_e(t_s, 2\%)$ на отрезке $[0, 1000]$ с. удовлетворяют условиям (3.23). Теперь с учетом формулы (3.25) вычисляем значения экспериментального реологического параметра релаксации $\bar{r}_{ei} = \bar{r}_e(t = t_i, T)$. С помощью соотношения (3.26) и (3.27) находим:

$$\begin{aligned} \alpha(20^{\circ}\text{C}) &= 0,64147; \\ \delta(20^{\circ}\text{C}) &= 0,011642 \text{ с}^{-0,35853}. \end{aligned} \quad (3.28)$$

На основе соотношения (3.24) и (3.14) вычисляем значения коэффициентов подобия $\bar{r}_e(t_s, T)$ и $r_m(t_s, T)$ на отрезке $[0, 1000]$ с. Они приведены в таблице 3.2.3.

На основе данных таблицы 3.2.1 и 3.2.3 по формуле (3.15) находим:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_0^m(10\%, 20^\circ\text{C}) &= 71,15752 \text{ МПа;} \\ \bar{\sigma}_0^m(2\%, 20^\circ\text{C}) &= 45,10709 \text{ МПа.}\end{aligned}\quad (3.29)$$

С учетом (3.28) и (3.29) по формуле (3.16) вычисляем значения $\sigma_m(t, T, 10\%)$ и $\sigma_m(t, T, 2\%)$. Они сведены в таблицу 3.2.4.

На рис. 3.2.2 приведены кривые релаксации образцов полиоксиметилена при $T = 20^\circ\text{C}$.

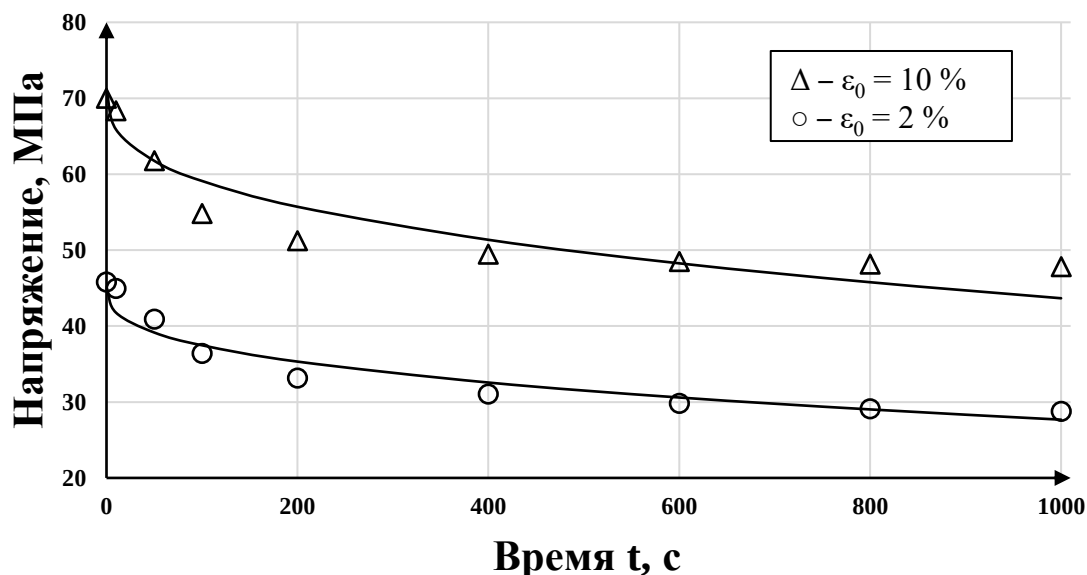


Рис. 3.2.2. Экспериментальные кривые релаксаций полиоксиметилена при $T = 20^\circ\text{C}$. Точки – эксперимент, линия – расчет.

МАТЕРИАЛ СТЕКЛОПЛАСТИК ТС 8/3-250.

В статье [70] эксперименты на релаксацию были проведены на материале стеклопластик ТС 8/3-250 и получены три кривые релаксации с уровнями деформации 0,31(%), 0,70(%) и 1,55(%). Экспериментальные данные процесса релаксации полиоксиметилена приведены в таблице 3.2.5.

Таблица 3.2.5. Экспериментальные значения релаксация напряжений стеклопластика ТС 8/3-250.

$\varepsilon, \%$	t, час	0	1	5	10	30	50	100	150	200	300	400	500
0,31	$\sigma_e(t, \varepsilon_1), \text{ МПа}$	60,9	53,57	49,85	48,85	45,85	45,71	43,76	42,33	41,47	40,87	40,84	40,63

Продолжение таблицы 3.2.5

0,7 0	$\sigma_e(t, \varepsilon_2)$, МПа	81,2	68,83	64,07	62,37	59,10	56,59	55,18	54,32	52,78	51,87	51,73	51,56
1,5 5	$\sigma_e(t, \varepsilon_3)$, МПа	101,5	82,33	75,63	73,78	70,17	70,34	67,71	66,02	63,01	62,89	62,83	62,79

Таблица 3.2.6. Коэффициенты подобия $r_e(t_s, \varepsilon_i)$.

t, час	0	1	5	10	30	50	100	150	200	300	400	500
$r_e(t_s, \varepsilon_1)$	1	0,879 6	0,818 5	0,802 1	0,752 9	0,750 6	0,718 6	0,695 1	0,680 9	0,671 1	0,670 7	0,667 1
$r_e(t_s, \varepsilon_2)$	1	0,847 7	0,789 1	0,768 1	0,727 8	0,697	0,679 5	0,669	0,65	0,638 8	0,637	0,635
$r_e(t_s, \varepsilon_3)$	1	0,811 1	0,745 1	0,726 9	0,691 3	0,693	0,667 1	0,650 5	0,620 8	0,619 6	0,619	0,618 6

Таблица 3.2.7. Коэффициенты подобия $\bar{r}_e(t_s)$ и $r_m(t_s)$.

t, час	0	1	5	10	30	50	100	150	200	300	400	500
$r_e(t_s)$	1	0,846 1	0,784 2	0,765 7	0,724	0,7135	0,6884	0,6715	0,6506	0,6432	0,6423	0,6403
$r_m(t_s)$	1	0,827 8	0,789	0,769 6	0,7353	0,7176	0,6917	0,6755	0,6634	0,6457	0,6326	0,622

С помощью данных таблицы 3.2.5 вычислены коэффициенты подобия кривых релаксации образцов стеклопластика $r_e(t_s, \varepsilon_i)$, и они сведены в таблицу 3.2.6. Анализ данных показывает что коэффициенты подобия $r_e(t_s, \varepsilon_i)$ на отрезке $[0, 500]$ ч. удовлетворяют условиям (3.23). Теперь с учетом формулы (3.25) вычисляем значения экспериментального реологического параметра релаксации $\bar{r}_e(t_s)$. С помощью соотношения (3.26) и (3.27) находим:

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,873501; \\ \delta &= 0,02178^{-0.126799}.\end{aligned}\quad (3.2.1)$$

На основе данных таблицы 3.2.5 и 3.2.7 по формуле (3.15) находим:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_0^m(0,31\%) &= 63,549107 \text{ МПа}; \\ \bar{\sigma}_0^m(0,70\%) &= 80,851975 \text{ МПа}; \\ \bar{\sigma}_0^m(1,55\%) &= 97,535491 \text{ МПа}.\end{aligned}\quad (3.2.2)$$

С учетом (3.2.1) и (3.2.2) по формуле (3.16) вычисляем значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$. Они сведены в таблицу 3.2.8.

Таблица 3.2.8. Расчетные значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$

$\varepsilon, \%$	t, час	0	1	5	10	30	50	100	150	200	300	400	500
0,31	$\sigma_m(t, \varepsilon_1),$ МПа	63,55	52,61	50,14	48,91	46,72	45,60	43,96	42,93	42,16	41,04	40,20	39,53
0,70	$\sigma_m(t, \varepsilon_2),$ МПа	80,85	66,93 ₁	63,79	62,22	59,45	58,02	55,93	54,61	53,64	52,21	51,15	50,30
1,55	$\sigma_m(t, \varepsilon_3),$ МПа	97,54	80,74 ₁	76,95	75,06	71,71	69,99	67,47	65,88	64,71	62,98	61,70	60,68

На рис. 3.2.3 приведены кривые релаксации образцов стеклопластика.

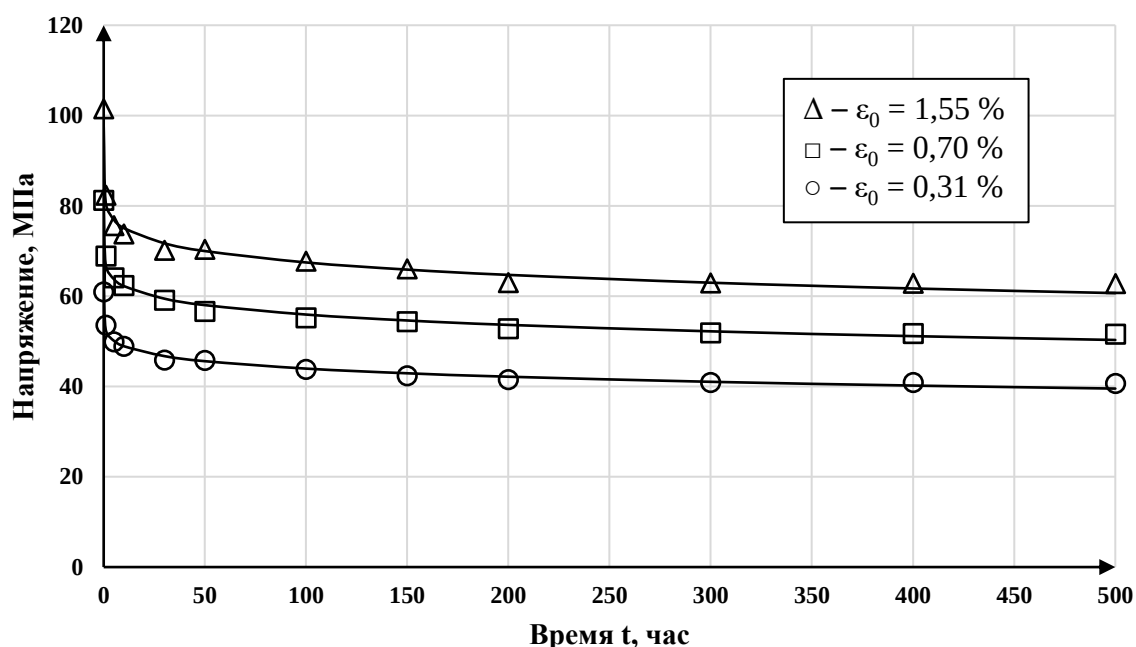


Рис. 3.2.3. Экспериментальные и расчетные кривые релаксаций стеклопластика ТС 8/3-250. Точки – эксперимент, линия – расчет.

3.3 КРИВЫЕ РЕЛАКСАЦИЙ РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ НЕ ПОДОБНЫ.

Критерий. Если на отрезке $t_s \in [0, t_*]$ (t_* – время окончания эксперимента) в одной точке $t_s = \tilde{t}$ (или нескольких точках) не выполняется условия почти-подобия (3.23), то кривые релаксаций на отрезке $[0, t_*]$ будут не подобны.

В этом случае, каждая экспериментальная кривая $\sigma_e(t, T, \varepsilon_\xi)$ ($\xi = 1 - N$, N – число деформаций ε_0) моделируется собственными коэффициентами. $\tilde{\alpha} = \alpha(T, \varepsilon_\xi)$ и $\tilde{\delta} = \delta(T, \varepsilon_\xi)$:

$$1 = \frac{\sum_{i=1}^M \tilde{r}_{ei} \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\tilde{\alpha})} - \sum_{i=1}^M t_i^{(1-\tilde{\alpha})} \sum_{i=1}^M \tilde{r}_{ei} \cdot t_i^{(1-\tilde{\alpha})}}{M \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\tilde{\alpha})} - \left[\sum_{i=1}^M t_i^{(1-\tilde{\alpha})} \right]^2}; \quad (3.30)$$

$$\tilde{\delta}(T) = \sum_{i=1}^M (1 - \tilde{r}_{ei}) t_i^{(1-\tilde{\alpha})} \cdot \left[(1 - \tilde{\alpha})^{-1} \sum_{i=1}^M t_i^{2(1-\tilde{\alpha})} \right]^{-1}, \quad (3.31)$$

где $\tilde{r}_{ei} = r_e(t = t_i, T, \varepsilon_\xi)$, $\xi = 1 - N$, N – число деформаций ε_0 .

Расчетный реологический параметр релаксации имеет вид:

$$\tilde{r}_m(t, T) = 1 - \frac{\tilde{\delta}}{1 - \tilde{\alpha}} t^{(1-\tilde{\alpha})}, \quad (3.32)$$

здесь $\tilde{r}_m = r_m(t, T, \varepsilon_\xi)$, $\xi = 1 - N$, N – число деформаций ε_0 . Коэффициент $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\delta}$ определяется соотношениями (3.30) и (3.31).

Теперь по формуле (3.32) вычисляем:

$$\tilde{r}_m(t_s, T) = 1 - \frac{\tilde{\delta}}{1 - \tilde{\alpha}} t_s^{(1-\tilde{\alpha})}, \quad (3.33)$$

где $t_s \in [0, t_*]$, t_* – время окончания эксперимента. С учетом (3.33) определяем значения $\bar{\sigma}_0^m(\varepsilon_\xi, T)$:

$$\bar{\sigma}_0^m(\varepsilon_\xi, T) = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \frac{\sigma_e(t_s, T, \varepsilon_\xi)}{\tilde{r}_m(t_s, T)}; \quad (3.34)$$

где M – число напряжений, $\xi = 1 - N$, N – число деформаций ε_0 .

Каждая кривая релаксаций реономных материалов моделируется соотношениями вида:

$$\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi) = \bar{\sigma}_0^m(\varepsilon_\xi, T) \left[1 - \frac{\tilde{\delta}}{1 - \tilde{\alpha}} t^{(1-\tilde{\alpha})} \right]; \quad (3.35)$$

здесь $\tilde{\alpha}$ – определяется соотношением (3.30), $\tilde{\delta}$ – соотношением (3.31), $\bar{\sigma}_0^m(\varepsilon_\xi, T)$ – определяется по формуле (3.34), $\xi = 1 - N$, N – число деформаций ε_0 .

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ АЛГОРИТМА И МЕТОДОВ К
МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЙ.
МАТЕРИАЛ ПОЛИОКСИМЕТИЛЕН ПРИ $T = 80^{\circ}\text{C}$.**

Экспериментальные значения $\sigma_e(t, \varepsilon_\xi)$ материала полиоксиметилена в работе [71] приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.3.1. Релаксация напряжений полиоксиметилена при $T = 80^{\circ}\text{C}$.

$\varepsilon, \%$	$t, \text{сек}$	0	10	50	100	200	400	600
$\varepsilon_1=10$	$\sigma_e(t, \varepsilon_1),$ МПа	35	34,26	31,23	28	25,76	25,08	25,06
$\varepsilon_2=2$	$\sigma_e(t, \varepsilon_2),$ МПа	17	16,44	14,06	11,67	10,41	10,08	9,91

С помощью данных таблицы 3.3.1 вычислены коэффициенты подобия кривых релаксации образцов полиоксиметилена $r_e(t_s, \varepsilon_\xi)$ на отрезке $t_s \in [0, 600]$ с. Они сведены в таблицу 3.3.2.

Таблица 3.3.2. Коэффициенты подобия $r_e(t_s, 10\%)$ и $r_e(t_s, 2\%)$.

$t, \text{сек}$	0	10	50	100	200	400	600
$r_e(t_s, 10\%)$	1	0,9788	0,8923	0,8	0,7361	0,7165	0,716
$r_e(t_s, 2\%)$	1	0,9673	0,8272	0,6867	0,6123	0,593	0,5828

Анализ данных таблицы 3.3.2 показывает, что начиная с точки $t=100$ с. не выполняется условия почти-подобия (3.23). С помощью соотношения (3.30) и (3.31) находим:

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}(20^{\circ}\text{C}) &= 0,675308; \\ \tilde{\delta}(20^{\circ}\text{C}) &= 0,014593 \text{c}^{-0,324692}.\end{aligned}\tag{3.36}$$

С учетом (3.33) вычисляем значения экспериментального реологического параметра релаксации $\tilde{r}_e(t_s, T)$ и $\tilde{r}_m(t_s, T)$. Они приведены в таблице 3.3.3.

Таблица 3.3.3. Коэффициенты подобия $\tilde{r}_e(t_s, 80^{\circ}\text{C})$ и $\tilde{r}_m(t_s, 80^{\circ}\text{C})$.

$t, \text{сек}$	0	10	50	100	200	400	600
$\tilde{r}_e(t_s)$	1	0,9731	0,8598	0,7433	0,6742	0,6547	0,6494
$\tilde{r}_m(t_s)$	1	0,919	0,8476	0,7999	0,7373	0,6551	0,5955

На основе данных таблицы 3.3.1 и 3.3.3 по формуле (3.34) находим:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_0^m(10\%, 20^\circ\text{C}) &= 37,405621 \text{ МПа;} \\ \bar{\sigma}_0^m(2\%, 20^\circ\text{C}) &= 15,869881 \text{ МПа.}\end{aligned}\quad (3.37)$$

С учетом (3.36) и (3.37) по формуле (3.35) вычисляем значения $\sigma_m(t, T, 10\%)$ и $\sigma_m(t, T, 2\%)$. Они сведены в таблицу 3.3.4.

Таблица 3.3.4. Значения $\sigma_m(t, 80^\circ\text{C}, 10\%)$ и $\sigma_m(t, 80^\circ\text{C}, 2\%)$.

$\varepsilon, \%$	$t, \text{сек}$	0	10	50	100	200	400	600
10	$\sigma_m(t)$ МПа	37,41	34,38	31,71	29,92	27,58	24,5	22,28
2	$\sigma_m(t)$ МПа	15,87	14,59	13,45	12,7	11,7	10,4	9,45

На рис. 3.3.1 приведены кривые релаксации образцов полиоксиметилена при $T = 80^\circ\text{C}$.

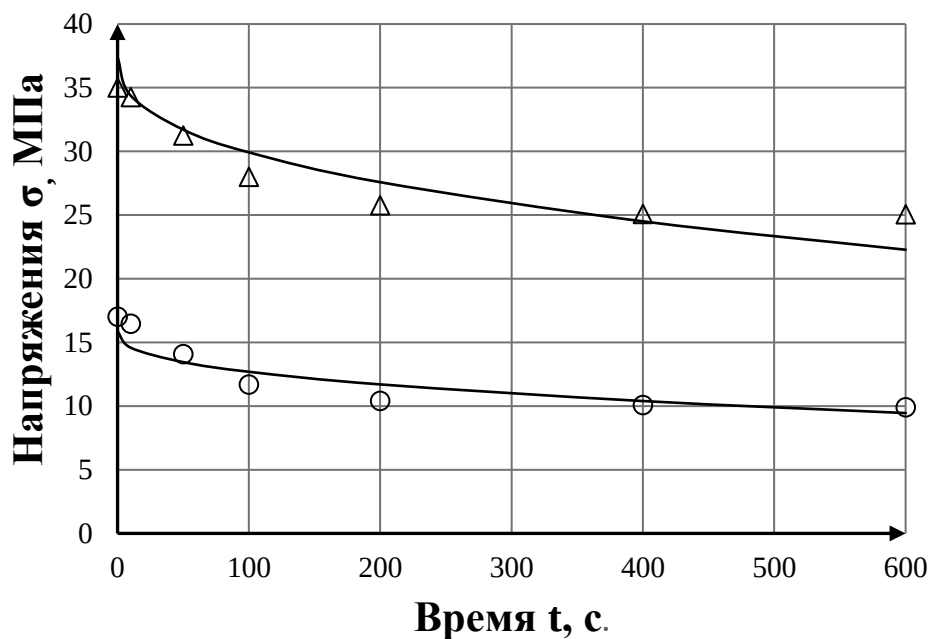


Рис. 3.3.1. Экспериментальные кривые релаксаций полиоксиметилена при $T = 80^\circ\text{C}$. Точки – эксперимент, линия – расчет, Δ – $\varepsilon = 10\%$, $\circ$ – $\varepsilon = 2\%$.

А) МАТЕРИАЛ ХРОМОМОЛИБДЕНОВАЯ СТАЛЬ 30ХМА ПРИ $T = 500^\circ\text{C}$

В работе [72] была проведена испытания на релаксацию хромомолибденовой стали 30ХМА при $T = 500^\circ\text{C}$. Значения релаксация напряжений хромомолибденовой стали показаны в таблице 3.3.5.

Таблица 3.3.5. Экспериментальные данные релаксация напряжений хромомолибденовой стали 30ХМА.

ε	t, час	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0,154	$\sigma_e(t, \varepsilon_1)$, МПа	308	176,3 951	156,3 83	145,1 664	137,4 9	130,8 855	125,0 548	119,8 957			
0,129 6	$\sigma_e(t, \varepsilon_2)$, МПа	259,2	155,8 75	139,3 052	130,7 286	124,4 5	119,9 439	115,8 378	113,0 261	110,7 286	108,8 97	107,4 975
0,1	$\sigma_e(t, \varepsilon_3)$, МПа	200	133,5 82	119,1 08	110,9 549	104,8 305	100	96,51 057	93,98 136	91,87 733	90,27 416	88,99 475
0,070 5	$\sigma_e(t, \varepsilon_4)$, МПа	141	92,72 766	84,55 721	79,63 744	76,70 782	74,57 175	72,27 231	71,64 163	70,88 99	70,42 821	70,54 266

С помощью данных таблицы 3.3.1 вычислены коэффициенты подобия кривых релаксации образцов хромомолибденовой стали 30ХМА $r_e(t_s, \varepsilon_\xi)$ на отрезках $t_s \in [0, 35]$ ч и $t_s \in [0, 50]$ ч. Они сведены в таблицу 3.3.6.

Таблица 3.3.6. Коэффициенты подобия $r_e(t_s, \varepsilon_i)$.

t, час	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$r_e(t_s, \varepsilon_1)$	1	0,572 7	0,507 7	0,4713	0,4464	0,425	0,406	0,3893			
$r_e(t_s, \varepsilon_2)$	1	0,601 4	0,537 4	0,5044	0,4801	0,4627	0,4469	0,4361	0,4272	0,4201	0,4147
$r_e(t_s, \varepsilon_3)$	1	0,667 9	0,595 5	0,5548	0,5242	0,5	0,4826	0,4699	0,4594	0,4514	0,445
$r_e(t_s, \varepsilon_4)$	1	0,657 6	0,599 7	0,5648	0,544	0,5289	0,5126	0,5081	0,5028	0,4995	0,5003

Анализ данных таблицы 3.3.6 показывает, что начиная с точки $t = 40$ ч не выполняется условия почти-подобия (3.23). С помощью соотношения (3.30) и (3.31) находим:

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}(500^\circ\text{C}, 0,154) &= 0,820327; \\ \tilde{\delta}(500^\circ\text{C}, 0,154) &= 0,058037 \text{ ч}^{-0,179673}.\end{aligned}\quad (3.38)$$

и

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}(500^\circ\text{C}) &= 0,921239; \\ \tilde{\delta}(500^\circ\text{C}) &= 0,049769 \text{ ч}^{-0,078761}.\end{aligned}\quad (3.39)$$

С учетом (3.33) вычисляем значения экспериментального реологического параметра релаксации $\tilde{r}_e(t_s, T)$ и $\tilde{r}_m(t_s, T)$. Они приведены в таблицах 3.3.7 и 3.3.8.

Таблица 3.3.7. Коэффициенты подобия $\bar{r}_e(t_s)$ и $\tilde{r}_m(t_s)$ при $\varepsilon_0 = 0,154$.

t, час	0	5	10	15	20	25	30	35
$\bar{r}_e(t_s)$	1	0,5727	0,5077	0,4713	0,4464	0,425	0,406	0,3893
$\tilde{r}_m(t_s)$	1	0,5687	0,5115	0,4745	0,4467	0,424	0,4049	0,3881

Таблица 3.3.8. Коэффициенты подобия $\bar{r}_e(t_s)$ и $\tilde{r}_m(t_s)$.

t, час	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\bar{r}_e(t_s)$	1	0,6423	0,5776	0,5413	0,5161	0,4972	0,4807	0,4714	0,4631	0,457	0,4533
$\tilde{r}_m(t_s)$	1	0,6287	0,5797	0,5481	0,5243	0,505	0,4886	0,4743	0,4616	0,4501	0,4397

На основе данных таблицы 3.3.5, 3.3.7 и 3.8 по формуле (3.34) находим:

$$\begin{aligned}
 \bar{\sigma}_0^m(0,154, 500^\circ\text{C}) &= 308,0179 \text{ МПа;} \\
 \bar{\sigma}_0^m(0,1296, 500^\circ\text{C}) &= 240,3331 \text{ МПа;} \\
 \bar{\sigma}_0^m(0,1, 500^\circ\text{C}) &= 201,6033 \text{ МПа;} \\
 \bar{\sigma}_0^m(0,0705, 500^\circ\text{C}) &= 150,2084 \text{ МПа.}
 \end{aligned}
 \tag{3.40}$$

С учетом (3.38), (3.39) и (3.40) по формуле (3.35) вычисляем значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$. Они сведены в таблицу 3.3.9.

Таблица 3.3.9. Расчетные значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$

ε	t, час	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0,154	$\sigma_m(t)$, МПа	308,02	175,16	157,54	146,17	137,58	130,61	124,7	119,55			
0,1296	$\sigma_m(t)$, МПа	240,33	151,1	139,33	131,74	126,01	121,36	117,42	113,98	110,93	108,18	105,67
0,1	$\sigma_m(t)$, МПа	201,6	126,75	116,88	110,51	105,7	101,8	98,5	95,62	93,06	90,75	88,64
0,0705	$\sigma_m(t)$, МПа	150,21	94,44	87,08	82,34	78,76	75,85	73,39	71,24	69,33	67,61	66,04

На рис. 3.3.2 приведены кривые релаксации образцов хромомолибденовой стали 30ХМА при $T = 500^\circ\text{C}$.

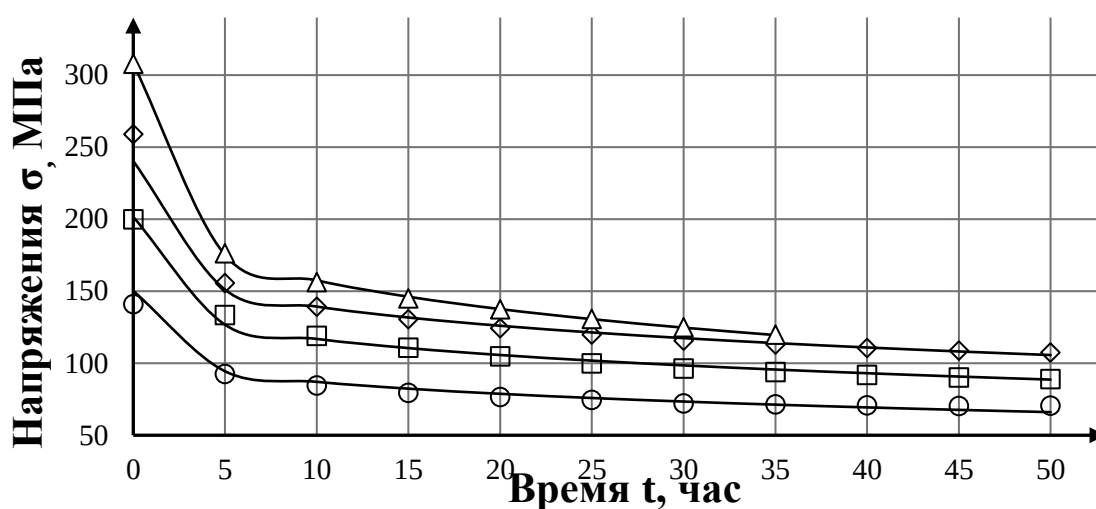


Рис. 3.3.2. Экспериментальные кривые релаксаций хромомолибденовой стали 30ХМА при $T = 500^{\circ}\text{C}$. Точки – эксперимент, линия – расчет, $\Delta - \varepsilon = 0.154\%$, $\diamond - \varepsilon = 0.1296\%$, $\square - \varepsilon = 0.1\%$, $\circ - \varepsilon = 0.0705\%$.

Б) МАТЕРИАЛ ХРОМОМОЛИБДЕНОВАЯ СТАЛЬ 30ХМА ПРИ $T = 500^{\circ}\text{C}$.

В работе [72] была проведена испытания на релаксацию хромомолибденовой стали 30ХМА при $T = 500^{\circ}\text{C}$. Опыт заключался в том, что образец растягивался с постоянной скоростью нагружения, т. е. с нагрузкой, растущей пропорционально времени до тех пор, пока пластическая часть деформации не делалась равной ε_1 . Значения релаксации с предварительной ползучестью в течении 25 часов, релаксации с предварительным растяжением $\varepsilon_{пл} = 25$ ч. и чистой релаксации хромомолибденовой стали показаны в таблице 3.10. По данным эксперимента предварительная ползучесть сильно замедляет релаксацию, влияние же кратковременной пластической деформации почти не ощутимо. Экспериментальные значения релаксация напряжений хромомолибденовой стали показаны в таблице 3.3.10.

Таблица 3.3.10. Экспериментальные данные релаксация напряжений хромомолибденовой стали 30ХМА. $\sigma_e(t, \varepsilon_1)$ – релаксация с предварительной ползучестью, $\sigma_e(t, \varepsilon_2)$ – релаксация с предварительным растяжением, $\sigma_e(t, \varepsilon_3)$ – чистая релаксация.

t, час	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\sigma_e(t, \varepsilon_1)$, МПа	200	173,02	161,44	153,21	146,96	142,03	138,76	136,29	134,75	133,8	133,26
$\sigma_e(t, \varepsilon_2)$, МПа	200	134,99	116,32	106,89	101,33	99,054	95,559	92,34	89,62	86,42	83,85
$\sigma_e(t, \varepsilon_3)$, МПа	200	127,59	109,82	101,93	96,47	94,03	91	88,28	85,72	81,33	80,34
$\sigma_e(t, \varepsilon_4)$, МПа	200	173,02	161,44	153,21	146,96	142,03	138,76	136,29	134,75	133,8	133,26

С помощью данных таблицы 3.3.10 вычислены коэффициенты подобия кривых релаксации образцов хромомолибденовой стали 30ХМА $r_e(t_s, \varepsilon_\xi)$ на отрезке $t_s \in [0, 50]$ ч. Они сведены в таблицу 3.3.11.

Таблица 3.3.11. Коэффициенты подобия $r_e(t_s, \varepsilon_i)$.

t, час	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$r_e(t_s, \varepsilon_1)$	1	0,865 1	0,807 2	0,7661	0,7348	0,7102	0,6938	0,6814	0,6737	0,669	0,6663
$r_e(t_s, \varepsilon_2)$	1	0,674 9	0,581 6	0,5345	0,5066	0,4953	0,4778	0,4617	0,4481	0,4321	0,4193
$r_e(t_s, \varepsilon_3)$	1	0,638	0,549 1	0,5097	0,4823	0,4702	0,455	0,4414	0,4286	0,4067	0,4017

Анализ данных таблицы 3.3.11 показывает, что не выполняется условия почти-подобия (3.23). С помощью соотношения (3.30) и (3.31) находим:

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}(500^\circ\text{C}, \varepsilon_1) &= 0,632769; \\ \tilde{\delta}(500^\circ\text{C}, \varepsilon_1) &= 0,03096 \text{ ч}^{-0,367231},\end{aligned}\quad (3.41)$$

И

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}(500^\circ\text{C}) &= 0,788423; \\ \tilde{\delta}(500^\circ\text{C}) &= 0,055112 \text{ ч}^{-0,211577}.\end{aligned}\quad (3.42)$$

С учетом (3.33) вычисляем значения экспериментального реологического параметра релаксации $\tilde{r}_e(t_s, T)$ и $\tilde{r}_m(t_s, T)$. Они приведены в таблицах 3.3.12 и 3.3.13.

Таблица 3.3.12. Коэффициенты подобия $\bar{r}_e(t_s)$ и $\tilde{r}_m(t_s)$ для релаксации с предварительным растяжением и чистой релаксации.

t, час	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\bar{r}_e(t_s)$	1	0,6564	0,5654	0,5221	0,4945	0,4827	0,4664	0,4516	0,4383	0,4194	0,4105
$\tilde{r}_m(t_s)$	1	0,6338	0,576	0,538	0,509	0,4853	0,465	0,4473	0,4315	0,4171	0,404

Таблица 3.3.13. Коэффициенты подобия $\bar{r}_e(t_s)$ и $\tilde{r}_m(t_s)$ для релаксации с предварительной ползучестью.

t, час	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\bar{r}_e(t_s)$	1	0,8651	0,8072	0,7661	0,7348	0,7102	0,6938	0,6814	0,6737	0,669	0,6663
$\tilde{r}_m(t_s)$	1	0,8478	0,8036	0,7721	0,7467	0,7251	0,706	0,6889	0,6733	0,6588	0,6454

На основе данных таблицы 3.3.10, 3.3.12 и 3.3.13 по формуле (3.34) находим:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_0^m(500^\circ\text{C}, \varepsilon_1) &= 200,022 \text{ МПа;} \\ \bar{\sigma}_0^m(500^\circ\text{C}, \varepsilon_2) &= 205,1058 \text{ МПа;} \\ \bar{\sigma}_0^m(500^\circ\text{C}, \varepsilon_3) &= 195,018 \text{ МПа.}\end{aligned}\quad (3.43)$$

С учетом (3.41), (3.42) и (3.43) по формуле (3.35) вычисляем значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$. Они сведены в таблицу 3.3.14.

Таблица 3.3.14. Расчетные значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$

t, час	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\sigma_m(t)$, МПа	200,02	169,57	160,74	154,44	149,36	145,03	141,22	137,8	134,67	131,78	129,09
$\sigma_m(t)$, МПа	205,11	130,01	118,14	110,35	104,41	99,54	95,39	91,75	88,5	85,56	82,86
$\sigma_m(t)$, МПа	195,02	123,61	112,33	104,93	99,27	94,64	90,7	87,24	84,15	81,35	78,79

На рис. 3.3.3 приведены кривые релаксации образцов хромомолибденовой стали 30ХМА при $T = 500^\circ\text{C}$.

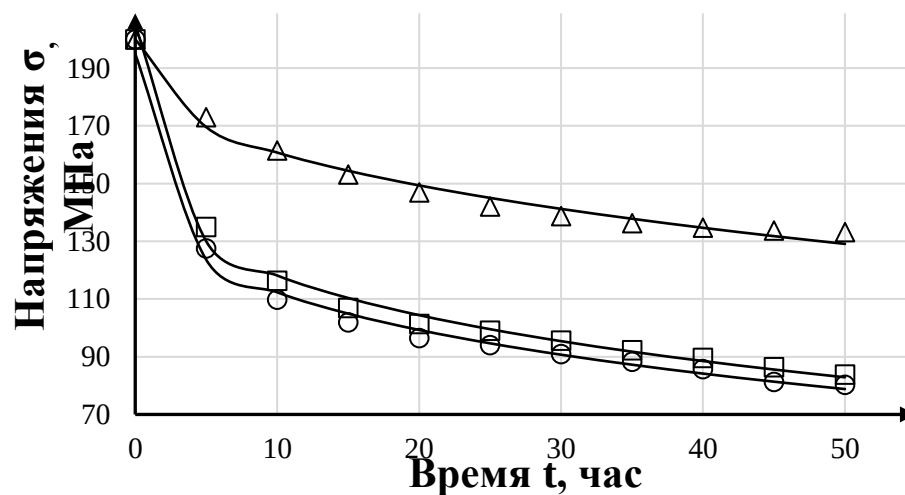


Рис. 3.3.3. Экспериментальные кривые релаксаций хромомолибденовой стали 30ХМА при $T = 500^\circ\text{C}$. Точки – эксперимент, линия – расчет, Δ – релаксация с предварительной ползучестью, $\square$ – релаксация с предварительным растяжением, $\circ$ – чистая релаксация.

А) МАТЕРИАЛ ДЮРАЛЮМИН ПРИ $T = 150^\circ\text{C}$.

В работе [73] была проведена испытания на материал дюралюмин при $T = 150^\circ\text{C}$. При проведении эксперимента начальные напряжения σ_0 были равны

20,0 МПа, 22,5 МПа и 25 МПа. Деформация удерживалась постоянной с точностью до $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. Экспериментальные данные испытания приведены в таблице 3.3.15.

Таблица 3.3.15. Экспериментальные значения релаксация напряжений дюралюмина.

ε	t, час	0	2	4	8	16	30	40	50	60	70	80
0,36 98 $\sigma_e(t, \varepsilon_1)$, МПа		25	24,43	24,23	24,18	24,05	23,61	23,5	23,32	23,08	22,95	22,74
0,33 28 $\sigma_e(t, \varepsilon_2)$, МПа		22,5	21,65	21,73	21,91	21,77	21,5	21,34	21,25	21,06		
0,29 58 $\sigma_e(t, \varepsilon_3)$, МПа		20	19,86	19,73	19,56	19,45	19,38	19,29	19,16	19	18,84	18,8

По данным таблицы 3.3.15 вычислены коэффициенты подобия. Они приведены в таблице 3.3.16.

Таблица 3.3.16. Коэффициенты подобия $r_e(t_s, \varepsilon_i)$.

t, час	0	2	4	8	16	30	40	50	60	70	80
$r_e(t_s, \varepsilon_1)$	1	0,9773	0,9692	0,967	0,962	0,9443	0,94	0,9329	0,9234	0,918	0,9096
$r_e(t_s, \varepsilon_2)$	1	0,9622	0,966	0,974	0,9675	0,9558	0,9483	0,9444	0,9362		
$r_e(t_s, \varepsilon_3)$	1	0,9932	0,9866	0,9779	0,9727	0,9688	0,9639	0,9579	0,95	0,942	0,9401

С помощью соотношения (3.30) и (3.31) находим:

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}(150^\circ\text{C}, 0,3328) &= 0,793257; \\ \tilde{\delta}(150^\circ\text{C}, 0,3328) &= 0,004917 \text{ ч}^{-0,206743},\end{aligned}\quad (3.44)$$

и

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}(150^\circ\text{C}) &= 0,561226; \\ \tilde{\delta}(150^\circ\text{C}) &= 0,00456 \text{ ч}^{-0,438774}.\end{aligned}\quad (3.45)$$

С учетом (3.33) вычисляем значения экспериментального реологического параметра релаксации $\tilde{r}_e(t_s, T)$ и $\tilde{r}_m(t_s, T)$. Они приведены в таблицах 3.3.17 и 3.3.18.

Таблица 3.3.17. Коэффициенты подобия $r_e(t_s)$ и $r_m(t_s)$ при $\varepsilon_0 = 0,3328$.

t, час	0	2	4	8	16	30	40	50	60
$r_e(t_s)$	1	0,9622	0,9660	0,9740	0,9675	0,9558	0,9483	0,9444	0,9362
$r_m(t_s)$	1	0,9726	0,9683	0,9634	0,9578	0,9520	0,949	0,9466	0,9446

Таблица 3.3.18. Коэффициенты подобия $\tilde{r}_e(t_s)$ и $r_m(t_s)$.

t, час	0	2	4	8	16	30	40	50	60	70	80
$\tilde{r}_e(t_s)$	1	0,9852	0,9779	0,9726	0,9673	0,9566	0,9520	0,9454	0,9367	0,9301	0,9248
$r_m(t_s)$	1	0,9859	0,9809	0,974	0,9649	0,9538	0,9476	0,9422	0,937	0,9330	0,9289

На основе данных таблицы 3.3.15, 3.3.17 и 3.3.18 по формуле (3.34) находим:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_0^m(150^\circ\text{C}, 0,3698) &= 24,72478 \text{ МПа;} \\ \bar{\sigma}_0^m(150^\circ\text{C}, 0,3328) &= 22,5 \text{ МПа;} \\ \bar{\sigma}_0^m(150^\circ\text{C}, 0,2958) &= 20,21999 \text{ МПа.}\end{aligned}\quad (3.46)$$

С учетом (3.44), (3.45) и (3.46) по формуле (3.35) вычисляем значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$. Они сведены в таблицу 3.3.19.

Таблица 3.3.19. Расчетные значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$

ε	t, час	0	2	4	8	16	30	40	50	60	70	80
0,3698	$\sigma_m(t, \varepsilon_1)$, МПа	24,72	24,37	24,25	24,08	23,86	23,58	23,43	23,29	23,18	23,07	22,97
0,3328	$\sigma_m(t, \varepsilon_2)$, МПа	22,5	21,88	21,79	21,68	21,55	21,42	21,35	21,3	21,25		
0,2958	$\sigma_m(t, \varepsilon_3)$, МПа	20,22	19,94	19,83	19,7	19,51	19,29	19,16	19,05	18,95	18,86	18,78

Графики экспериментальных и расчетных кривых релаксаций напряжений по данным таблиц 3.3.15 и 3.3.19 показаны на рис. 3.3.4.

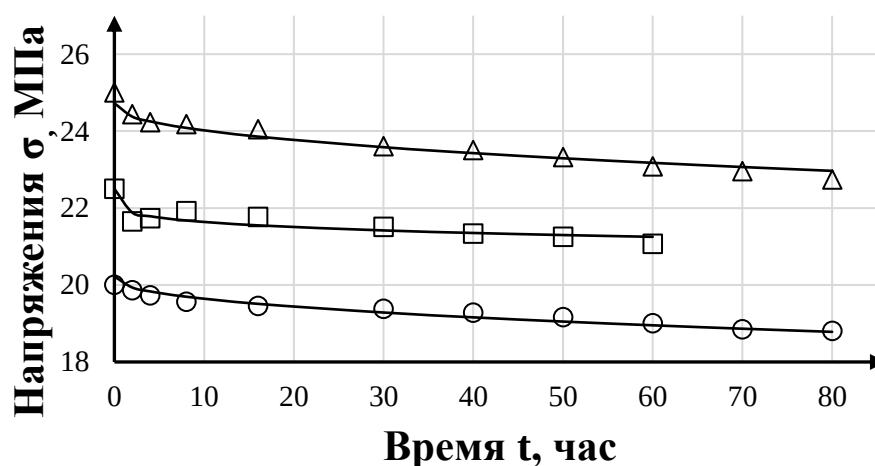


Рис. 3.3.4. Экспериментальные и расчетные кривые релаксаций дюралюмина при $T=150^\circ\text{C}$. Точки – эксперимент, линия – расчет, Δ – $\varepsilon = 0,3698\%$, $\square$ – $\varepsilon = 0,3328\%$, $\circ$ – $\varepsilon = 0,2958\%$.

Б) МАТЕРИАЛ ДЮРАЛЮМИН ПРИ $T = 150^{\circ}\text{C}$.

В работе [73] была проведена испытания на материал дюралюмина при $T = 150^{\circ}\text{C}$. При проведении данного эксперимента начальные напряжения σ_0 были равны 26,5 МПа, 27,5 МПа, 30 МПа и 32 МПа. Начальная деформация ε_0 соответственно 0,392, 0,4068, 0,444 и 0,473. Деформация удерживалась постоянной с точностью до $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. Экспериментальные данные испытания приведены в таблице 3.3.20.

Таблица 3.3.20. Экспериментальные значения релаксация напряжений дюралюмина.

ε	t, час	0	2	4	6	8	12	16	24	30	40	48	60	66	72	91
0,392	$\sigma_e(t, \varepsilon_1)$, МПа	26,5	25,63	25,55	25,43	25,33	25,07									
0,4068	$\sigma_e(t, \varepsilon_2)$, МПа	27,5	26,56	26,44	26,36	26,29	26,13	25,83	25,41	25,32						
0,444	$\sigma_e(t, \varepsilon_3)$, МПа	30	29,15	29,17	28,99	28,62	28,26	28,12	27,83	27,54	27,43	27,35	26,94	27,05	26,95	27
0,473	$\sigma_e(t, \varepsilon_4)$, МПа	32	31,01	30,87	30,69	30,41	30,15	29,92	29,78	29,52	29,41	29,14	28,94	28,73	28,45	28,1

По данным таблицы 3.3.20 вычислены коэффициенты подобия. Они приведены в таблице 3.3.21.

Таблица 3.3.21. Коэффициенты подобия $r_e(t_s, \varepsilon_i)$.

t, час	0	2	4	6	8	12	16	24	30	40	48	60	66	72	91
$r_e(t_s, \varepsilon_1)$	1	0,9673	0,964	0,9597	0,956	0,9459									
$r_e(t_s, \varepsilon_2)$	1	0,9657	0,9615	0,9587	0,9562	0,949	0,9392	0,9239	0,9209						
$r_e(t_s, \varepsilon_3)$	1	0,9717	0,9723	0,9663	0,9541	0,9419	0,9375	0,9278	0,9181	0,9145	0,9116	0,8979	0,9016	0,8984	0,9
$r_e(t_s, \varepsilon_4)$	1	0,9692	0,9647	0,9592	0,9503	0,9422	0,9349	0,9306	0,9219	0,9191	0,9105	0,9044	0,8979	0,8891	0,878

С помощью соотношения (3.30) и (3.31) находим:

$$\tilde{\alpha}(150^{\circ}\text{C}, 0,392) = 0,708179; \quad (3.47)$$

$$\tilde{\delta}(150^{\circ}\text{C}, 0,392) = 0,00727 \text{ ч}^{-0,291821},$$

$$\tilde{\alpha}(150^{\circ}\text{C}, 0,4068) = 0,638569; \quad (3.48)$$

$$\tilde{\delta}(150^{\circ}\text{C}, 0,4068) = 0,00821 \text{ ч}^{-0,361431},$$

и

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}(150^{\circ}\text{C}) &= 0,632769; \\ \tilde{\delta}(150^{\circ}\text{C}) &= 0,008 \text{ ч}^{-0,367231}.\end{aligned}\quad (3.49)$$

С учетом (3.33) вычисляем значения экспериментального реологического параметра релаксации $\tilde{r}_e(t_s, T)$ и $\tilde{r}_m(t_s, T)$. Они приведены в таблицах 3.3.22, 3.3.23 и 3.3.24.

Таблица 3.3.22. Коэффициенты подобия $\bar{r}_e(t_s)$ и $r_m(t_s)$ при начальной деформации 0,392.

t, час	0	2	4	6	8	12
$r_e(t_s)$	1	0,96729	0,964083	0,959705	0,956026	0,945905
$r_m(t_s)$	1	0,969506	0,962669	0,95798	0,9543	0,94856

Таблица 3.3.23. Коэффициенты подобия $\bar{r}_e(t_s)$ и $r_m(t_s)$ при начальной деформации 0,4068.

t, час	0	2	4	6	8	12	16	24	30
$r_e(t_s)$	1	0,96567 8	0,96151 9	0,95870 2	0,95617	0,94895 4	0,93917 1	0,92394 3	0,92086 1
$r_m(t_s)$	1	0,97083	0,96252 5	0,95661	0,95185 6	0,94425 7	0,93814 9	0,92838 7	0,92237 2

Таблица 3.3.24. Коэффициенты подобия $\bar{r}_e(t_s)$ и $r_m(t_s)$ при начальных деформациях 0,444 и 0,473.

t, час	0	2	4	6	8	12	16	24	30	40	48	60	66	72	91
$r_e(t_s)$	1	0,9 70 42 8	0,9 68 50 2	0,9 62 74 5	0,9 52 20 1	0,9 42 02 4	0,9 36 19 6	0,9 29 23 3	0,9 19 99 1	0,9 16 78 3	0,9 11 07	0,9 01 14 8	0,8 99 72 6	0,8 93 71 7	0, 88 89 89
$r_m(t_s)$	1	0,9 71 89 1	0,9 63 74 2	0,9 57 92 1	0,9 53 23 2	0,9 45 72 3	0,9 39 67 5	0,9 29 99	0,9 24 01 1	0,9 15 54 4	0,9 09 69 6	0,9 01 98 4	0,8 98 49 3	0,8 95 19 7	0, 88 57 85

На основе данных таблицы 3.3.20, 3.3.22, 3.3.23 и 3.3.24 по формуле (34) находим:

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma}_0^m(150^\circ\text{C}, 0,392) &= 26,49997 \text{ МПа;} \\
\bar{\sigma}_0^m(150^\circ\text{C}, 0,4068) &= 27,5 \text{ МПа;} \\
\bar{\sigma}_0^m(150^\circ\text{C}, 0,444) &= 30,04865 \text{ МПа;} \\
\bar{\sigma}_0^m(150^\circ\text{C}, 0,473) &= 31,94757 \text{ МПа.}
\end{aligned}
\tag{3.50}$$

С учетом (3.47), (3.48), (3.49) и (3.50) по формуле (3.35) вычисляем значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$. Они сведены в таблицу 3.3.25.

По данным таблиц 3.3.21 – 3.3.24 рассчитаны значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$ по формуле (3.35). Они приведены в таблице 3.3.25.

Таблица 3.3.25. Расчетные значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$

$\varepsilon, \%$	t, час	0	2	4	6	8	12	16	24	30	40	48	60	66	72	91
0,392	$\sigma_m(t, \varepsilon_1)$, МПа	26,5	25,69	25,51	25,39	25,29	25,14									
0,4068	$\sigma_m(t, \varepsilon_2)$, МПа	27,5	26,7	26,47	26,31	26,18	25,97	25,8	25,53	25,37						
0,444	$\sigma_m(t, \varepsilon_3)$, МПа	30,05	29,2	28,96	28,78	28,64	28,42	28,24	27,94	27,77	27,51	27,34	27,1	27	26,9	26,62
0,473	$\sigma_m(t, \varepsilon_4)$, МПа	31,95	31,05	30,79	30,6	30,45	30,21	30,02	29,71	29,52	29,25	29,06	28,82	28,70	28,6	28,3

Графики экспериментальных и расчетных кривых релаксаций напряжений по данным таблиц 3.3.21 и 3.3.25 показаны на рис. 3.3.5.

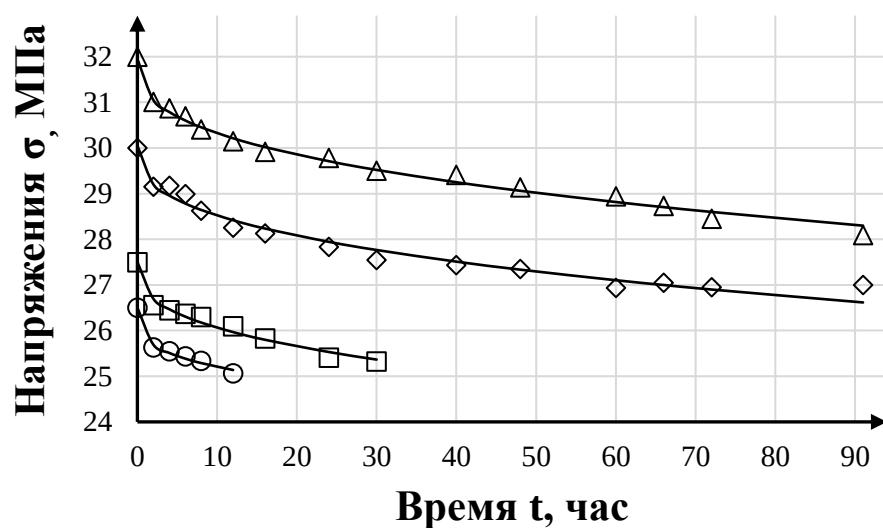


Рис. 3.3.5. Экспериментальные и расчетные кривые релаксаций дюралюмина при $T=150^\circ\text{C}$. Точки – эксперимент, линия – расчет, $\Delta - \varepsilon = 0,473\%$, $\diamond - \varepsilon = 0,444\%$, $\square - \varepsilon = 0,4068\%$, $\circ - \varepsilon = 0,392\%$.

МАТЕРИАЛ МЕДЬ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ $T = 165^{\circ}\text{C}$.

В работе [74] был проведен эксперимент на медь при температуре $T = 165^{\circ}\text{C}$ в длительности 1000 часов. Экспериментальные точки данного эксперимента приведены в таблице 3.3.26.

Таблица 3.3.26. Экспериментальные значения релаксация напряжений меди.

t, час	0	50	100	200	400	600	800	1000
$\sigma_e(t, \varepsilon)$, МПа	949	636,76	582,06	533,25	479,12	443,09	415,32	400

По данным таблицы 3.3.26 найденные коэффициенты подобия приведены в таблице 3.3.27.

Таблица 3.3.27. Коэффициенты подобия $r_e(t_s)$.

t, час	0	50	100	200	400	600	800	1000
$r_e(t_s)$	1	0,671	0,6133	0,5619	0,5049	0,4669	0,4376	0,4215

С помощью соотношения (3.30) и (3.31) находим:

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}(150^{\circ}\text{C}, 0,392) &= 0,815493; \\ \tilde{\delta}(150^{\circ}\text{C}, 0,392) &= 0,030141 \text{ ч}^{-0,184507},\end{aligned}\tag{3.51}$$

С учетом (3.33) вычисляем значения экспериментального реологического параметра релаксации $\tilde{r}_e(t_s)$. Они приведены в таблице 3.3.27.

Таблица 3.3.27. Коэффициенты подобия $\tilde{r}_e(t_s)$.

t, час	0	50	100	200	400	600	800	1000
$\tilde{r}_e(t_s)$	1	0,6638	0,6179	0,5658	0,5065	0,4682	0,4392	0,4157

На основе данных таблицы 3.3.25, 3.3.26 и 3.3.27 по формуле (3.34) находим:

$$\bar{\sigma}_0^m(165^{\circ}\text{C}) = 949,1314 \text{ МПа}.\tag{3.52}$$

С учетом (3.51) и (3.52) по формуле (3.35) вычисляем значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon_\xi)$. Они сведены в таблицу 3.3.28.

Таблица 3.3.28. Расчетные значения $\sigma_m(t, T, \varepsilon)$

t, час	0	50	100	200	400	600	800	1000
$\sigma_m(t, \varepsilon)$, МПа	949,13	630,02	586,48	537	480,78	444,39	416,88	394,51

Графики экспериментальных и расчетных кривых релаксаций напряжений по данным таблиц 3.3.26 и 3.3.28 показаны на рис. 3.3.6.

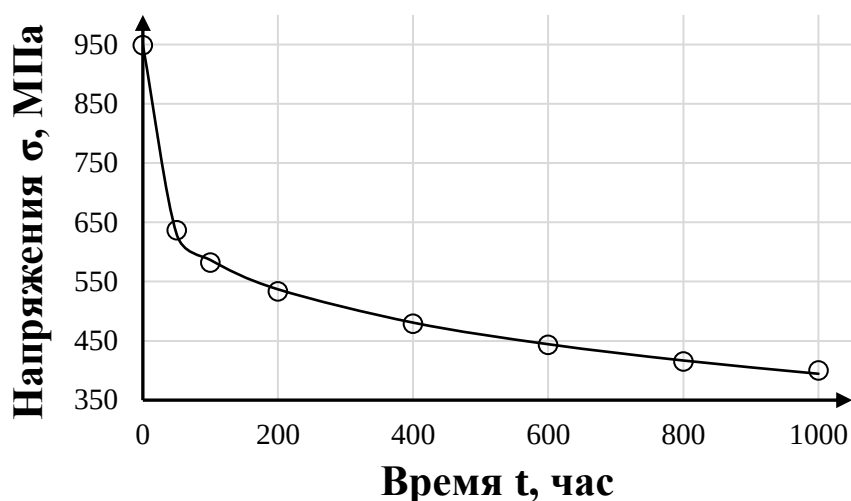


Рис. 3.3.6. Экспериментальные и расчетные кривые релаксаций меди при $T=165^{\circ}\text{C}$. Точки – эксперимент, линия – расчет.

Выводы. В данной главе описан критерий подобия кривых релаксации реономных материалов. Математически моделированы процессы релаксаций по описанному методу. Так же описаны критерии почти-подобия и не подобия кривых релаксации реономных материалов.

По вышеописанным алгоритмами и методами обработаны и рассчитаны экспериментальные данные материалов таких как, полиуретановая матрица с кристаллами соли и алюминиевым порошком, твердое топливо ракетных двигателей, полиоксиметилен, стеклопластик ТС 8/6-250, хромомолибденовая сталь 30ХМА, дюралюмин и медь.

Исследование общих закономерностей осредненных кривых релаксация напряжений различных материалов при различных деформациях и температурах. Разработать модель наследственного типа описания процесса релаксация напряжений реономных материалов.

Анализ осредненных кривых релаксация напряжений показывает, что существуют три типа семейств кривых:

- 1) Кривые релаксация напряжений подобны;
- 2) Кривые релаксация напряжений почти-подобны;
- 3) Кривые релаксация напряжений не подобны.

Разработана модель для моделирования этих процессов. Составлена компьютерная программа для определения коэффициентов модели.

Заключение

В данной диссертационной работе рассмотрено моделирование и исследование нелинейных реономных процессов при малых деформациях с использованием концепции перманентной памяти. Работа охватывает несколько ключевых направлений, включающих изучение ползучести и релаксации напряжений в асфальтобетоне и других реономных материалах.

Основные результаты исследования

1. Разработана модель для описания ускоренной ползучести до разрушения индивидуальных образцов стали X18NiOT при $T=850^{\circ}\text{C}$ без учета эффекта упрочнения.

2. Разработка математической модели. Разработана математическая модель, описывающая процессы ползучести и релаксации напряжений в реономных материалах, таких как асфальтобетон, полимербетон, графит и другие. Уравнения, основанные на концепции перманентной памяти, позволяют адекватно описывать нелинейное деформирование материалов при различных температурных режимах и скоростях нагружения. Это позволяет прогнозировать долговечность материалов, подвергаемых длительным механическим воздействиям.

3. Модель ускоренной ползучести асфальтобетона. Впервые для асфальтобетона была применена модель ускоренной ползучести на основе параметра поврежденности материала, описывающего развитие микроструктурных изменений в процессе длительного нагружения. Экспериментальные исследования подтвердили высокую точность предложенной модели при различных уровнях напряжений и температур. Были проведены испытания при различных режимах нагружения, включающих температурные колебания и механические воздействия, что позволяет делать выводы о поведении асфальтобетона в реальных эксплуатационных условиях.

4. Моделирование процессов релаксации напряжений. Для описания процессов релаксации напряжений предложено использование нелинейных интегральных уравнений Работнова, что позволило получить инвариантные кривые релаксации для различных температурных условий. Это позволяет более точно прогнозировать поведение материалов при длительных нагрузках. Впервые установлены зависимости между параметрами релаксации и характеристиками микроструктуры асфальтобетона, что открывает новые возможности для улучшения состава дорожных покрытий.

5. Анализ деформационных характеристик при изменении скорости нагружения. Проведен комплексный анализ деформационных характеристик асфальтобетона при различных скоростях нагружения. Установлено, что при увеличении скорости нагружения время до разрушения, деформация разрушения и удельная работа разрушения уменьшаются, а прочность асфальтобетона возрастает. Это свойство позволяет проектировать дорожные покрытия с учётом нагрузок от транспортных средств с разной массой и скоростью движения.

6. Построение зависимостей "напряжение—деформация". На основе экспериментальных данных были построены зависимости "напряжение—деформация" для асфальтобетона, которые в полной мере отражают особенности нелинейного деформирования и ускоренной ползучести. Эти зависимости позволяют более точно моделировать процессы разрушения асфальтобетона при различных температурных и силовых воздействиях. Были также разработаны графические зависимости, позволяющие наглядно оценить критические нагрузки и пределы прочности.

Научная новизна и практическая значимость

1. Была применена концепция перманентной памяти в моделировании процессов ползучести и релаксации напряжений асфальтобетона, что позволило более точно описать процессы накопления повреждений на микроуровне.

2. Разработанная модель ускоренной ползучести позволяет учитывать микроструктурные изменения в асфальтобетоне при длительных нагрузках, что имеет важное значение для проектирования долговечных дорожных покрытий. Модель позволяет рассчитывать сроки эксплуатации дорожных покрытий с учётом климатических условий и нагрузки от транспорта.

3. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации автомобильных дорог, где асфальтобетон подвергается длительному воздействию механических нагрузок и температурных колебаний. Это позволяет оптимизировать состав асфальтобетонных смесей для различных климатических зон.

4. Методология, предложенная в работе, применима для анализа деформационных процессов в других реономных материалах, включая полимербетон и графит, что расширяет область применения разработанных математических моделей. Данная методология может быть использована при строительстве аэродромных покрытий, мостов и высоконагруженных промышленных объектов.

Практическая применимость

1. Полученные модели и зависимости позволяют прогнозировать долговечность асфальтобетона и других реономных материалов при различных режимах нагружения. Это особенно важно при строительстве автодорог, мостов, аэродромных покрытий, которые подвержены длительным нагрузкам.

2. Результаты могут быть использованы в дорожном строительстве при выборе оптимальных параметров асфальтобетонных смесей и проектировании дорожных конструкций с учётом климатических условий и интенсивности движения. Предложенные модели могут служить основой для создания новых стандартов по испытаниям асфальтобетона.

3. Методики оценки ползучести и релаксации напряжений, предложенные в работе, могут быть внедрены в практику испытаний материалов для определения их прочностных характеристик. Это обеспечит более точный контроль за качеством дорожных покрытий на стадии строительства.

Рекомендации для дальнейших исследований

1. Развитие моделей, описывающих процессы деформирования реономных материалов при более сложных типах нагрузок, включая циклические и динамические воздействия.

2. Исследование влияния внешних факторов, таких как влажность и химическое воздействие, на ползучесть и релаксацию реономных материалов. Дополнительно рекомендуется изучить влияние ультрафиолетового излучения на прочностные характеристики асфальтобетона.

3. Модификация существующих моделей для описания процессов в асфальтобетонах различных марок и составов, используемых в различных климатических зонах. Это позволит расширить применение моделей на более широкий спектр строительных материалов.

4. Проведение долговременных экспериментов для уточнения параметров моделей и улучшения их прогностической точности. Такие эксперименты могут служить основой для разработки новых строительных норм и стандартов.

Общий вывод

Проведённое исследование показало эффективность использования концепции перманентной памяти и нелинейных интегральных уравнений для моделирования процессов ползучести и релаксации реономных материалов. Полученные модели и результаты открывают новые возможности для повышения долговечности и надёжности дорожных покрытий, что имеет большое значение для инфраструктурных проектов в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок. Разработанные методики могут стать основой для создания новых технологий в области дорожного строительства и проектирования инженерных конструкций.

Список использованных источников

1. Da Andrade E.N.C. //Proc. Roy. Soc. 1910. A. 84. P.1.
2. Da Andrade E.N.C. // Proc. Roy. Soc. 1914. A.90. P.329.
3. Работнов Ю.Н. О разрушении вследствие ползучести // ПМТФ, 1963. № 2. С. 113-123.
4. Нарисава И. Прочность полимерных материалов.: Москва.: 1987. 400 с.
5. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении // ПМТФ. 1980. № 3. С. 155-159.
6. Соснин О.В., Торшенов Н.Г. О ползучести и разрушении титанового сплава ОТ-4 при постоянной температуре // Проблемы прочности. 1970. № 5. С. 28-31.
7. Соснин О.В., Торшенов Н.Г. О ползучести и разрушении титанового сплава ОТ-4 в интервале температур 400-500 °С. // Проблемы прочности. 1972. № 7. С. 20-25.
8. Соснин О.В. Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности. Ползучесть и разрушение неупрочняющихся материалов. Сообщение 1. // Проблемы прочности. 1973. № 5. С. 45-49.
9. Соснин О.В., Шокало И.К. Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности. Сообщение 2. Ползучесть и разрушение материалов с начальным упрочнением. // Проблемы прочности. 1974. № 1. С. 43-48.
10. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. К обоснованию энергетического варианта теории ползучести. Сообщение 1. Основные гипотезы и их экспериментальная проверка. // Проблемы прочности. 1976. № 11. С. 3-8.
11. Teltayev B.B., A. Iskakbayev, F. Andriadi, K. Estayev, E. Suppes, A. Iskakbayeva. Experimental research of creep, recovery and fracture processes of asphalt concrete under tension. Proceedings of the 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (XXIVCTAM), 2016, Monreal, Canada.
12. Teltayev B.B., A. Iskakbayev, C. Oliviero Rossi. Regularities of creep and long-term strength of hot asphalt concrete under tensile. Functional Pavement Design. Proceedings of the 4th Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design. Cew 2016. 169-178.
13. Teltaeyev B.B., A.I. Iskakbayev, C. Oliviero Rossi. Deformation and strength of asphalt concrete under static and step loadings. Proceedings of the AIIT International congress on transport infrastructure and systems (TIS 2017), ROME, Italy, 10-12 April 2017. Transport infrastructure and systems. 2017. - pp. 3-8.
14. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения.: Москва. Наука. 1987. 80 с.
15. Работнов Ю.Н. Влияние концентрации напряжений на длительную прочность. // Инж.ж. МТТ. 1967. № 3. С. 36-41.
16. Болотин В.В. Трещиностойкость материалов и континуальная механика

- повреждений. // Доклады РАН. 2001. Том 376. № 6. С. 760-762.
17. Ботвина Л.Р., Баренблатт Г.И. Автомоделность накопления повреждаемости. // Проблемы прочности. 1985. № 12. С. 17-24.
18. Talreja R., Singh C.V. Damage and failure of composite materials. Cambridge. 2012.
19. Syn C.M., Yuukir R., Kitagawa H. // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1985. V. 8. N 2. P. 193-203.
20. Kachanov L.M. Introduction to continuum damage mechanics. Dordrecht; Boston: Martinus Nijhoff, 1986.
21. Степанова Л.В., Игонин С.А. Параметр поврежденности Ю.Н. Работнова и описание длительного разрушения: результаты, современное состояние, приложение к механике трещин и перспективы. // ПМТФ. 2015. Т. 56. № 2. С. 133-145.
22. Мельников Г.П., Шестериков С.А. Описание процесса ползучести и длительной прочности при простом растяжении // Вестник Московского университета. Серия I. Математика, механика. 1972. № 2. С. 91-96.
23. Бойцов Ю.И., Данилов В.Л., Локощенко А.М., Шестериков С.А. Исследование ползучести металлов при растяжении. Москва.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1997. 99 с.
24. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М. Физматлит. 2016. 504 с.
25. ST RK 1225-2019, Road, airfield asphalt concrete mixtures and asphalt concrete. Technical specifications, Astana, 2019.
26. A.I. Iskakbayev, B.B. Teltayev, K.Z. Yestayev, B.D. Abu, Long-term strength of asphalt concrete and its applications, Constr. Build. Mater. 244 (2020) 1-11.
27. A.I. Iskakbayev, B.B. Teltayev, C.O. Rossi, Steady-state creep of asphalt concrete, Appl. Sci. 7 (2017) 1-13.
28. ST RK 1373-2003, Bitumens and bitumen binders. Oil road viscous bitumens. Technical specifications, Astana, 2013.
29. Performance graded asphalt binder specification and testing, Superpave Series No. 1 (SP-1), third ed., Asphalt Institute Inc., 2003.
30. B.B. Teltayev, E.D. Amirbayev, B.S. Radovskiy, Viscoelastic characteristics of blown bitumen at low temperatures, Constr. Build. Mater. 189 (2018) 54-61.
31. B.B. Teltayev, A.I. Iskakbayev, F.K. Andriadi, Patent of the Republic of Kazakhstan for invention. No. 33244. Device for determining the mechanical characteristics of materials under tension, Astana, 2018.
32. T.G. Fox, S. Gratch, S. Loshaek, Viscosity relationship for polymers in bulk and concentrated solutions, in: F.R. Eirich (Ed.), Rheology. Theory and applications. Volume 1, Academic Press Inc., New York, 1956, pp. 431-492.
33. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final document, Transportation Research Board. Washington D.C., 2004.
34. SN RK 3.03-19-2006, Flexible pavement design, Astana, 2006.
35. B.B. Teltayev, A.I. Iskakbayev, C.O. Rossi, B.D. Abu, Unsteady-state creep of

- an asphalt concrete, Appl. Sci. 2022, 12
36. Hoff N.J. The necking and the rupture of rods subjected to constant tensile loads// Journal of Applied Mechanics. 1953.V.20. №1. P. 105-108.
37. Monkman F.C. Grant N.J., "An Empirical Relationship Between Rupture Life and Minimum Creep Rate in Creep Rupture Tests", Proceedings ASTM Vol. 56, 1956, pp. 593-605.
38. Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 360 с.
39. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука. 1966. 752 с.
40. Стрижало В.А. О критерии подобия ползучести металлов. Проблемы прочности. 1984. №10. С. 9-11.
41. Ле Мей. «Развитие параметрических методов обработки результатов испытаний на ползучесть и длительную прочность». Теоретические основы. 1979, т. 101, №4
42. А.М. Локощенко. Новый метод измерения поврежденности металлов при ползучести. Механика твердого тела. 2005, №5, стр.108-121
43. Работнов Ю.Н. Некоторые вопросы теории ползучести // Вестник МГУ - 1948, №10. - С. 81-91
44. Работнов Ю.Н. Расчет деталей машин на ползучесть // Изв. АН СССР, ОТН. - 1948, № 6. - С. 789-800.
45. Goldhoff R.M. The application of Rabotnov's creep parameter, Proc. ASTM, т. 61, 1961, С. 907-919
46. Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. Некоторые результаты экспериментального исследования кратковременной ползучести при одноосном растяжении // ПМТФ. -1966 - №5. - С. 148-160
47. Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. Кратковременная ползучесть. - М.: Наука, 1970. - 222 с.
48. Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г. Экспериментальная проверка гипотезы существования термомеханической поверхности в теории термопластичности. - В кн.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 13. К., "Наукова думка", 1973, - С. 43-47
49. Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г. Экспериментальное исследование зависимости между напряжением и деформацией при произвольном процессе нагружения и нагрева в случае одномерного напряженного состояния. - В кн.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 16. К., "Наукова думка", 1976, - С. 81-85
50. Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г. Проверка гипотезы существования термомеханической поверхности в теории термопластичности при переменных нагружениях и нагреве. - В кн.: Прочность материалов и конструкций. К., "Наукова думка", 1975, - С. 201-208
51. Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г. Определение функциональной зависимости между напряжением, деформацией и температурой при одноосном нагружении на основе нелинейной теории наследственной среды //

- Проблемы прочности. - 1977, №2, - С. 33-36
- 52.Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Степанычев Е.И. Приложение нелинейной теории наследственности к описанию временных эффектов в полимерных материалах // Механика полимеров. -1971, №1, - С. 74-87
- 53.Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Степанычев Е.И. Нелинейная ползучесть стеклопластика ТС 8/3-250 // Механика полимеров. - 1971, №3. - С. 391-397
- 54.Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Степанычев Е.И. О связи характеристик ползучести стеклопластиков с кривой мгновенного деформирования //Механика полимеров. - 1971, №4. - С. 624-628
- 55.Работнов Ю.Н., Дергунов Н.Н., Паперник Л.Х. Анализ поведения графита на основе нелинейной наследственной теории // ПМТФ. -1971, №2. - С. 76-82
- 56.Суворова Ю.В., Викторова И.В., Машинская Г.П., Финогенов Г.Н., Васильев А.Е. Исследование поведения органопласта при различных режимах нагружения и температур // Машиноведение. - 1980, №2, - С. 67-71
- 57.Суворова Ю.В., Алексеева С.И. Инженерные приложения модели наследственного типа к описанию нелинейного поведения полимеров и композитов с полимерной матрицей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2000, №5, Т. 66, С. 47-51
- 58.Суворова Ю.В. О нелинейно-наследственном уравнении Ю.Н.Работнова и его приложениях // Известия РАН, МТТ - 2004, №1. - С. 174-181
- 59.Хохлов А.В. Свойства семейства диаграмм деформирования, порождаемых нелинейным соотношением Работнова для реономных материалов // Известия РАН, МТТ, - 2019, №2, С. 29-47
- 60.Iskakbayev A., Teltayev B., Rossi C.O., Yensebayeva G. Determination of nonlinear creep parameters for hereditary materials. Applied Sciences. 2018, p. 1-17.
- 61.A. I. Iskakbayev, B. B. Teltayev, G.M. Yensebayeva, K.S. Kutimov. Computer Modeling Of Creep For Hereditary Materials By Abel's Kernel. News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and technical sciences 6(432), 2018. P. 66-76.
- 62.Maksimov R.D., Jirgens L., Jansons J., Plume E. Mechanical properties of polyester polymer-concrete, Mechanics of Composite Materials, Volume 35, №2, 1999, - P. 99-110.
- 63.Maksimov R.D., Plume E. Long-term creep of hybrid aramid/glass-fiber-reinforced plastics, Mechanics of Composite Materials, Volume 37, №4, 2001, - P. 271-280.
- 64.Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Звонов Е.Н. Таблицы дробно-экспоненциальной функции отрицательных параметров и интеграла от нее. Изд-во "Наука", 1969, - 132 с.
- 65.Iskakbayev A.I., Teltayev B.B., Yensebayeva G.M., Kutimov K.S.. Computer modeling of creep for hereditary materials by Abel's kernel. NEWS of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and

- Technical Sciences. 6. 2018. P. 66-76.
- Iskakbayev A., Teltayev B.B., Rossi C.O., Yensebayeva G.M., Abu B, Kutimov K.S. Impact of loading rate on asphalt concrete deformation and failure. Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 100 (8). Article No. 10008. ISSN 2712-8172. DOI: 10.18720/MCE.100.8
- 66.Р. Кристенсен. Введение в теорию вязкоупругости. Издательство: «МИР». Москва, 1974. Стр. 69-72.
- 67.В.В. Москвитин. Сопротивление вязкоупругих материалов. Применительно к зарядам ракетных двигателей на твердом топливе. Москва, Наука, 1972.
- 68.В.В. Москвитин. Сопротивление вязко-упругих материалов. Применительно к зарядам ракетных двигателей на твердом топливе. Издательство: «Наука», Москва, 1972.
- 69.Ю.В. Суворова, С.И. Алексеева. Инженерные приложения модели наследственного типа к описанию нелинейного поведения полимеров и композитов с полимерной матрицей. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. № 5. Том 66. 2000. Стр. 47-51.
- 70.Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Степанычев Е.И. Приложение нелинейной теории наследственности к описанию временных эффектов в полимерных материалах. Механика полимеров. 1971. № 1, с. 74-87.
- 71.Ю.В. Суворова, С.И. Алексеева. Инженерные приложения нелинейно-наследственной модели с учетом температуры. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. № 6. Том 66. 2000. Стр. 48-52.
- 72.В.И.Даниловская, Г.М.Иванова, Ю.Н.Работнов, Ползучесть и релаксация хромомолибденовой стали. Известия академии наук СССР ОТН. №5. 1955. Стр. 102-108.
- 73.В.С. Наместников, А.А. Хвастунков. Ползучесть дюралюмина при постоянных переменных нагрузках. ПМТФ, № 4. 1960. Стр. 90-95.

Приложение 1

Табличные данные нержавеющей стали X18NiOT при температуре 850°C

$\sigma=40$ МПа

t, ч	0	4	8	12	16	30	40	50	54
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,002243	0,00504 6	0,00836 1	0,012993	0,04060 7	0,07546		
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,003035 1	0,00626 6	0,00973 1	0,001348 7	0,03059 4	0,067		
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,005533	0,00872 9	0,01118 8	0,015246	0,04643 3	0,08779 1		
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,004349	0,00897 8	0,01394 3	0,019324	0,05216 3	0,096		
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,004382	0,00983	0,01255 4	0,019498	0,04549 9	0,06784 1	0,10667 5	0,12821 6
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,003996	0,00817 4	0,01256 2	0,017191	0,03601 1	0,05374 4	0,08182 0	0,1204
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,004213	0,00752 2	0,01008	0,015948	0,03971 9	0,05797 8	0,07689	0,08501 6
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,003063	0,00626 7	0,00963 1	0,013179	0,02760 8	0,04120 4	0,06272 9	0,092
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,004062	0,00646 9	0,01098 3	0,015045	0,0334	0,05	0,07312 2	0,08449 9
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,003196	0,00653 9	0,01005 0	0,013752	0,02880 9	0,04299 5	0,06545 6	0,096

$\sigma=50$ МПа

t, ч	0	2	4	8	12	16	18
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0049	0,0083	0,0226	0,0398	0,0592	0,0814
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0041	0,0085	0,0186	0,0312	0,0504	0,0814

t, ч	0	4	8	11	15	19	21
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0078	0,0176	0,0271	0,0451	0,0706	0,1094
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0081	0,0173	0,0253	0,0386	0,0587	0,0910

t, ч	0	4	8	12	15	19	21
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0074	0,0171	0,0296	0,0439	0,0704	0,0998
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,008	0,0171	0,028	0,0381	0,058	0,09001

t, ч	0	4	8	12	17	21	24
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0075	0,0167	0,0294	0,0534	0,0814	0,1325
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0077	0,0163	0,0263	0,0418	0,0599	0,1

t, ч	0	4	8	12	19	23	30
------	---	---	---	----	----	----	----

$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0076	0,0165	0,0267	0,0574	0,0833	0,1223
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0073	0,0153	0,0242	0,0428	0,05671	0,12

t, ч	0	4	8	12	18	24	29
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0049	0,0112	0,0183	0,0324	0,0549	0,0803
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0051	0,0106	0,0168	0,0278	0,0431	0,08

$\sigma=60$ МПа

t, ч	0	1	3	4	6	6,5
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,005	0,0136	0,0202	0,043	0,0677
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0048	0,0161	0,0232	0,0458	0,0677

t, ч	0	4	8	12	16	20
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,013	0,0269	0,05	0,0899	0,1683
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0150	0,0322	0,0531	0,0812	0,16

t, ч	0	4	8	10	12	15
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0074	0,0235	0,0336	0,0471	0,0725
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,008	0,0179	0,0241	0,032	0,063

t, ч	0	4	7	11	16	20,2
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0074	0,0155	0,0309	0,057	0,0931
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0083	0,0154	0,0263	0,0449	0,09

t, ч	0	2	6	10	12	16
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0052	0,0136	0,0252	0,0316	0,05
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0034	0,0112	0,0210	0,0274	0,06

$\sigma=80$ МПа

t, ч	0	1	2	4	5	6
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,003	0,0096	0,037	0,0627	0,1158
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,0069	0,0147	0,0345	0,0491	0,09

t, ч	0	1	2	4	5,4	6
$\varepsilon_e^c(t)$	0	0,0105	0,0221	0,06	0,1	0,13
$\varepsilon_m^c(t)$	0	0,01	0,0212	0,0498	0,0828	0,13

Приложение 2

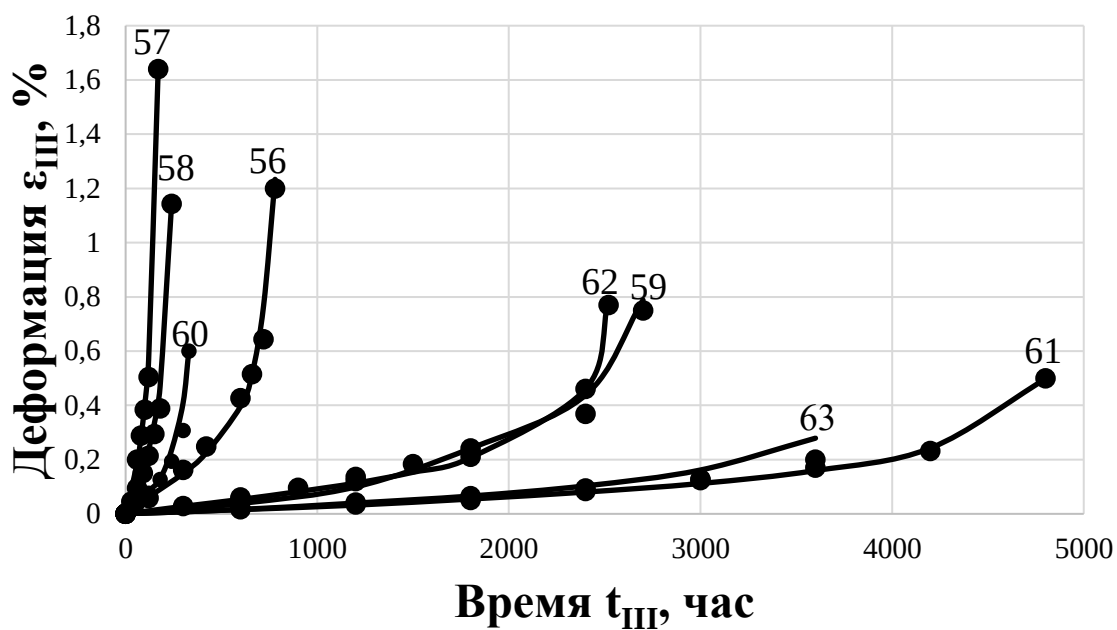


Рисунок 1. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,0081$ МПа. $T = 60^\circ\text{C}$
 •эксперимент, — аппроксимация

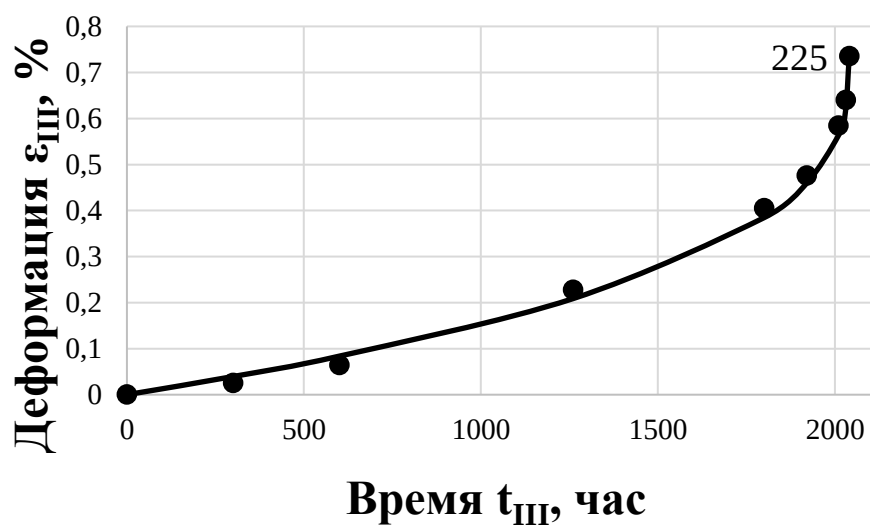


Рисунок 2. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,0083$ МПа. $T = 48^\circ\text{C}$
 •эксперимент, — аппроксимация

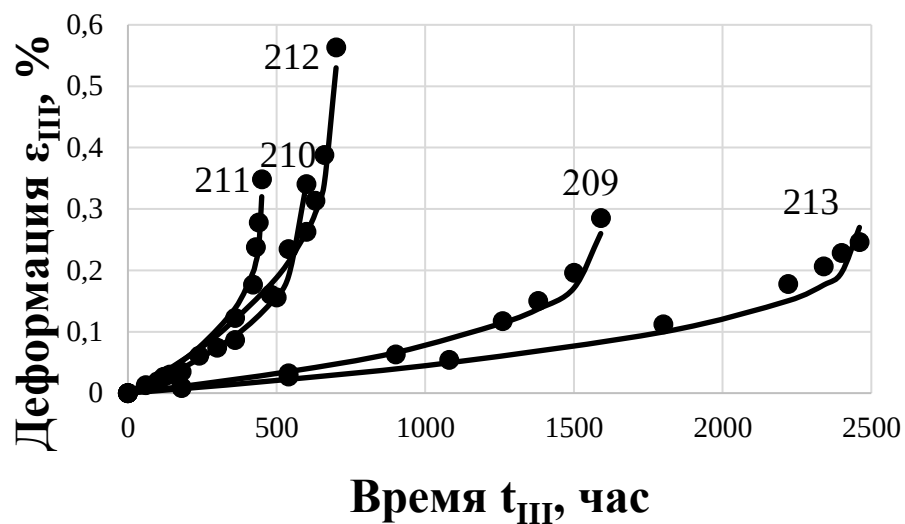


Рисунок 3. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,0192$ МПа. $T = 48^\circ\text{C}$
 •эксперимент, — аппроксимация

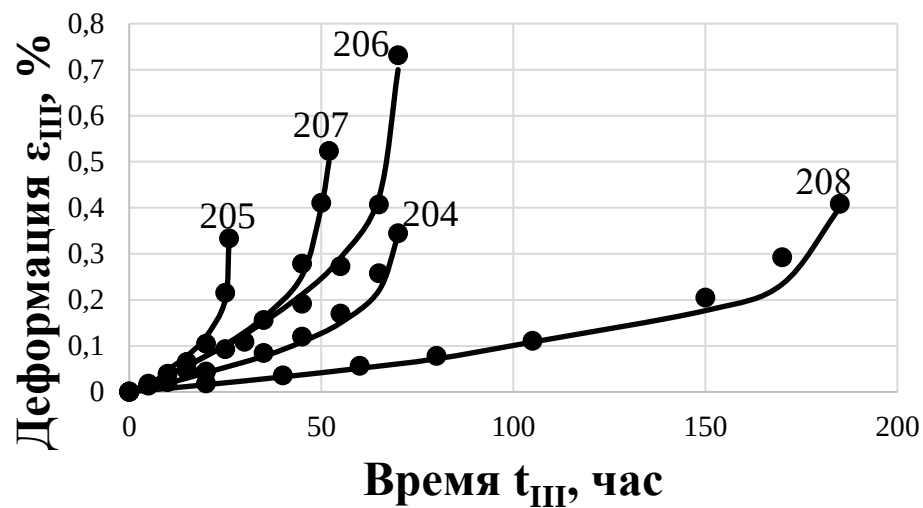


Рисунок 4. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,0416$ МПа. $T = 48^\circ\text{C}$
 •эксперимент, — аппроксимация

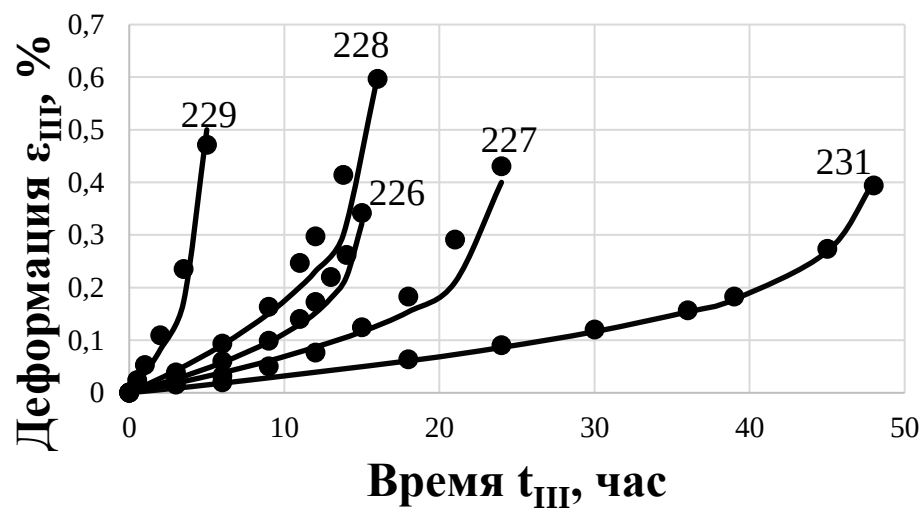


Рисунок 5. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,0546$ МПа. $T = 48^\circ\text{C}$

•эксперимент, — аппроксимация

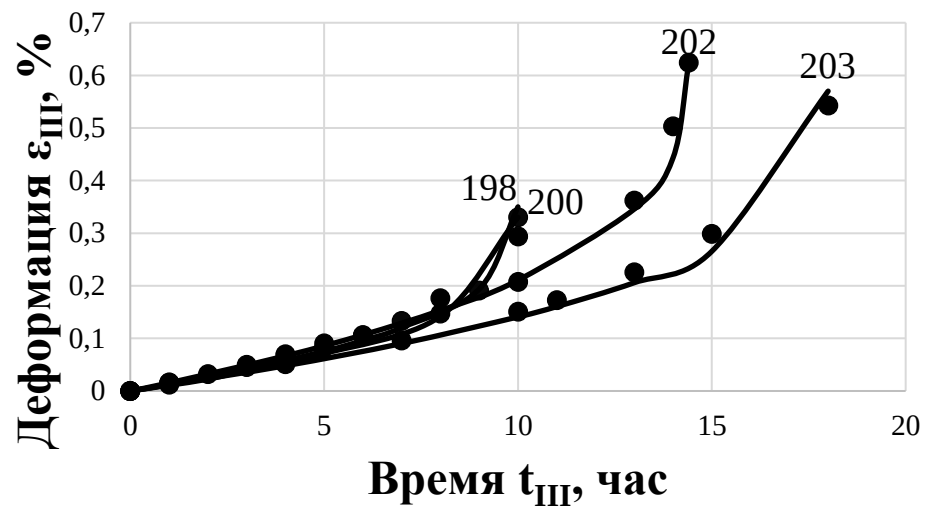


Рисунок 6. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,074$ МПа. $T=48^\circ\text{C}$

•эксперимент, — аппроксимация

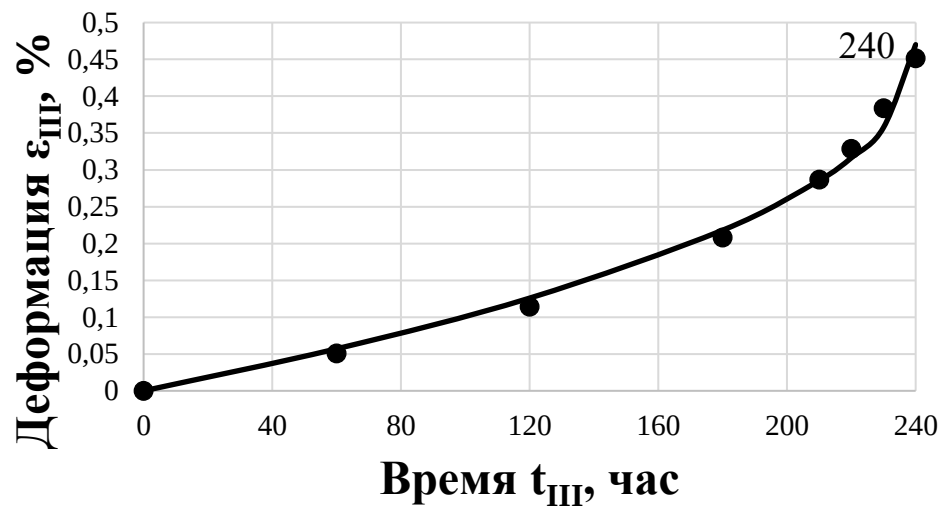


Рисунок 7. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,0412$ МПа. $T=36^\circ\text{C}$

•эксперимент, — аппроксимация

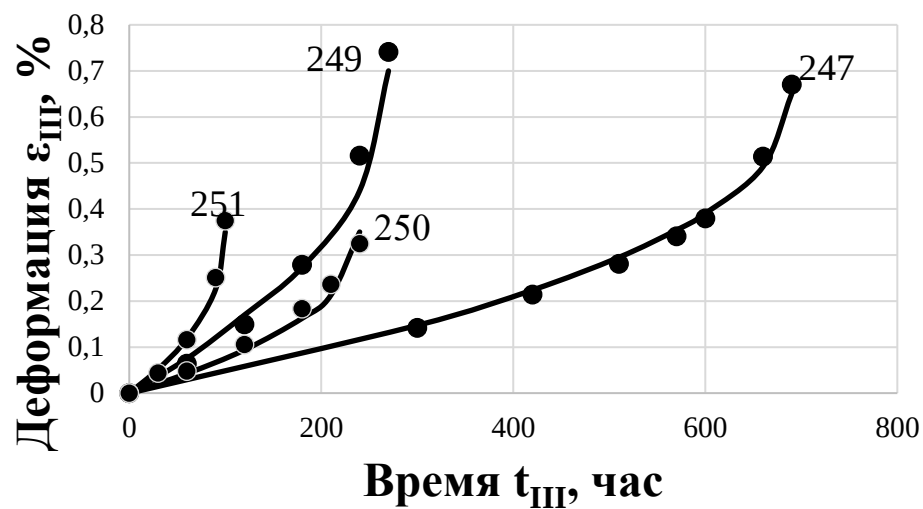


Рисунок 8. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,0548$ МПа. $T = 36^\circ\text{C}$
 •эксперимент, — аппроксимация

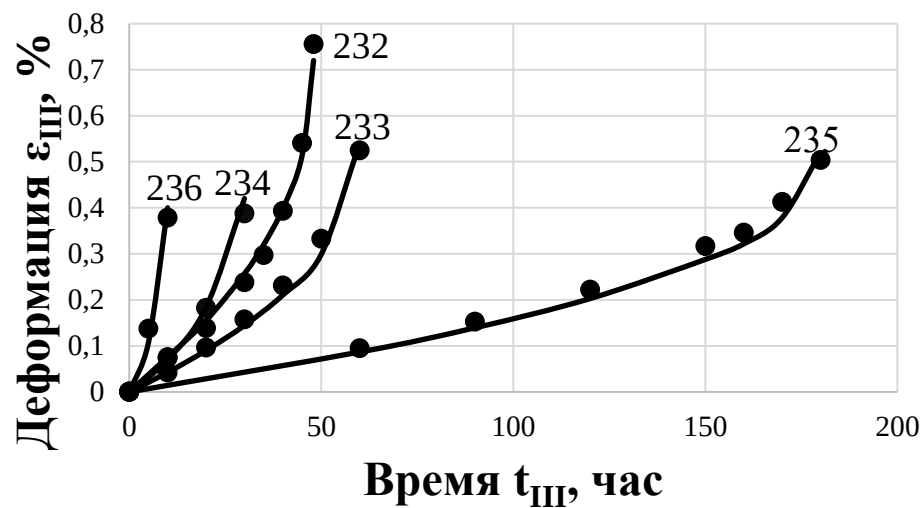


Рисунок 9. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,0756$ МПа. $T = 36^\circ\text{C}$
 •эксперимент, — аппроксимация

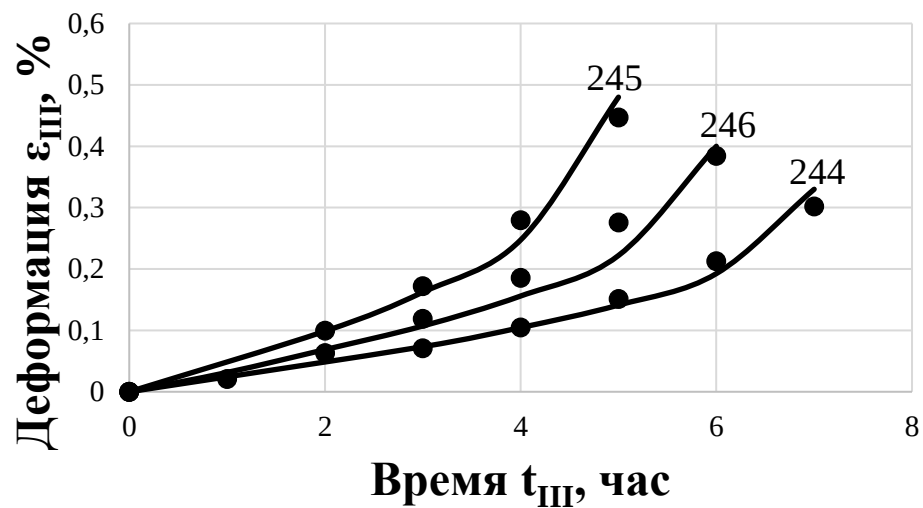


Рисунок 10. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,1136$ МПа. $T=36^\circ\text{C}$

•эксперимент, — аппроксимация

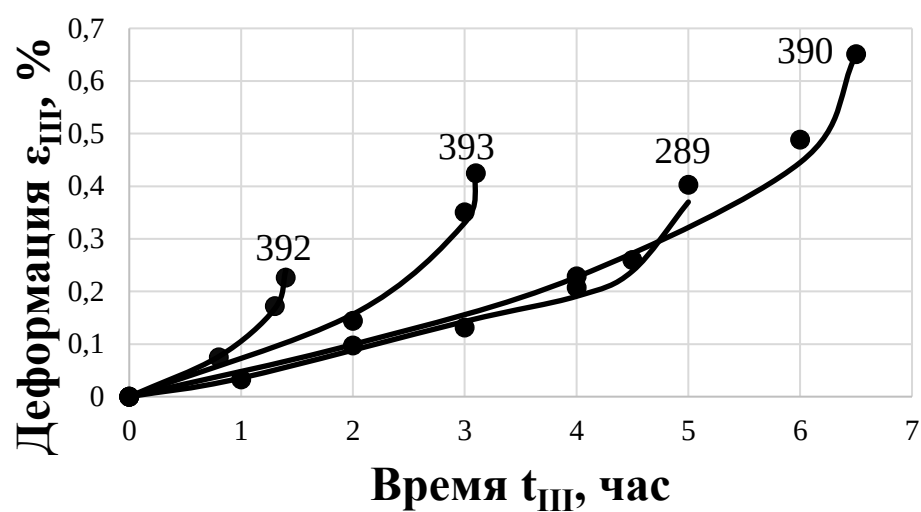


Рисунок 11. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,146$ МПа. $T=36^\circ\text{C}$

•эксперимент, — аппроксимация

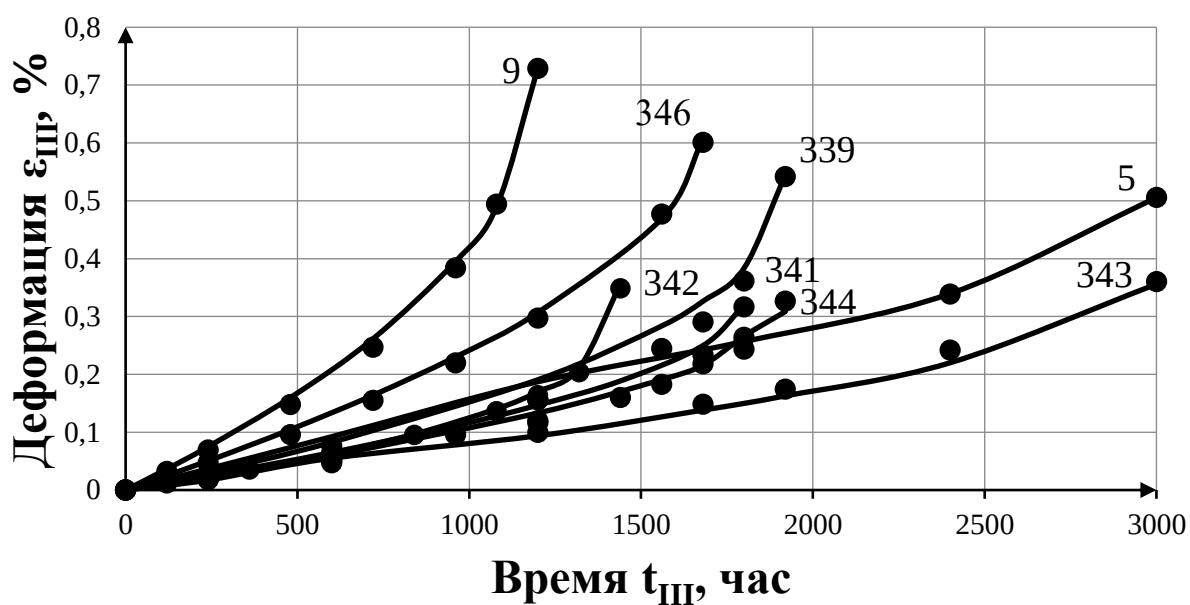


Рисунок 12. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,084$ МПа. $T=24^\circ\text{C}$

•эксперимент, — аппроксимация

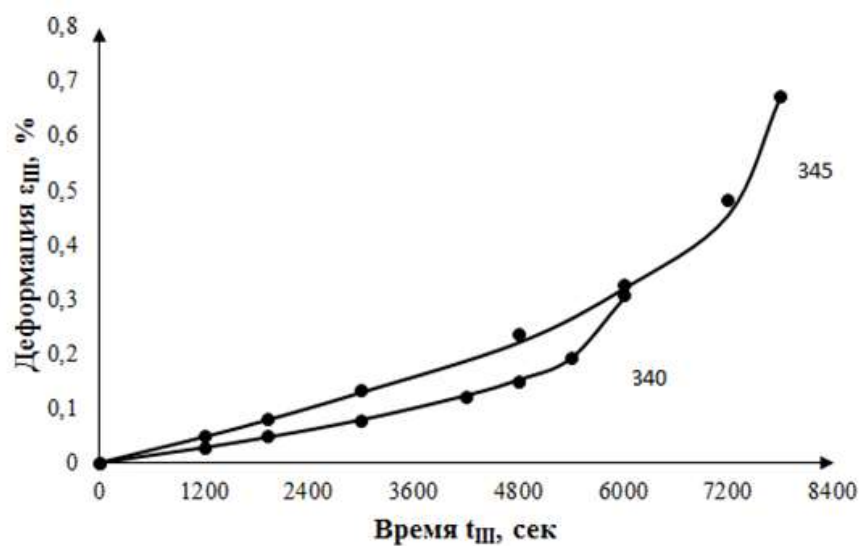


Рисунок 13. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,084$ МПа. $T = 24^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

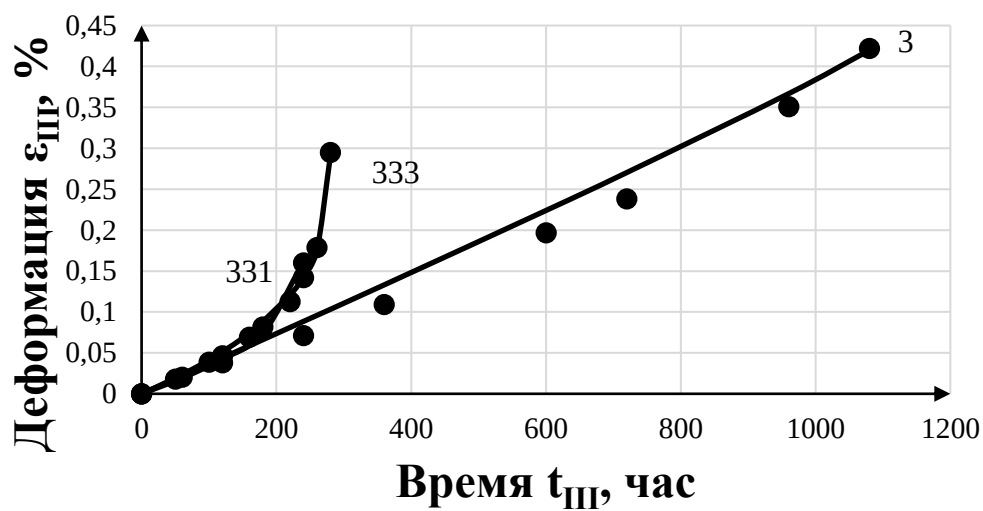


Рисунок 14. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,117$ МПа, $T = 24^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

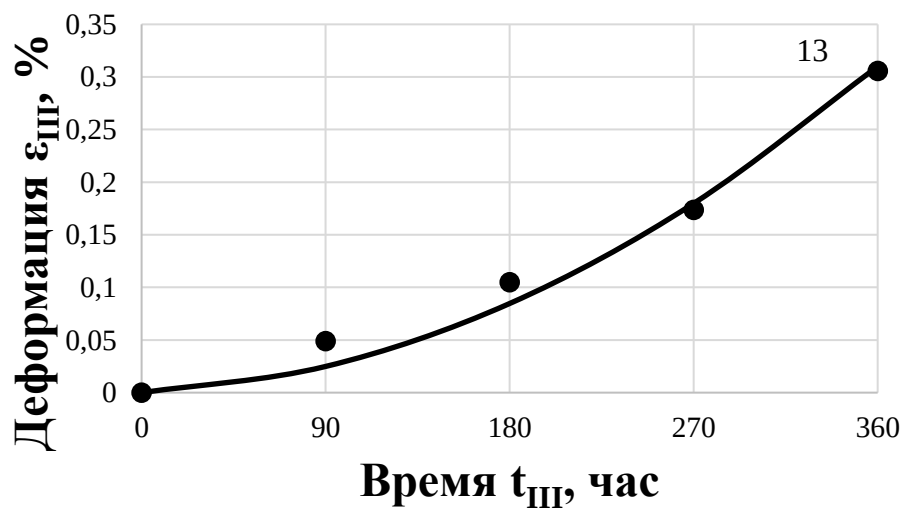


Рисунок 15. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,135$ МПа, $T=24^\circ\text{C}$

•эксперимент — аппроксимация

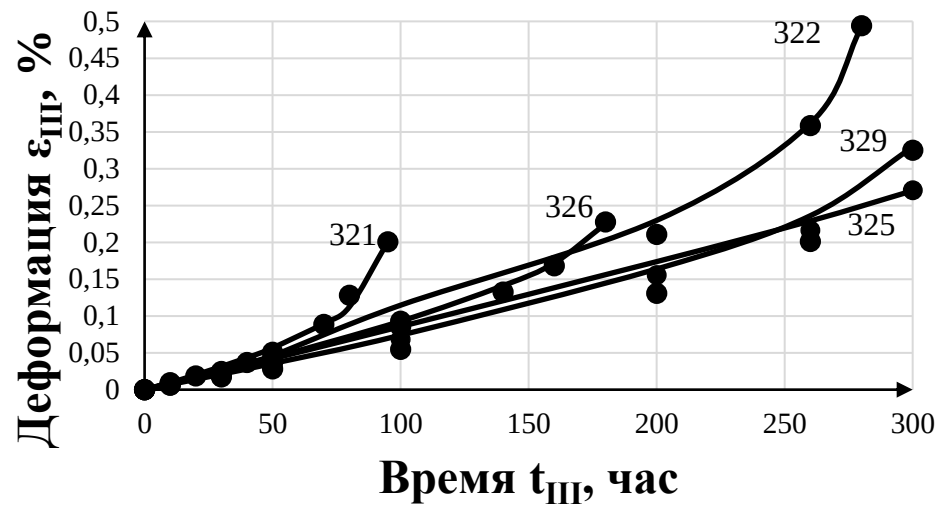


Рисунок 16. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,1566$ МПа, $T=24^\circ\text{C}$

•эксперимент — аппроксимация

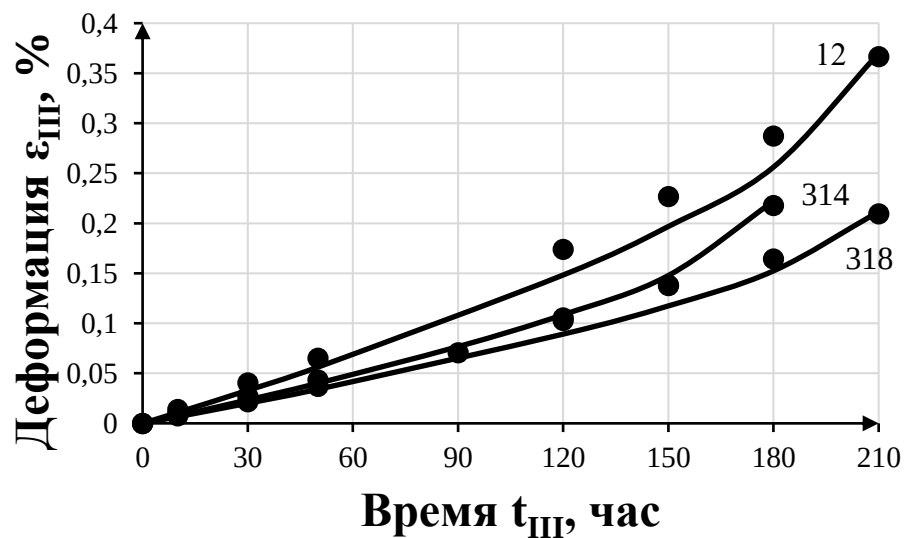


Рисунок 17. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,1852$ МПа, $T=24^\circ\text{C}$

•эксперимент — аппроксимация

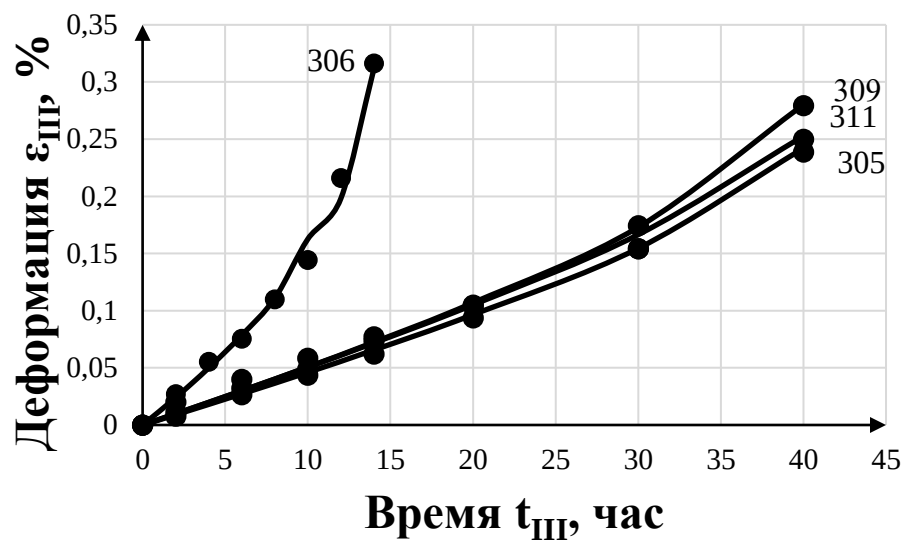


Рисунок 18. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,2323$ МПа, $T=24^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

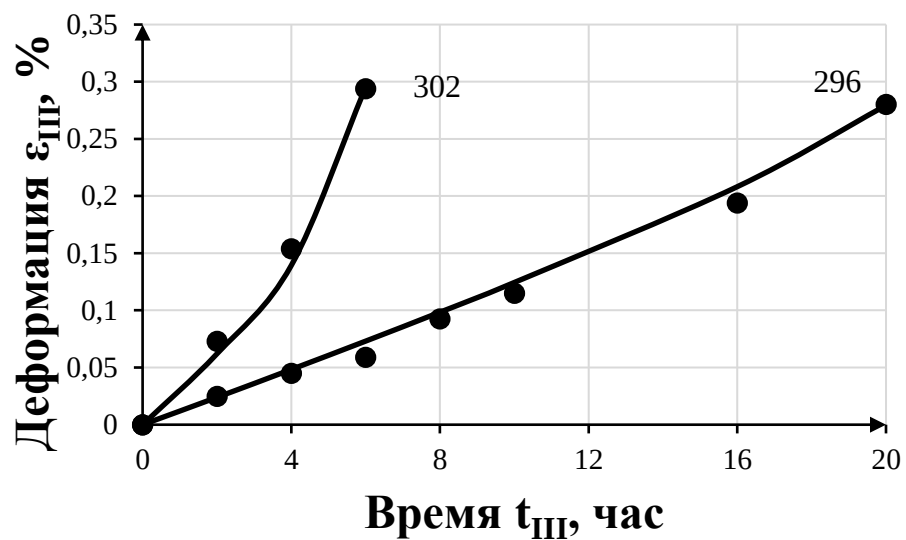


Рисунок 19. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,3053$ МПа, $T=24^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

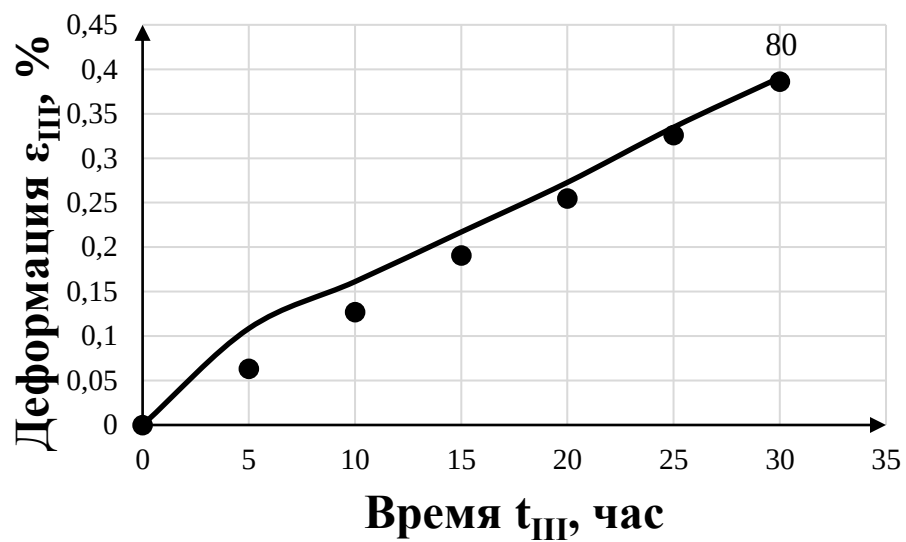


Рисунок 20. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,463$ МПа, $T=24^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

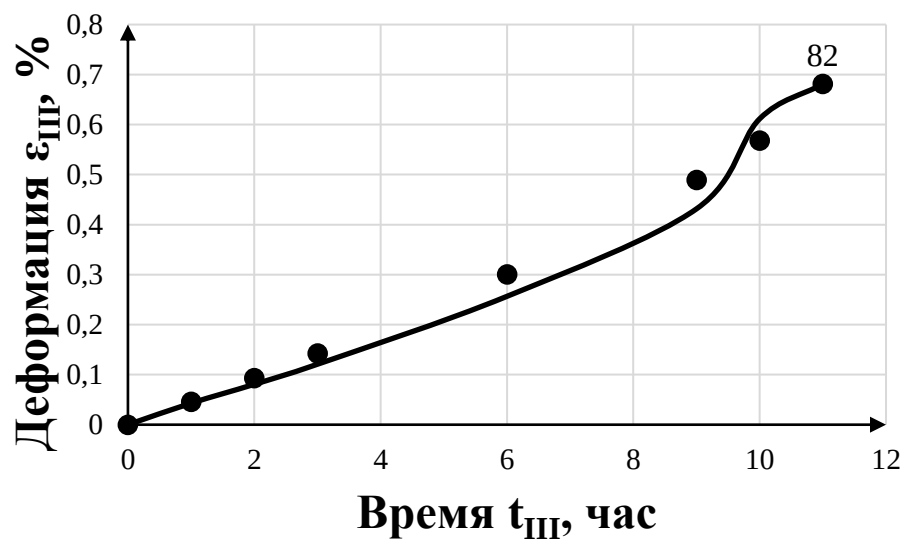


Рисунок 21. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,557$ МПа, $T=24^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

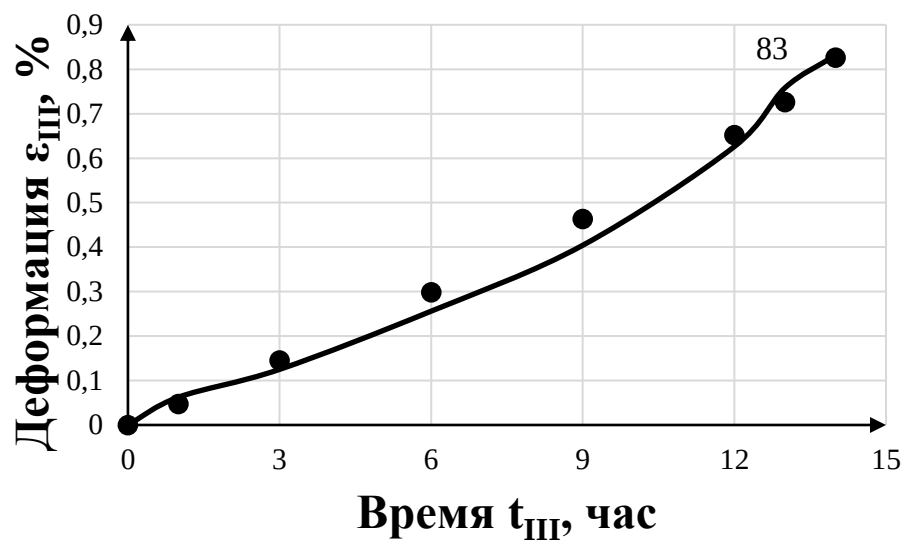


Рисунок 22. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,596$ МПа, $T=24^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

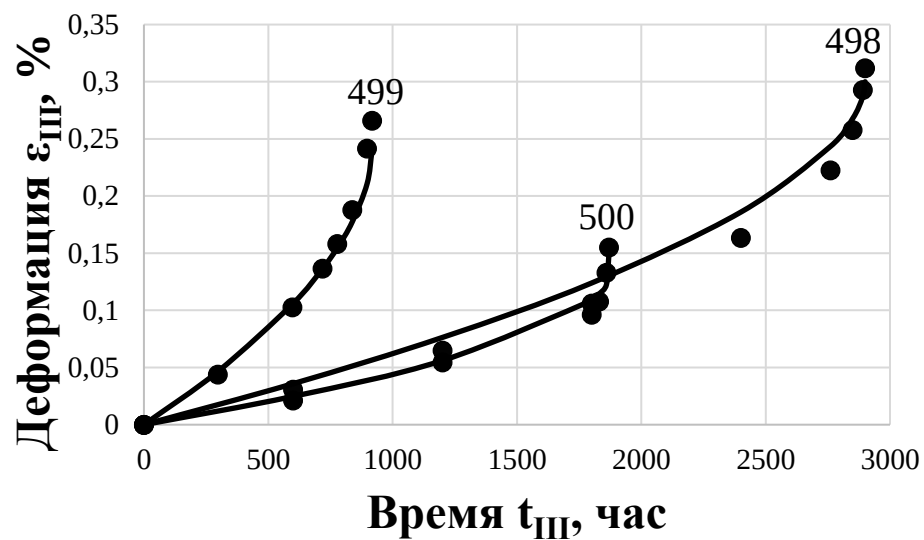


Рисунок 23. Кривые ползучести. $\sigma_0=0,3$ МПа. $T=12^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

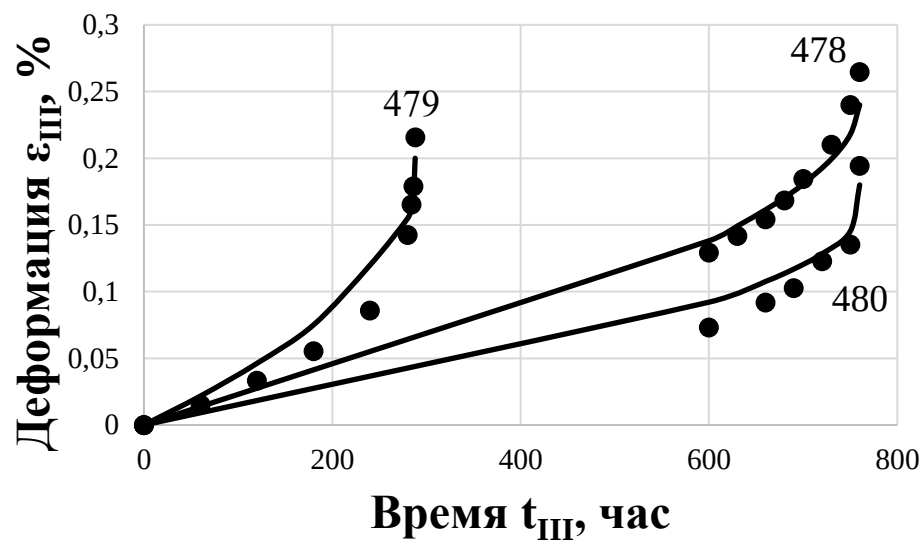


Рисунок 24. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,4$ МПа. $T = 12^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

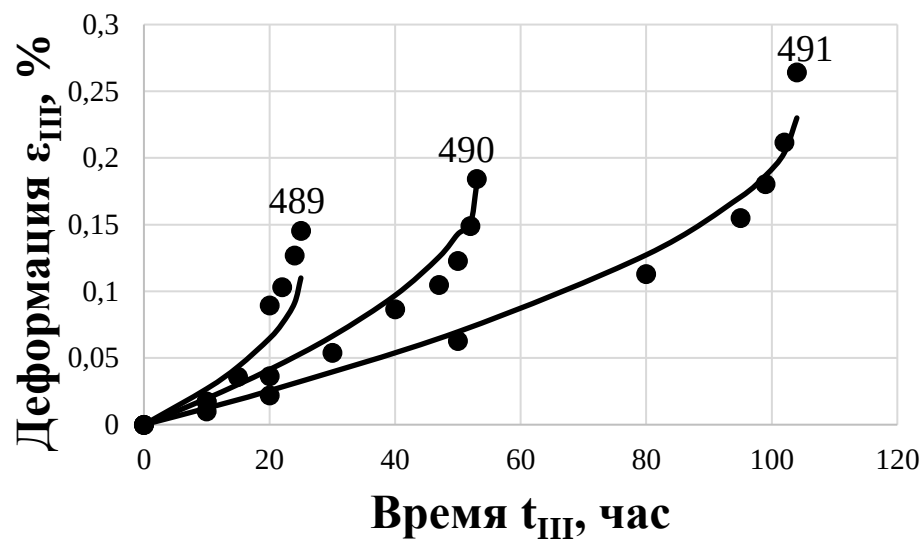


Рисунок 25. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,6$ МПа. $T = 12^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

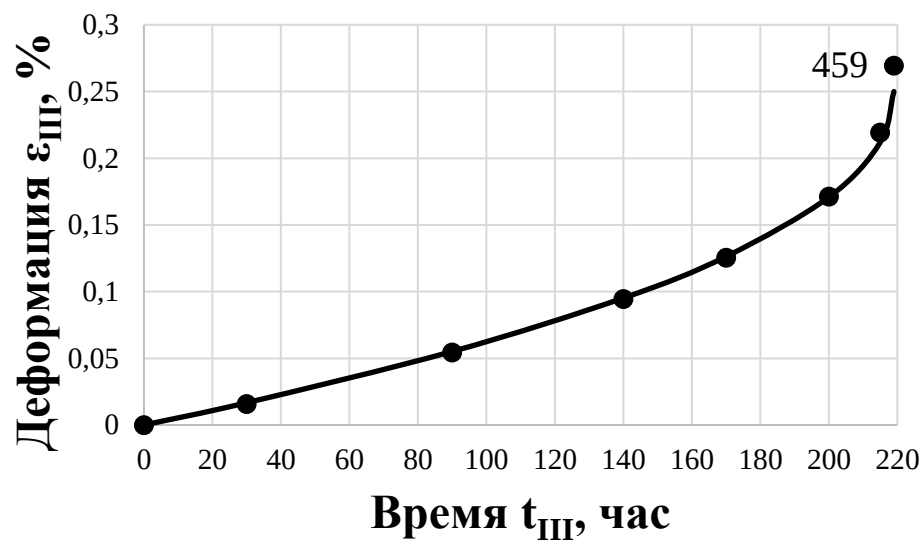


Рисунок 26. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,75$ МПа. $T = 0^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

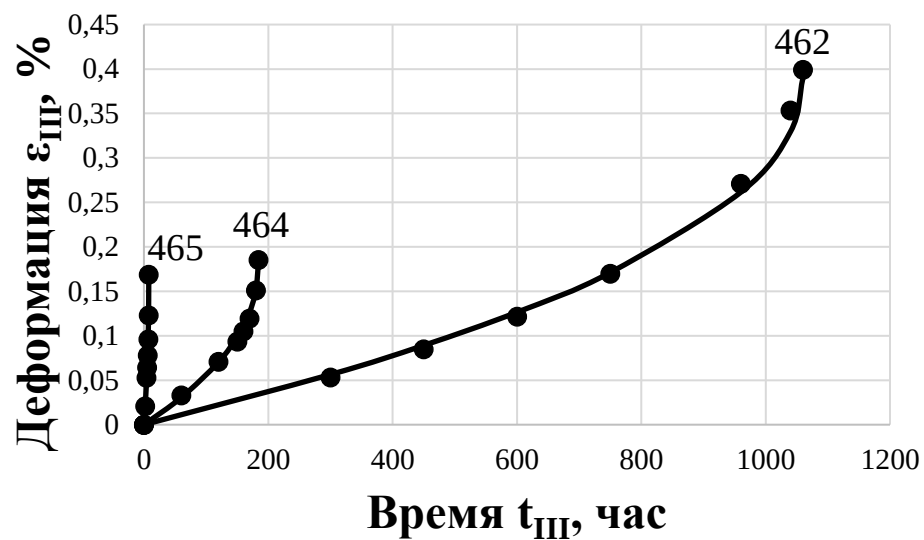


Рисунок 27. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1$ МПа. $T = 0^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

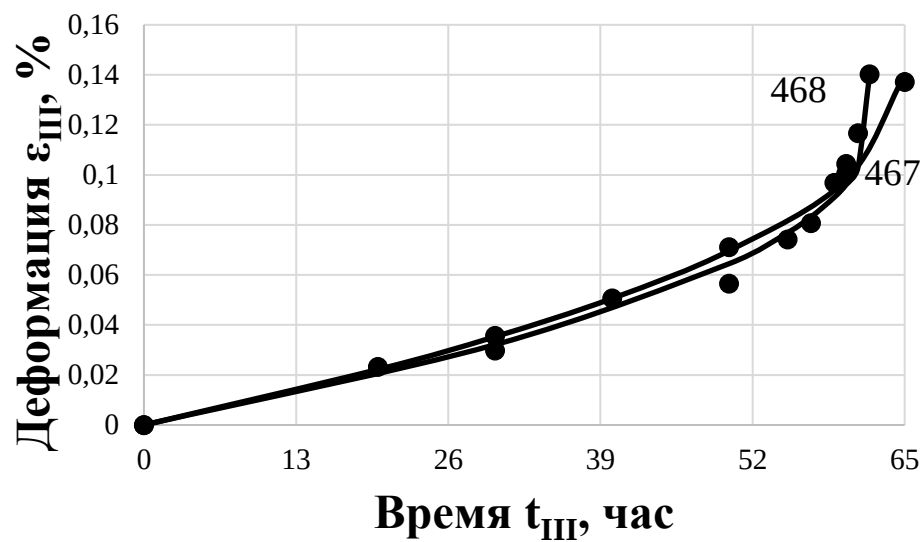


Рисунок 28. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1,2$ МПа. $T = 0^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

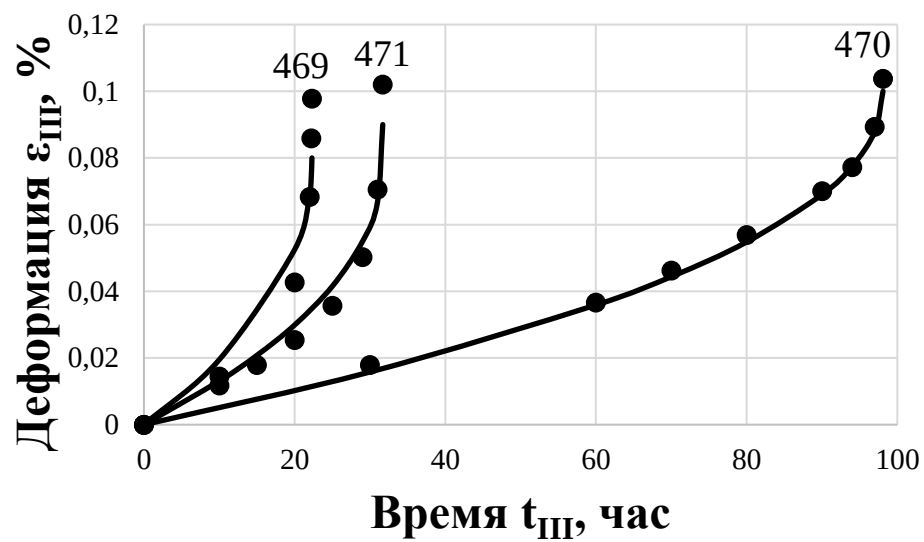


Рисунок 29. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1,5$ МПа. $T = 0^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

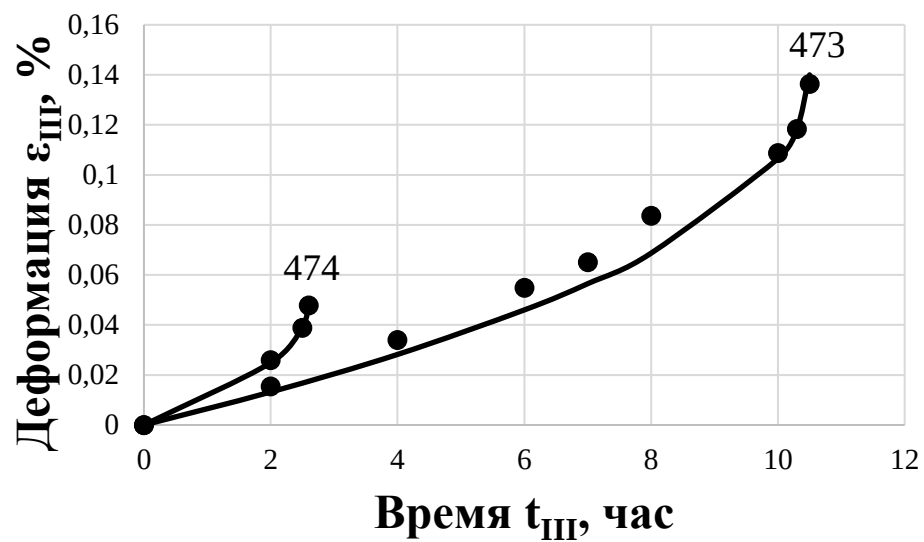


Рисунок 30. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 2$ МПа. $T = 0^{\circ}\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

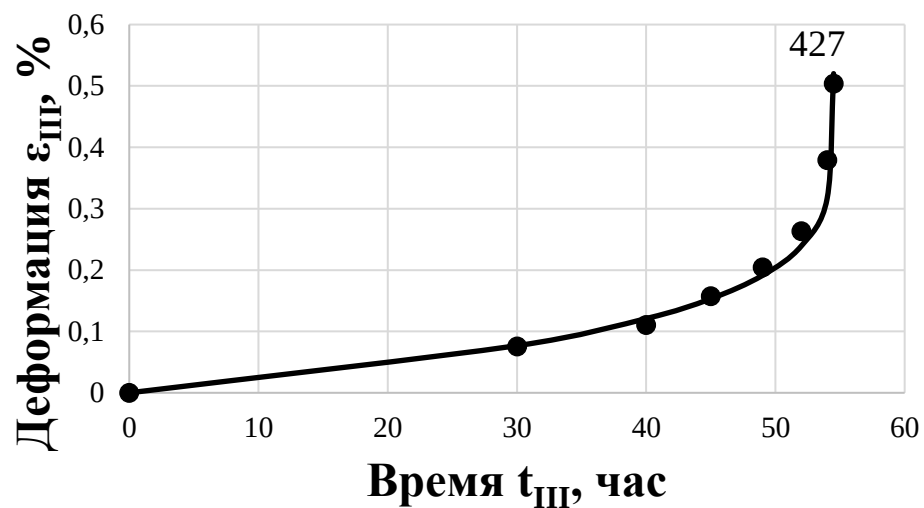


Рисунок 31. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 0,785$ МПа. $T = -12^{\circ}\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

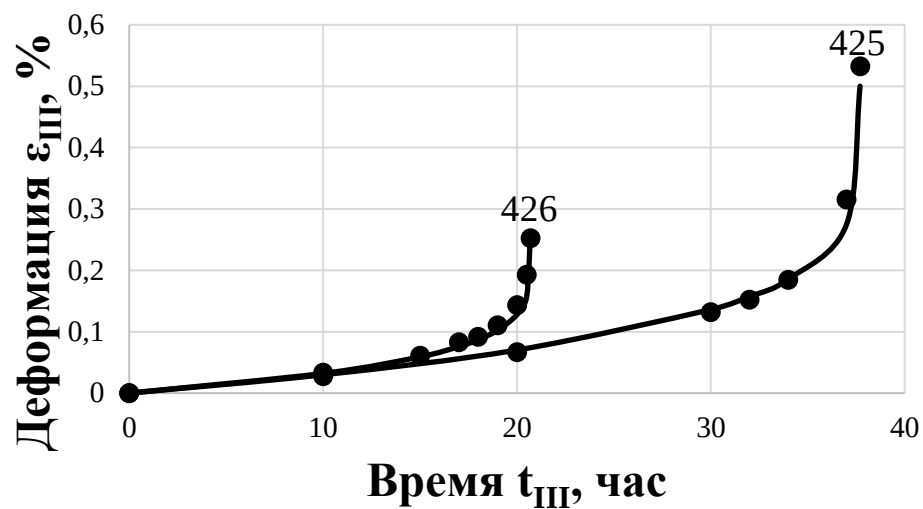


Рисунок 32. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1,107$ МПа. $T = -12^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

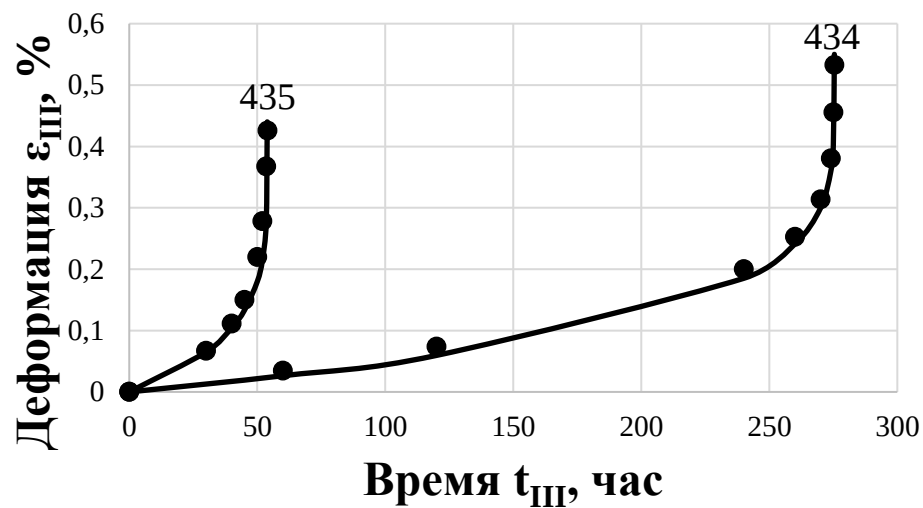


Рисунок 33. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1,3$ МПа. $T = -12^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

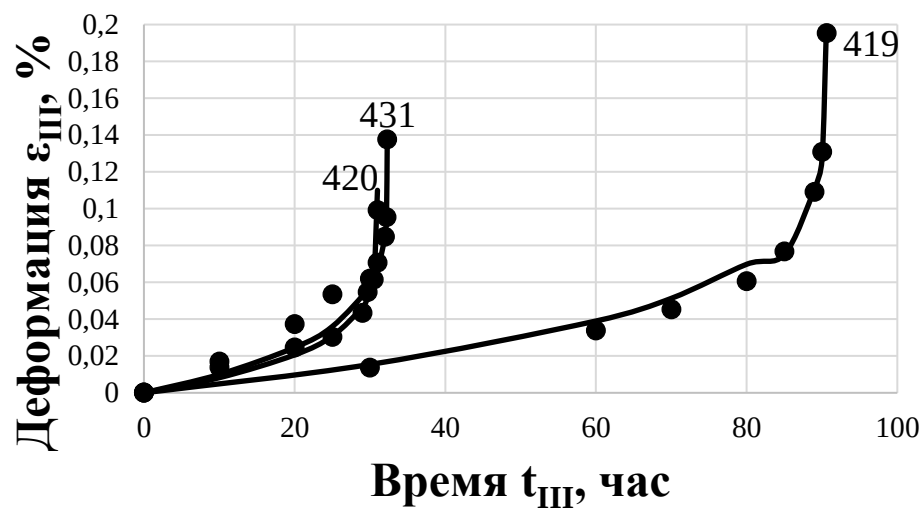


Рисунок 34. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1,4994$ МПа. $T = -12^\circ\text{C}$

•эксперимент — аппроксимация

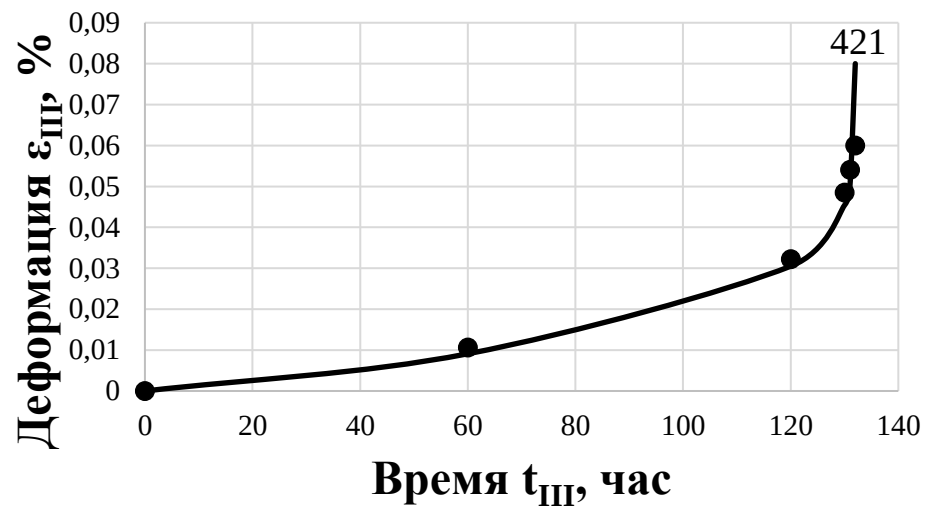


Рисунок 35. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1,8491$ МПа. $T = -12^\circ\text{C}$

•эксперимент — аппроксимация

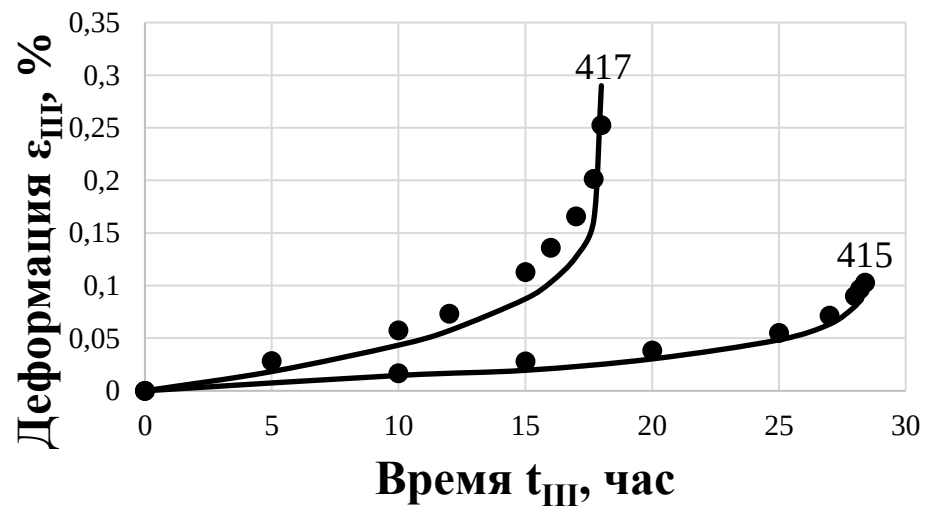


Рисунок 36. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 2,1897$ МПа. $T = -12^\circ\text{C}$

•эксперимент — аппроксимация

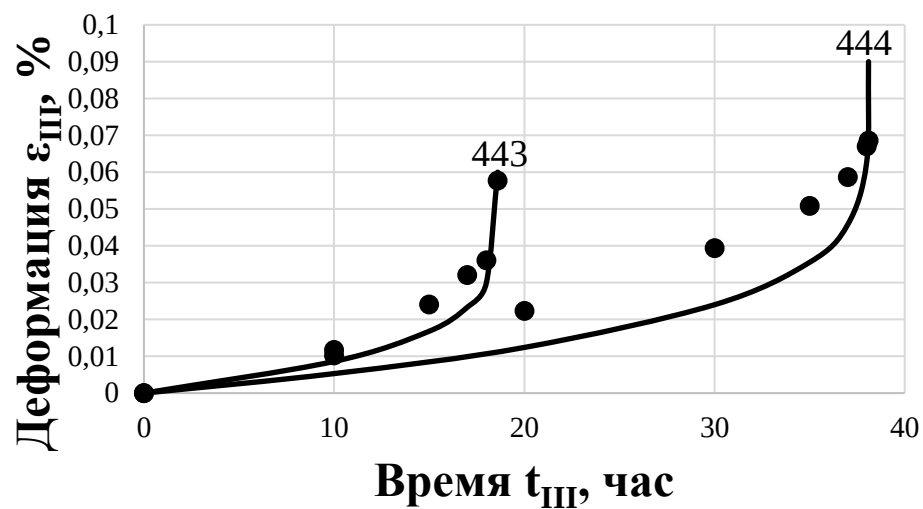


Рисунок 37. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 3$ МПа. $T = -12^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

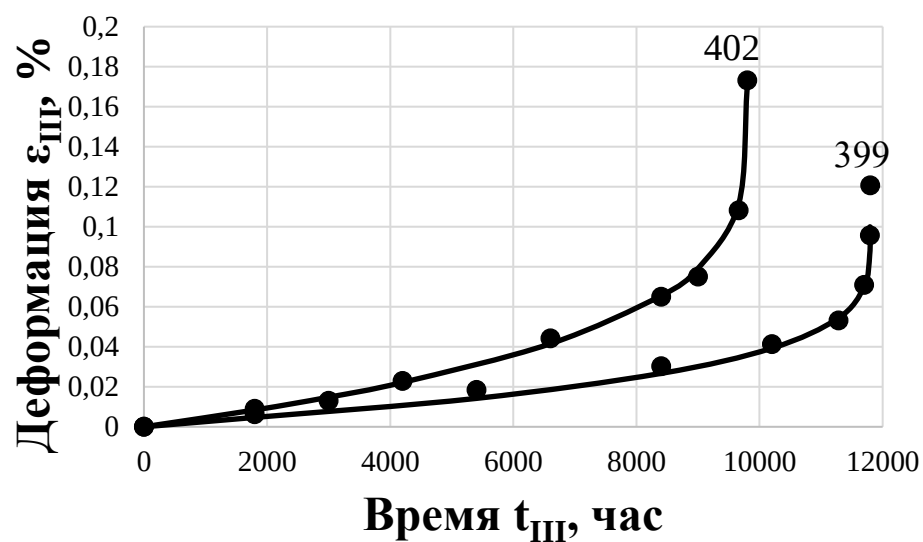


Рисунок 38. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1,4994$ МПа. $T = -24^\circ\text{C}$
 •эксперимент — аппроксимация

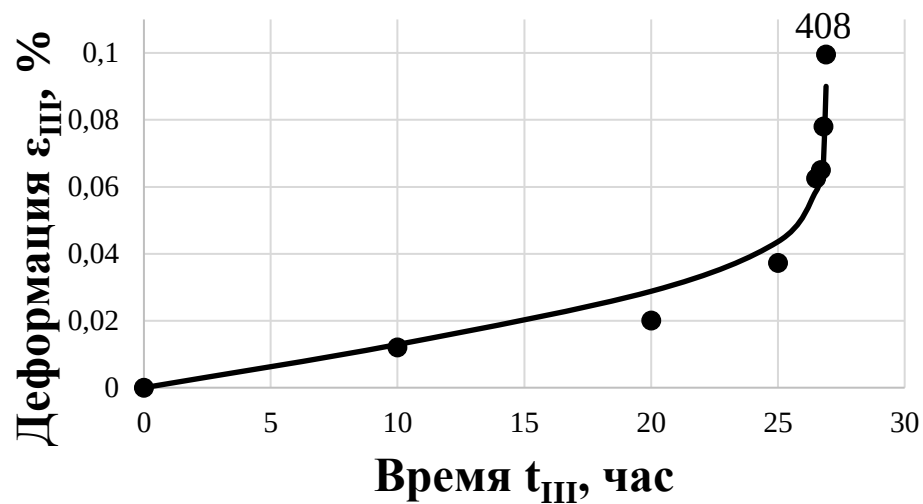


Рисунок 39. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1,4994$ МПа. $T = -24^\circ\text{C}$

•эксперимент — аппроксимация

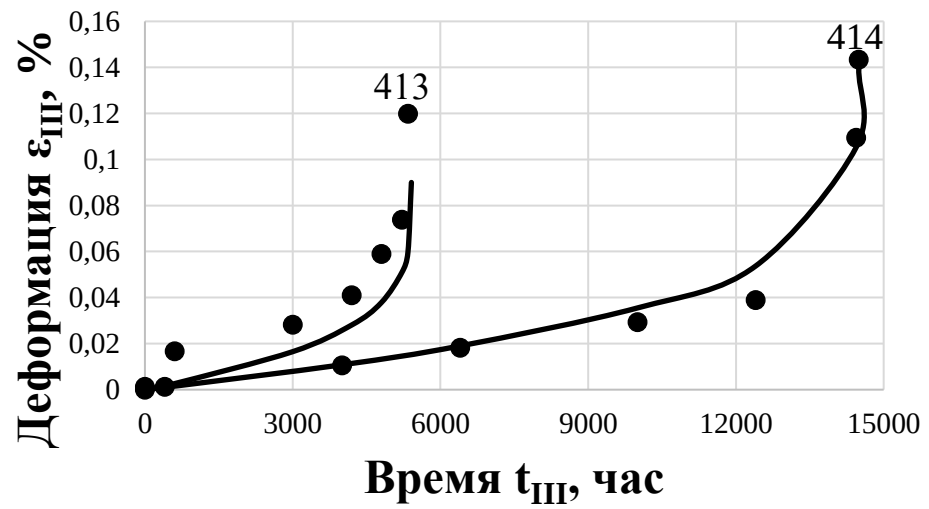


Рисунок 40. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 1,8491$ МПа. $T = -24^\circ\text{C}$

•эксперимент — аппроксимация

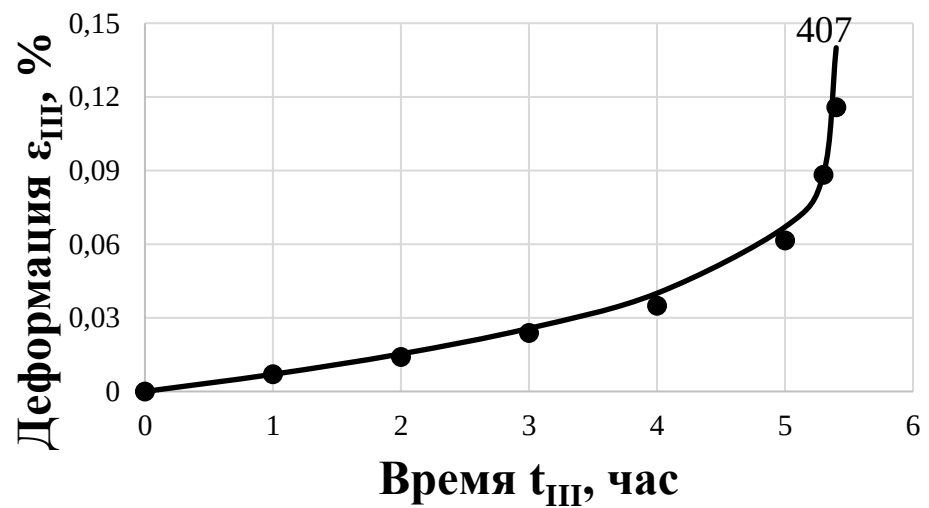


Рисунок 41. Кривые ползучести. $\sigma_0 = 2,271$ МПа. $T = -24^\circ\text{C}$

•эксперимент — аппроксимация

Приложения 3

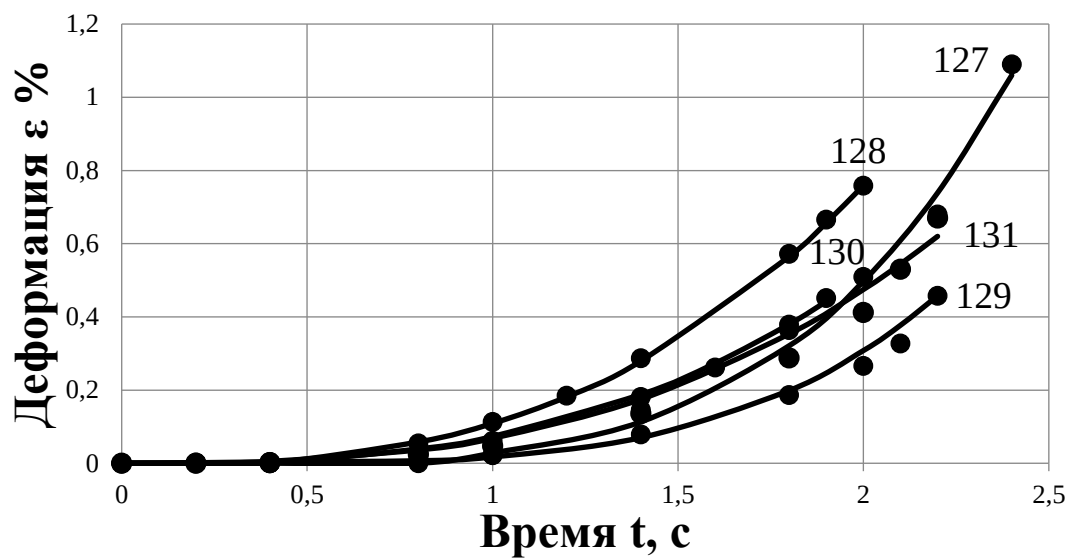


Рисунок 1. Кривые ползучести при $\sigma=0,65$,
•эксперимент, — аппроксимация

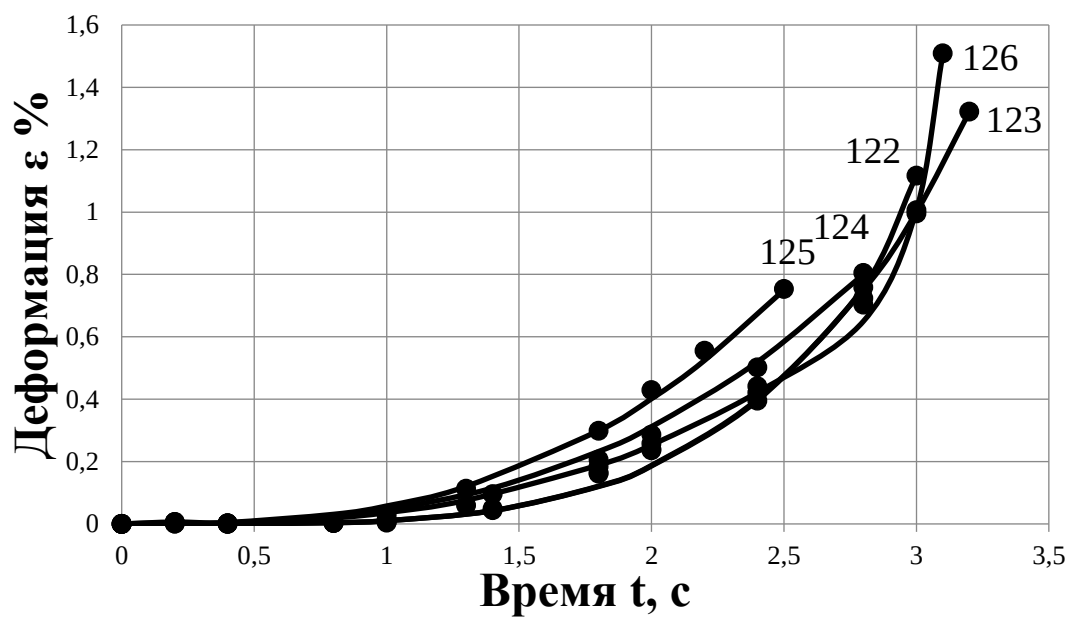


Рисунок 2. Кривые ползучести при $\sigma=0,468$.
•эксперимент, — аппроксимация

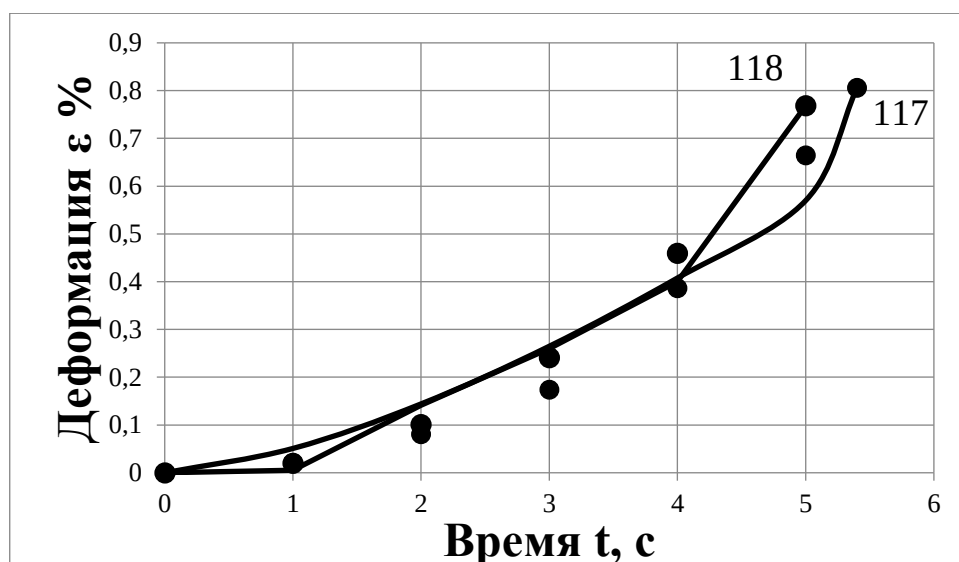


Рисунок 3. Кривые ползучести при $\dot{\sigma}=0,206$.
 •эксперимент, — аппроксимация

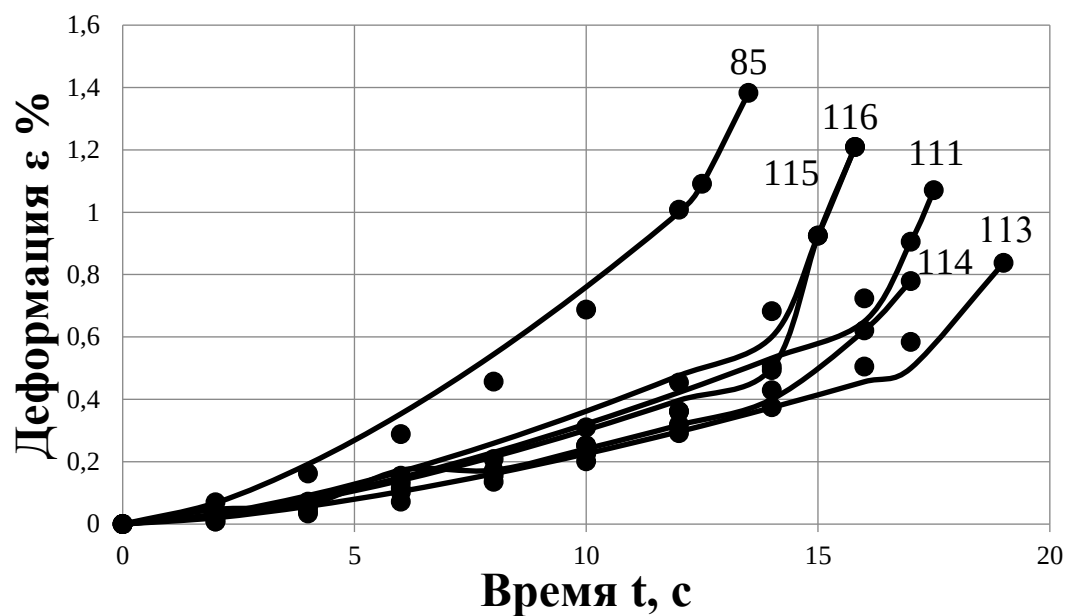


Рисунок 4. Кривые ползучести при $\dot{\sigma}=0,58$.
 •эксперимент, — аппроксимация

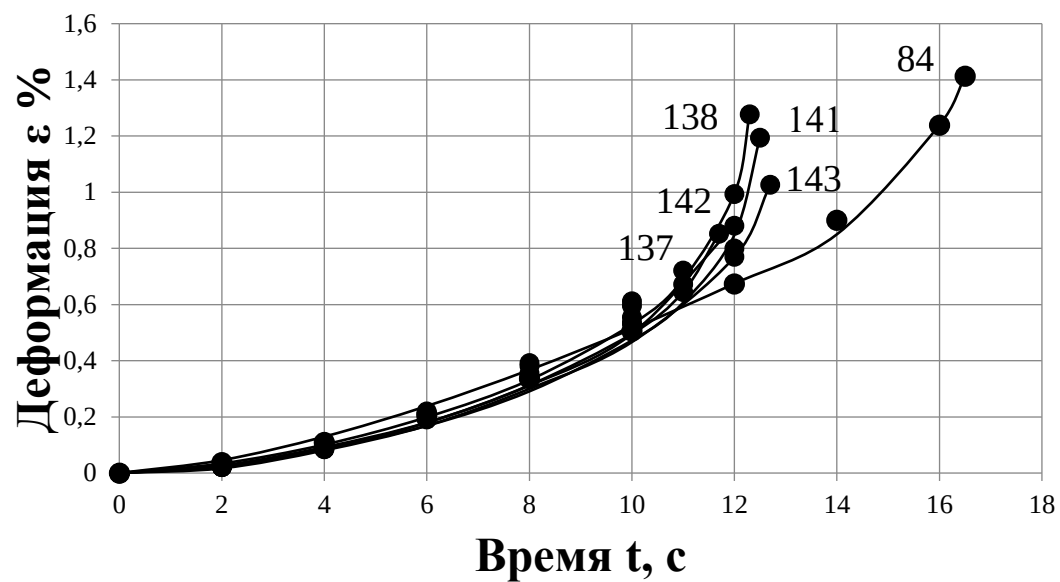


Рисунок 5. Кривые ползучести при $\sigma=0,489$.
•эксперимент, — аппроксимация

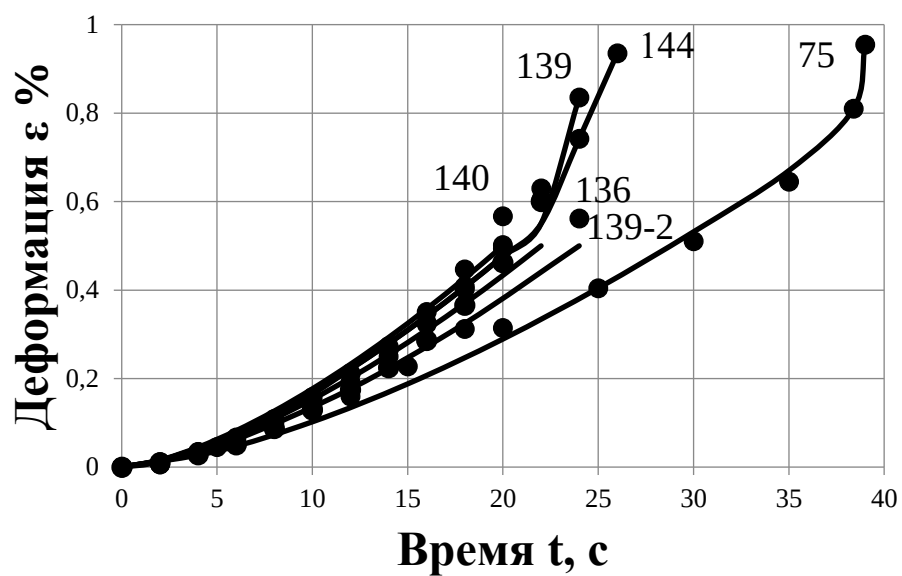


Рисунок 6. Кривые ползучести при $\sigma=0,024$.
•эксперимент, — аппроксимация

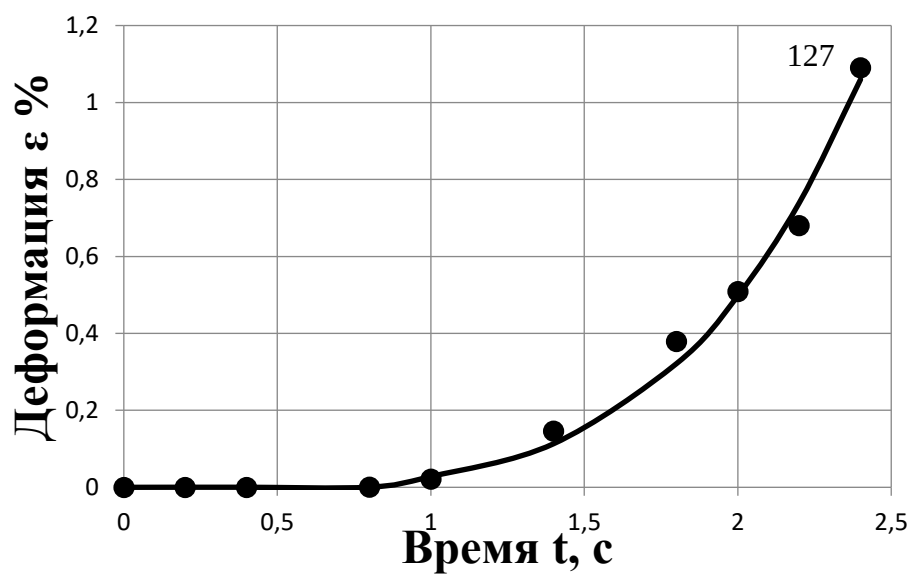


Рисунок 7. Кривые ползучести образца 127 при $\dot{\sigma}=0,650405$,
 •эксперимент — аппроксимация

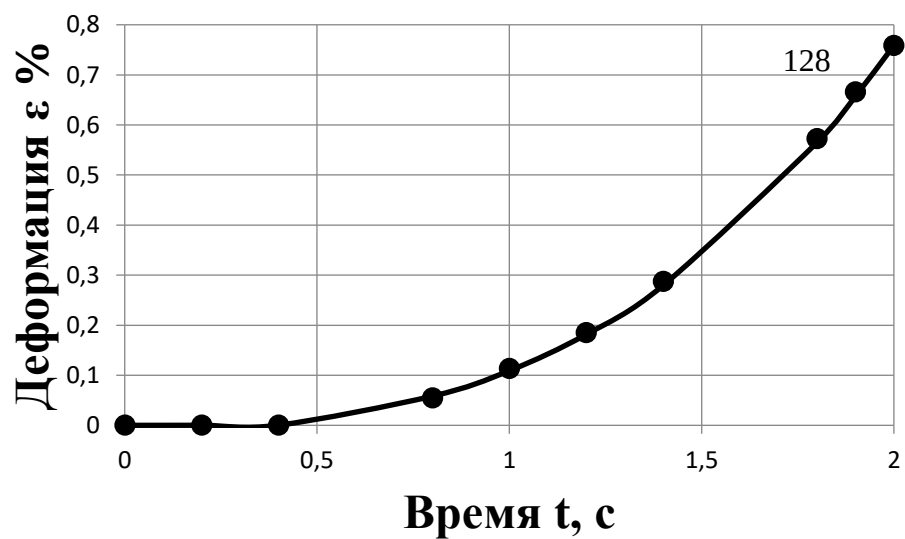


Рисунок 8. Кривые ползучести образца 128 при $\dot{\sigma}=0,650405$,
 •эксперимент — аппроксимация

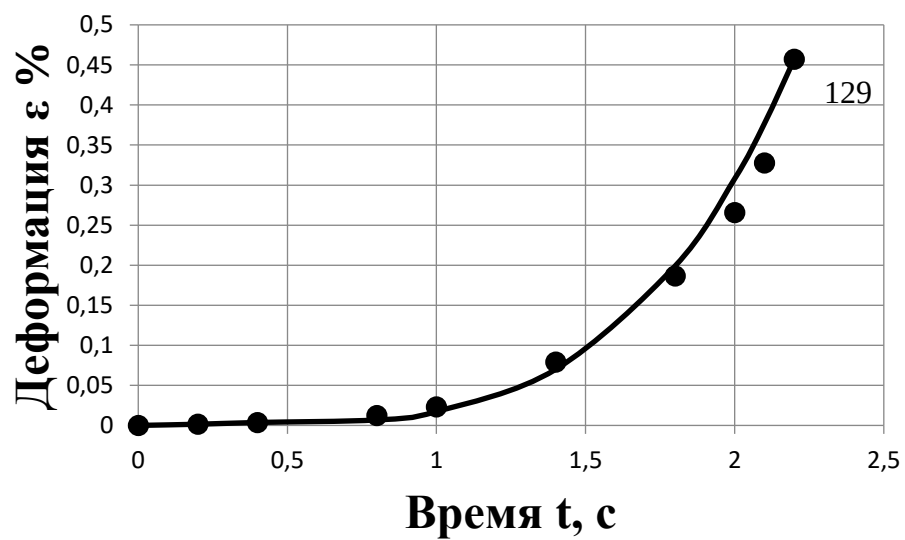


Рисунок 9. Кривые ползучести образца №129 при $\dot{\sigma}=0,646419$,
•эксперимент — аппроксимация

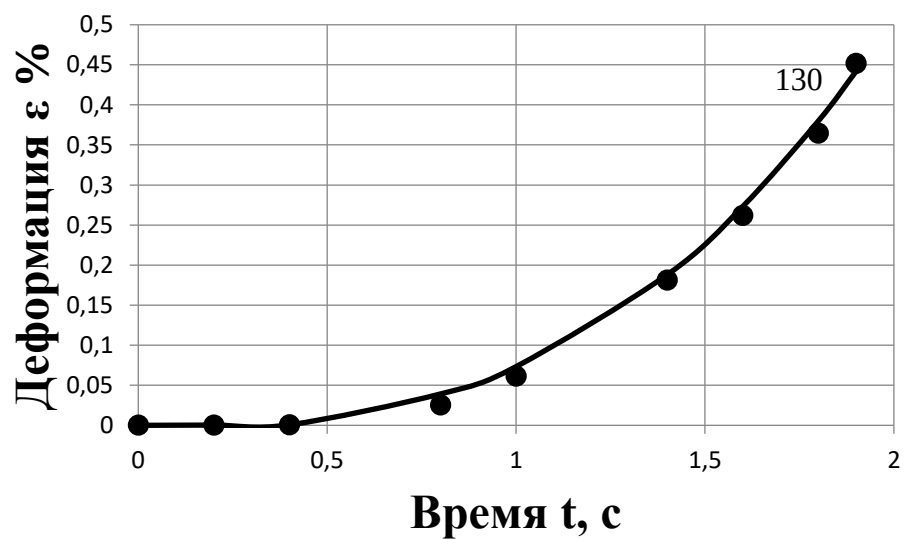


Рисунок 10. Кривые ползучести образца №130 при $\dot{\sigma}=0,647634$,
•эксперимент — аппроксимация

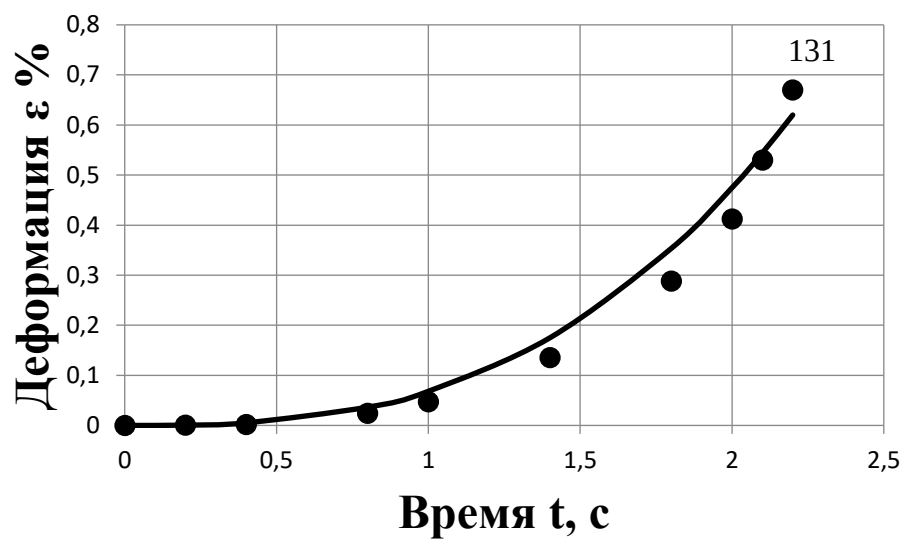


Рисунок 11. Кривые ползучести образца №131 при $\dot{\sigma}=0,664457$,
 •эксперимент — аппроксимация

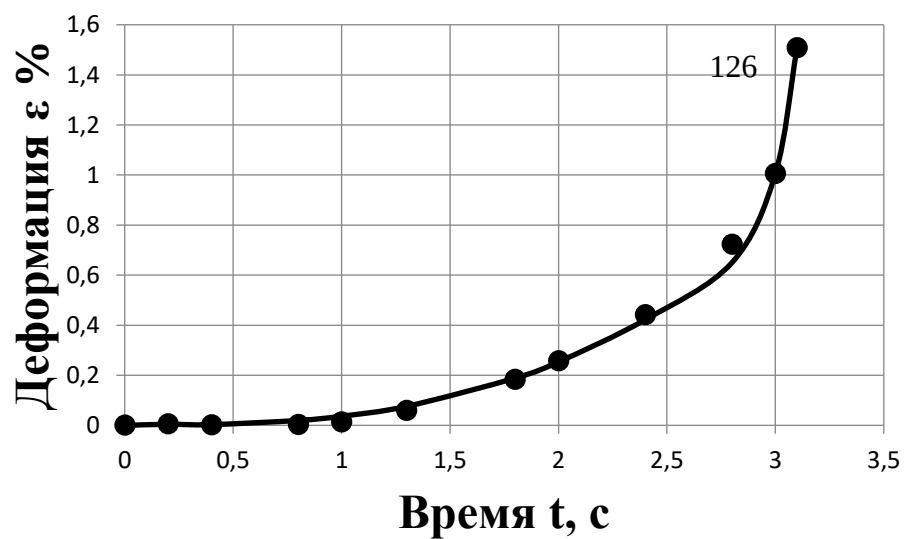


Рисунок 12. Кривые ползучести образца 126 при $\dot{\sigma}=0,44314$
 •эксперимент — аппроксимация

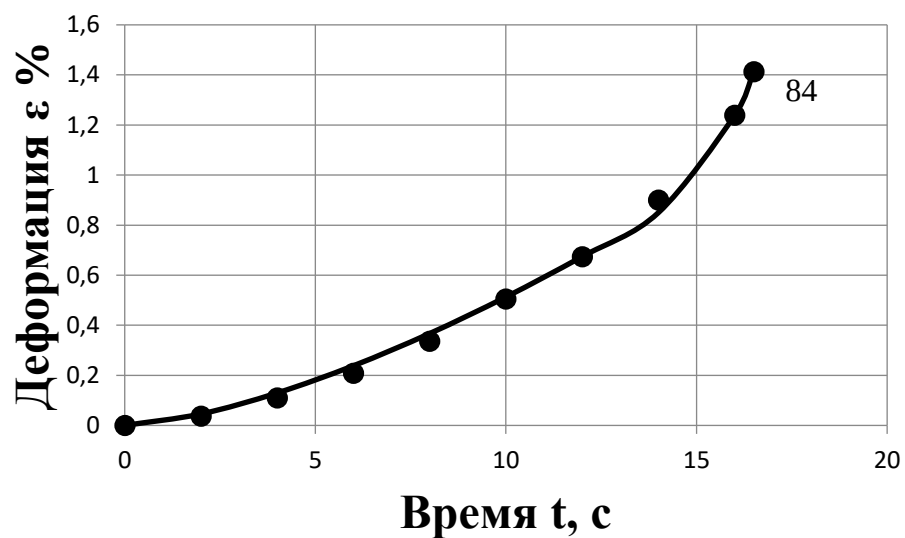


Рисунок 13. Кривые ползучести образца 84 при $\dot{\sigma}=0,049891$,
 •эксперимент — аппроксимация

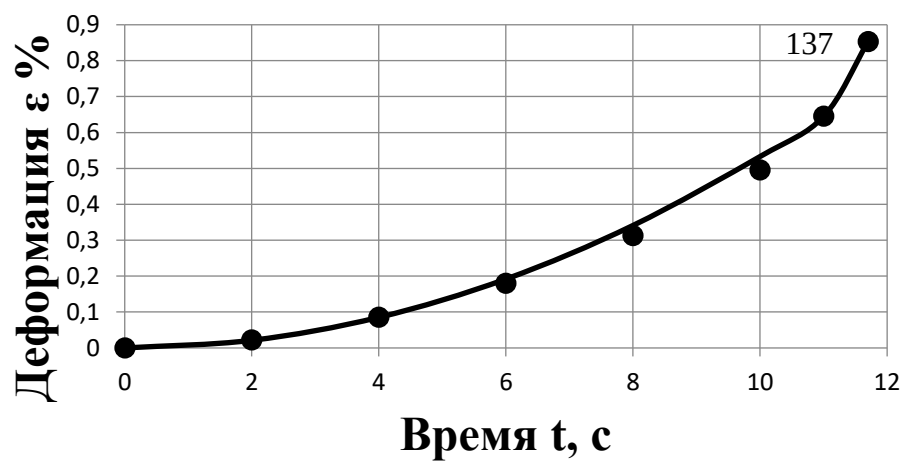


Рисунок 14. Кривые ползучести образца 137 при $\dot{\sigma}=0,050903$,
 •эксперимент — аппроксимация

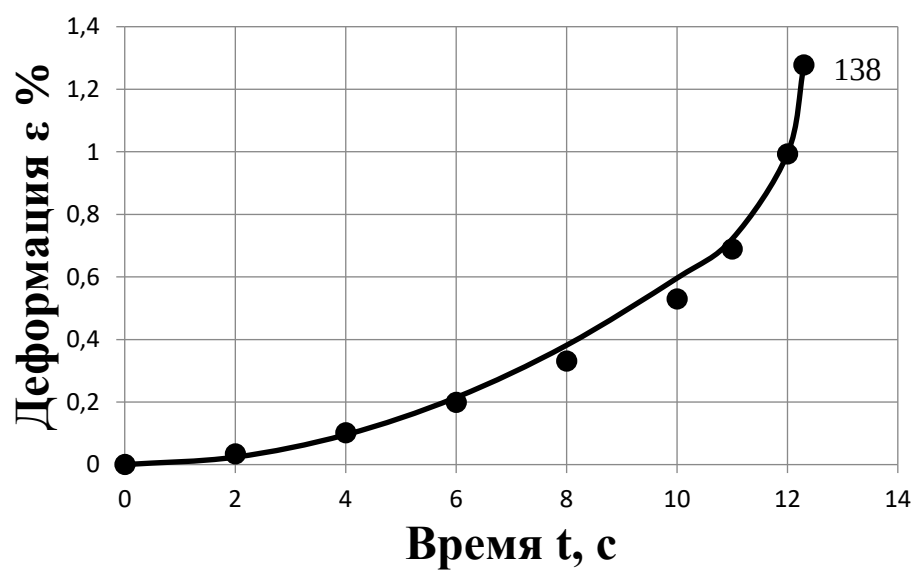


Рисунок 15. Кривые ползучести образца 138 при $\dot{\sigma}=0,047436$,
 •эксперимент — аппроксимация

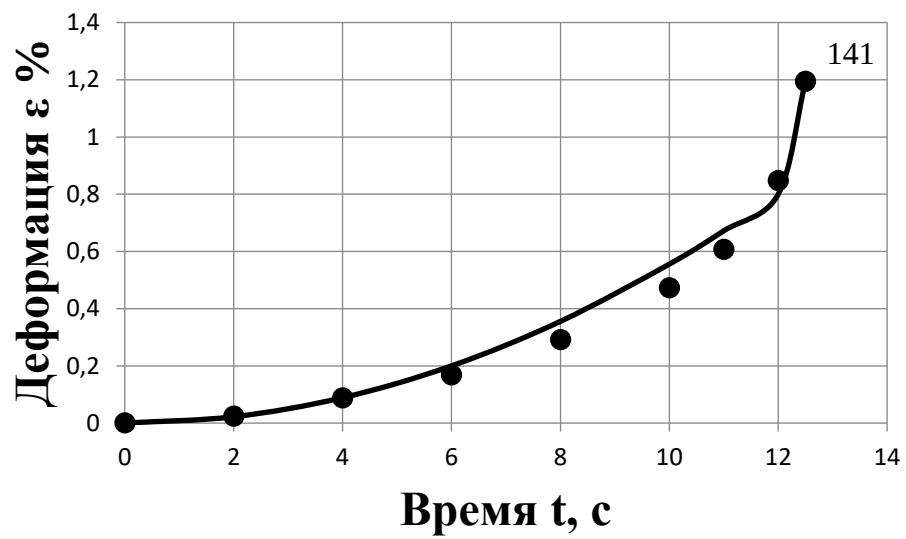


Рисунок 16. Кривые ползучести образца 141 при $\dot{\sigma}=0,047436$.
 •эксперимент — аппроксимация

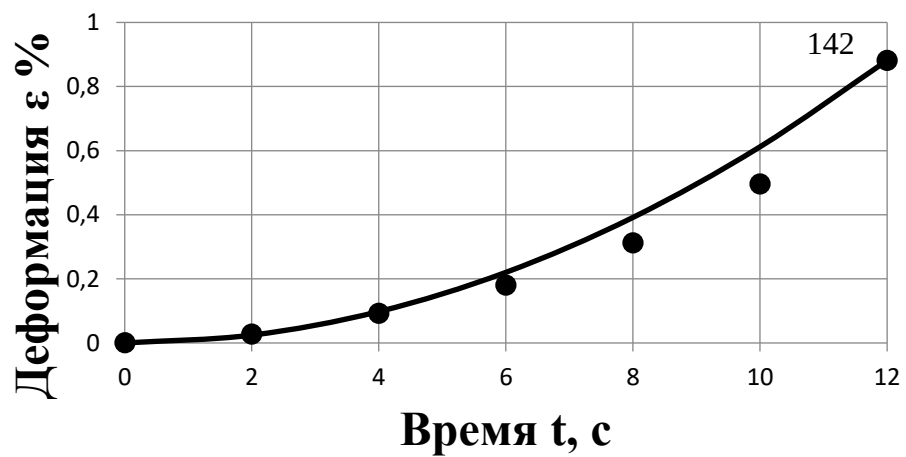


Рисунок 17. Кривые ползучести образца 142 при $\dot{\sigma}=0,046265$,
 •эксперимент — аппроксимация

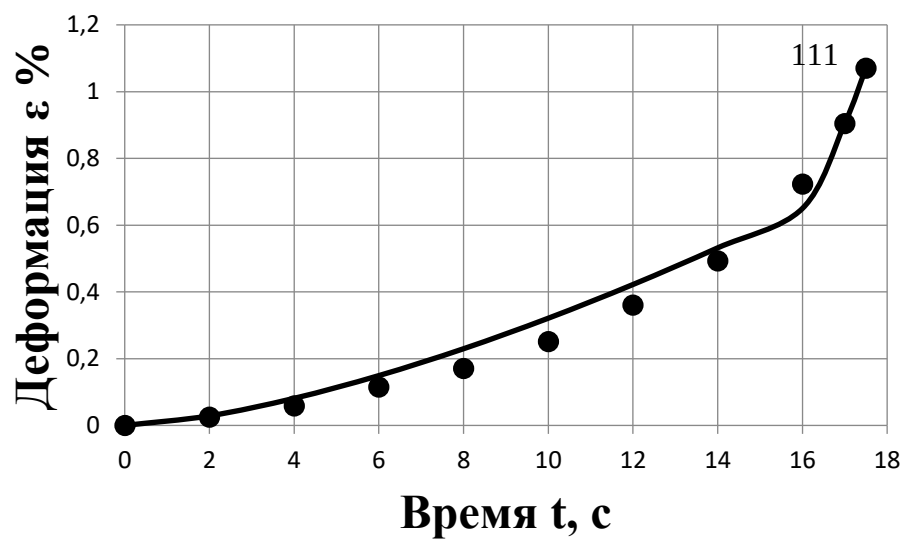


Рисунок 18. Кривые ползучести образца 111 при $\dot{\sigma}=0,058188$
 •эксперимент — аппроксимация

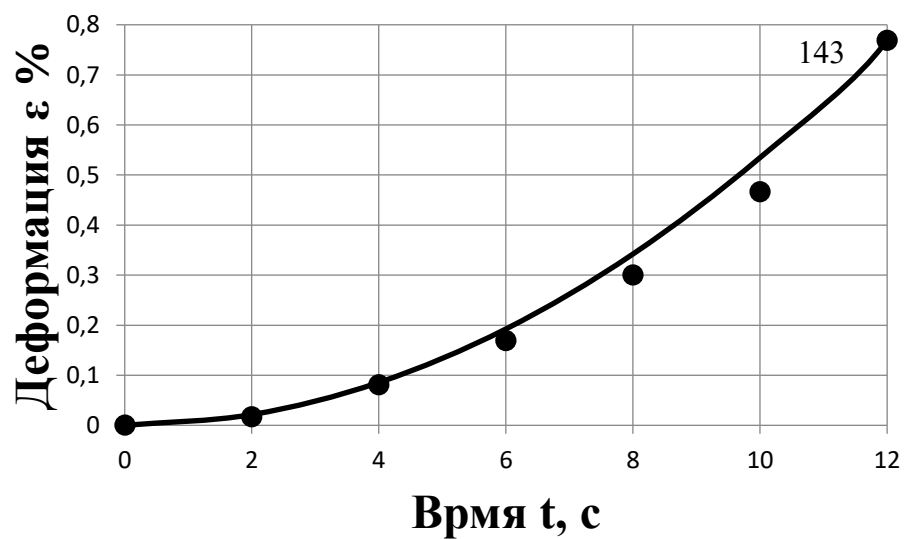


Рисунок 19. Кривые ползучести образца 143 при $\dot{\sigma}=0,0496$,
 •эксперимент — аппроксимация

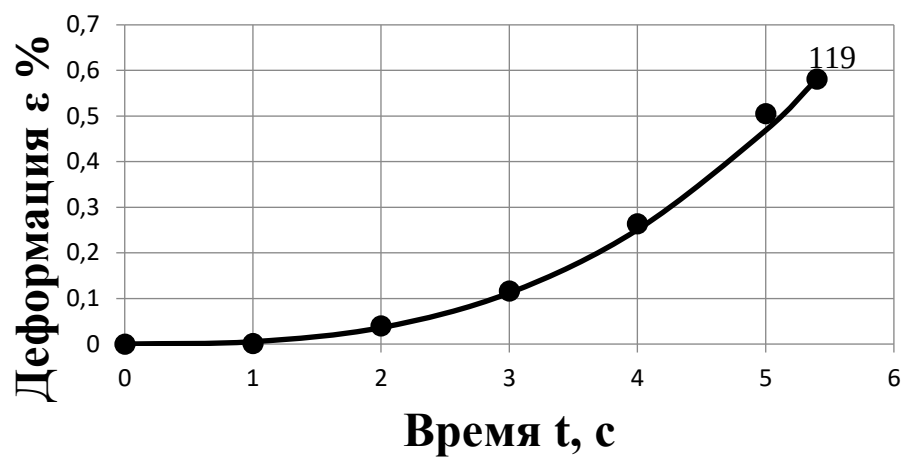


Рисунок 20. Кривые ползучести образца 119 при $\dot{\sigma}=0,207664$,
•эксперимент — аппроксимация

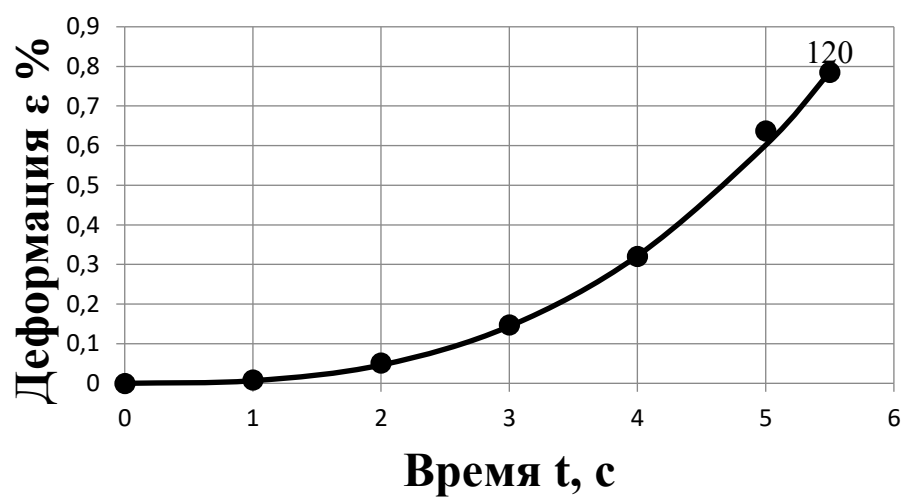


Рисунок 21. Кривые ползучести образца 120. $\dot{\sigma}=0,20243$
•эксперимент — аппроксимация

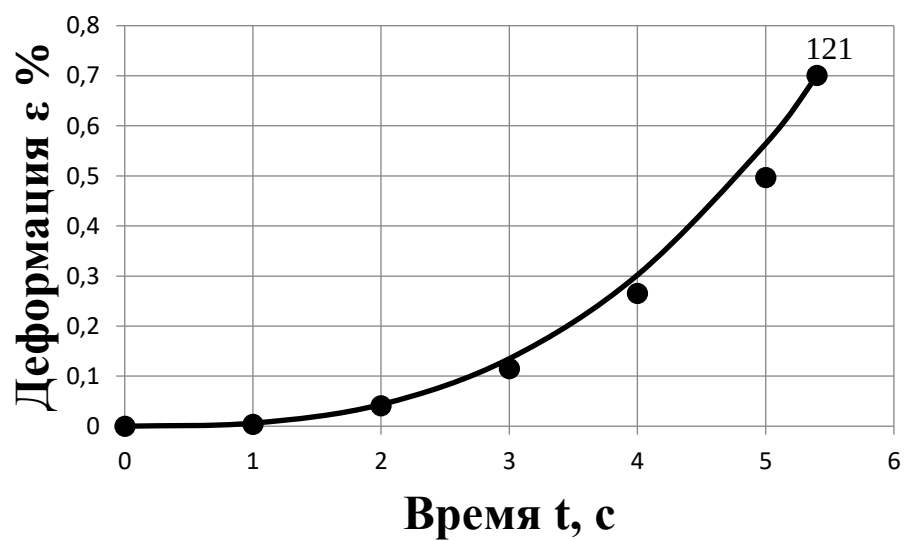


Рисунок 22. Кривые ползучести образца 121. $\dot{\sigma}=0,208419$

•эксперимент — аппроксимация

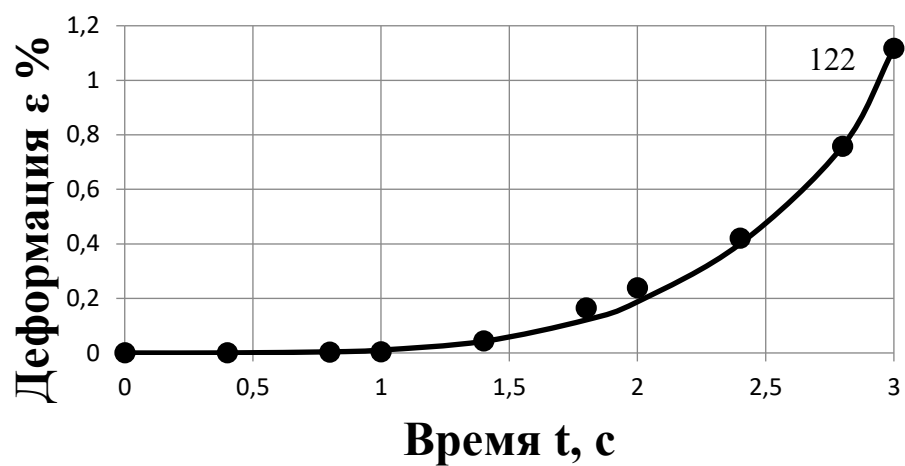


Рисунок 23. Кривые ползучести образца 122. $\dot{\sigma}=0,482402$

•эксперимент — аппроксимация

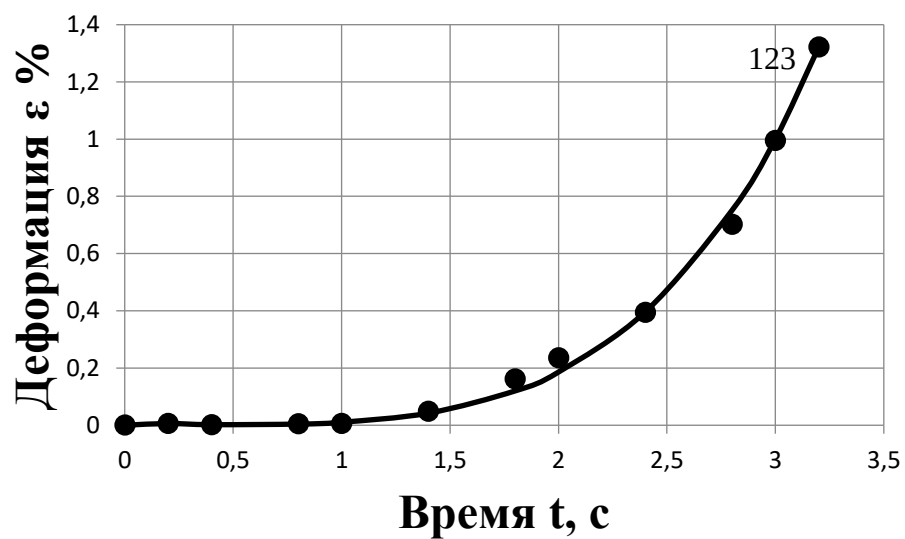


Рисунок 24. Кривые ползучести образца 123. $\dot{\sigma}=0,472177$

•эксперимент — аппроксимация

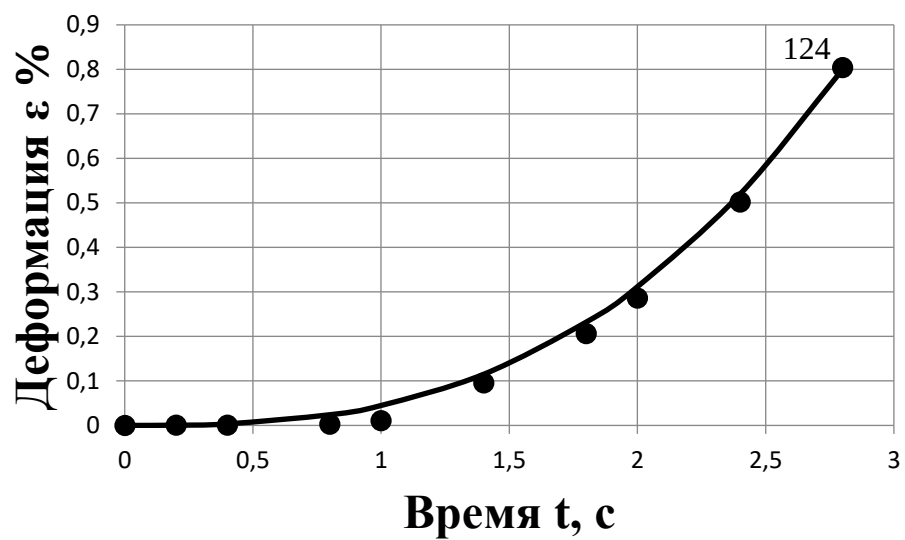


Рисунок 25. Кривые ползучести образца 124. $\dot{\sigma}=0,44719$
 •эксперимент — аппроксимация

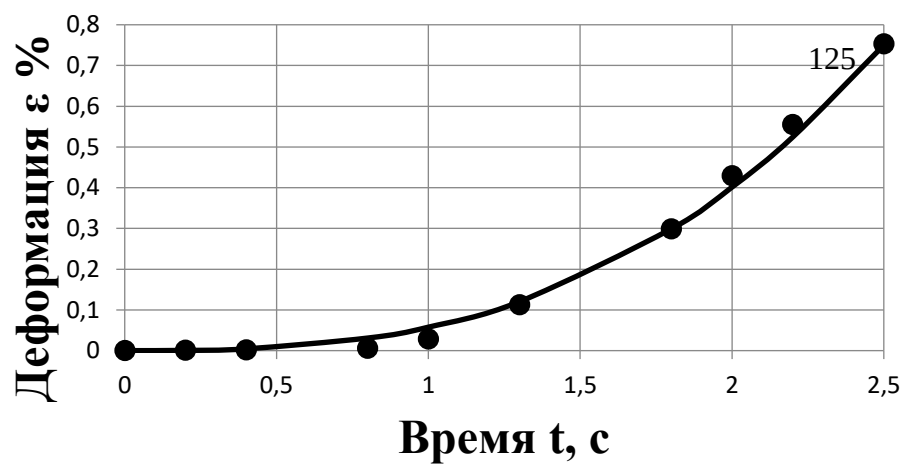


Рисунок 26. Кривые ползучести образца 125. $\dot{\sigma}=0,493277$
 •эксперимент — аппроксимация

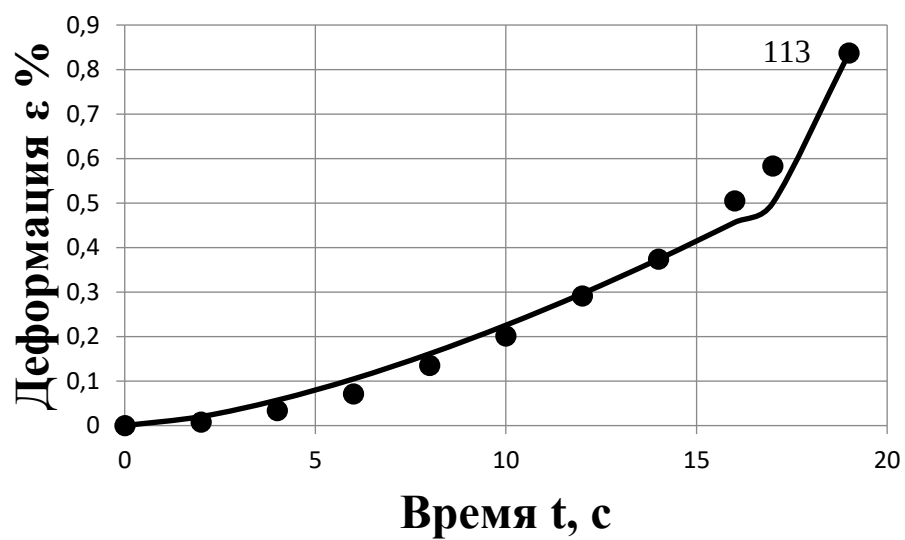


Рисунок 27. Кривые ползучести образца 113. $\dot{\sigma}=0,057155$
 •эксперимент — аппроксимация

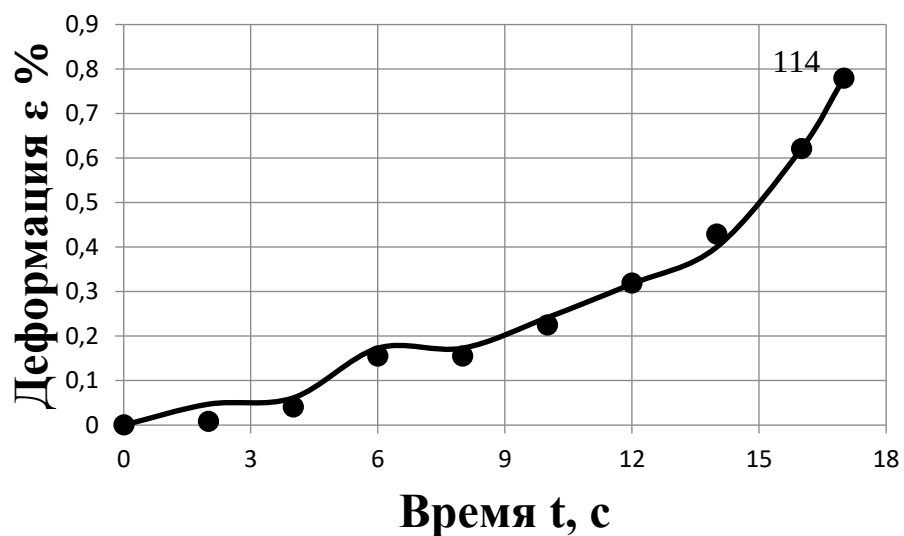


Рисунок 28. Кривые ползучести образца 114. $\dot{\sigma}=0,057264$
 •эксперимент — аппроксимация

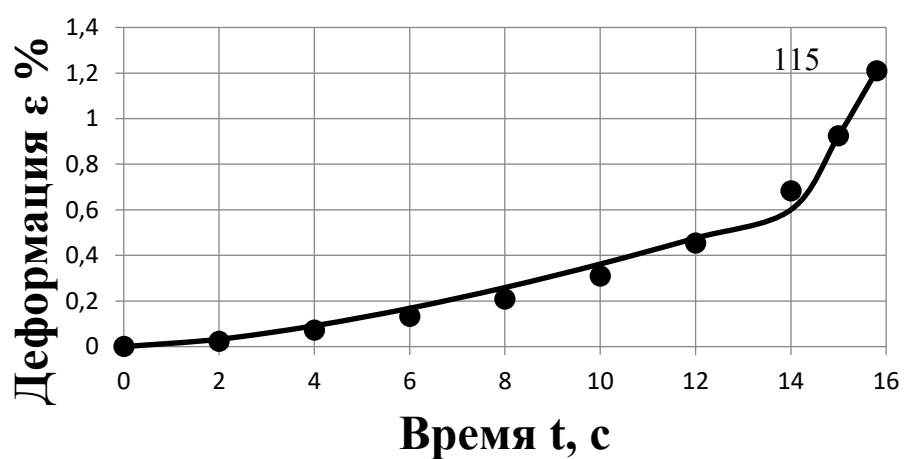


Рисунок 29. Кривые ползучести образца 115. $\dot{\sigma}=0,057381$
 •эксперимент — аппроксимация

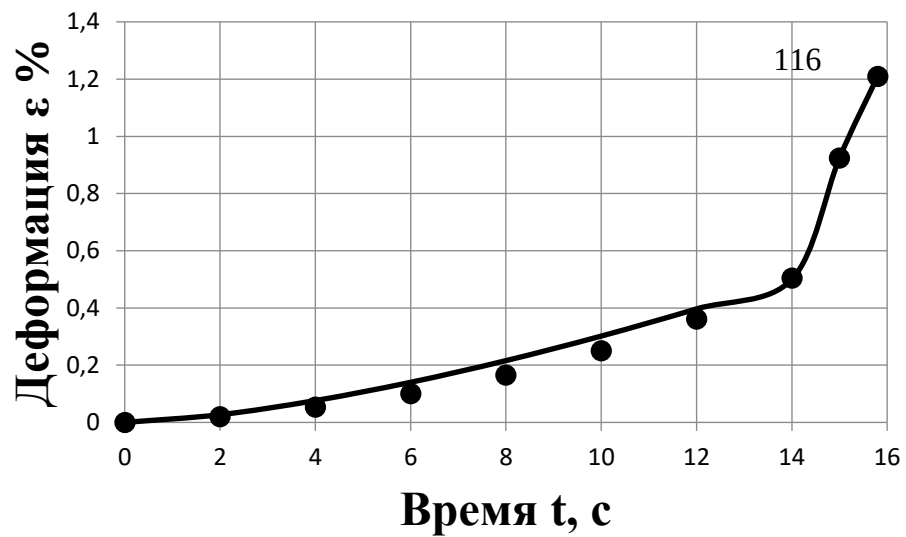


Рисунок 30. Кривые ползучести образца 116. $\dot{\sigma}=0,05659$
 •эксперимент — аппроксимация

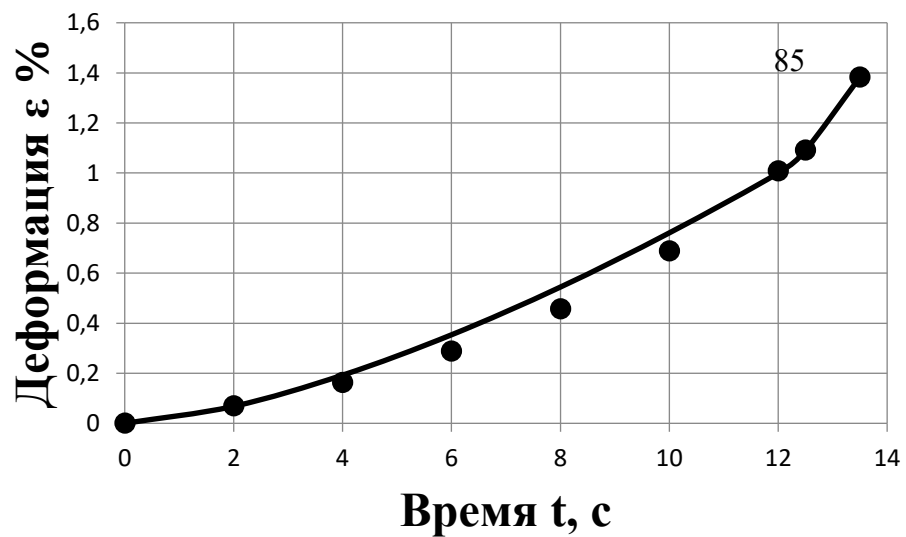


Рисунок 31. Кривые ползучести образца 85. $\dot{\sigma}=0,061637$
 •эксперимент — аппроксимация

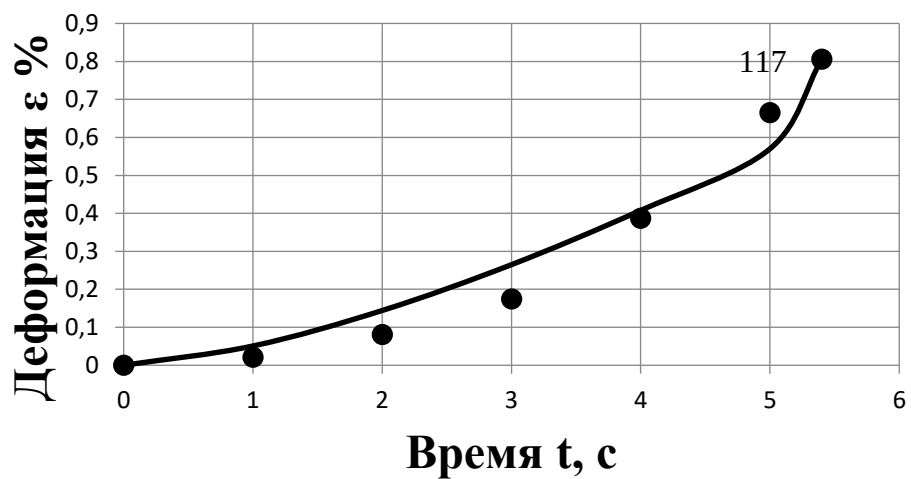


Рисунок 32. Кривые ползучести образца 117. $\dot{\sigma}=0,208002$

•эксперимент — аппроксимация

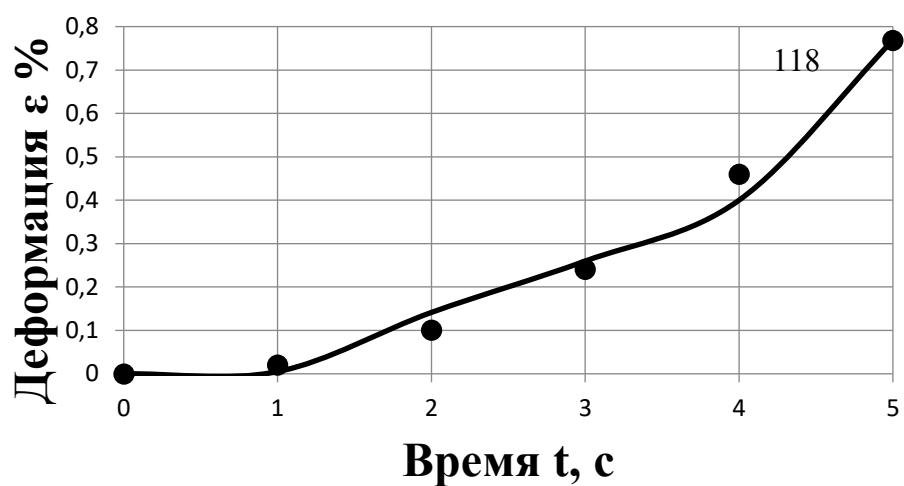


Рисунок 33. Кривые ползучести образца 118. $\dot{\sigma}=0,202832$

•эксперимент — аппроксимация

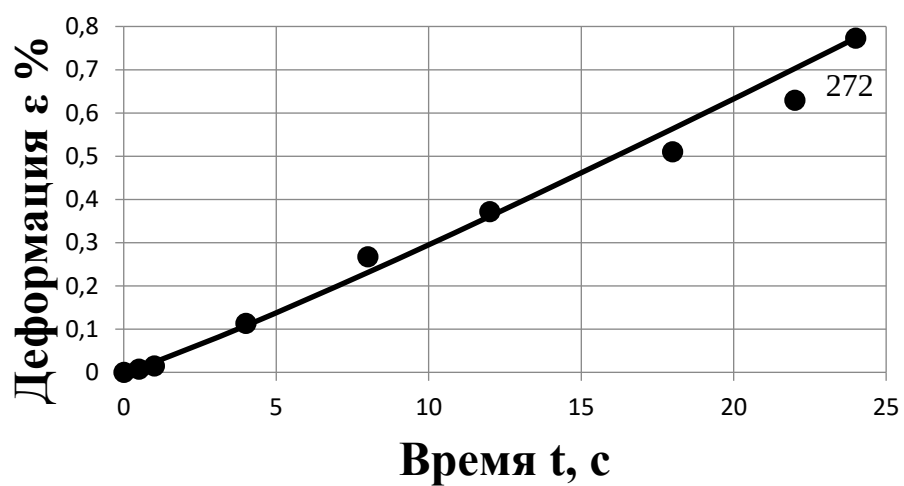


Рисунок 34. Кривые ползучести образца 272. $\dot{\sigma}=0,014672$

•эксперимент — аппроксимация

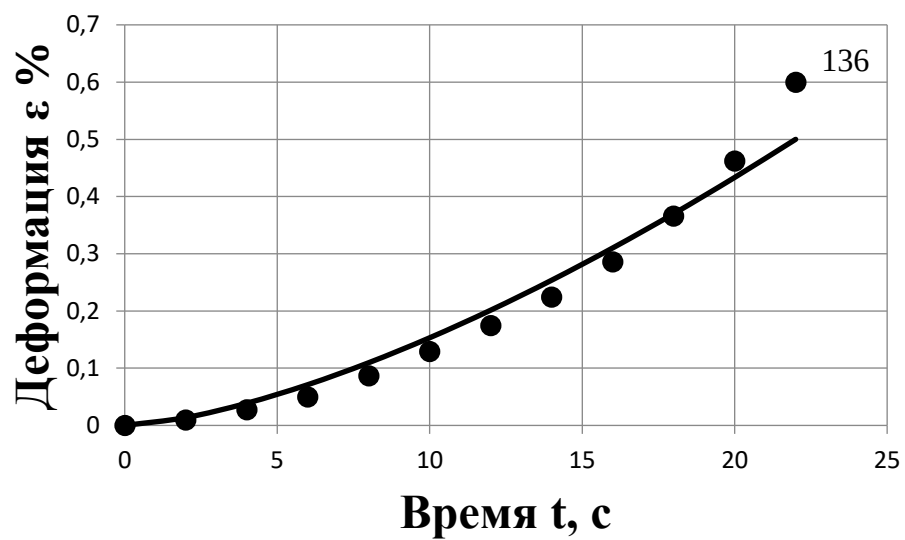


Рисунок 35. Кривые ползучести образца 136. $\dot{\sigma}=0,021924$
 •эксперимент — аппроксимация

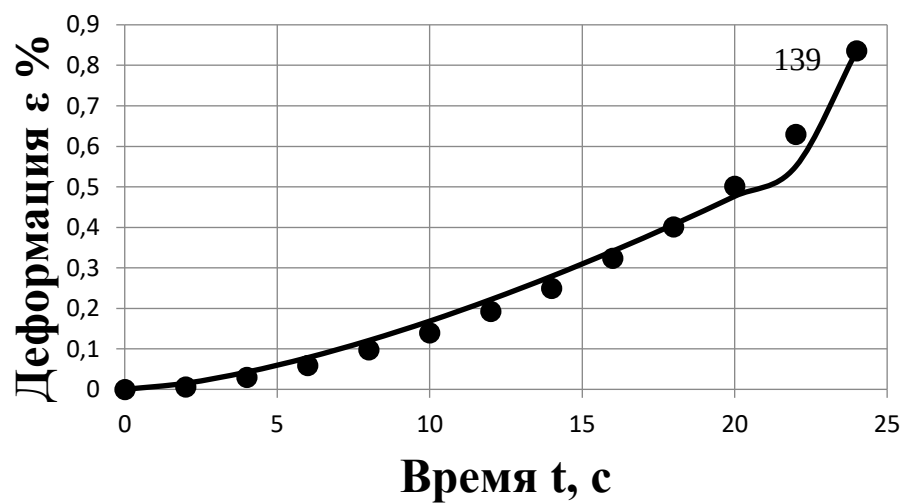


Рисунок 36. Кривые ползучести образца 139. $\dot{\sigma}=0,021888$
 •эксперимент — аппроксимация

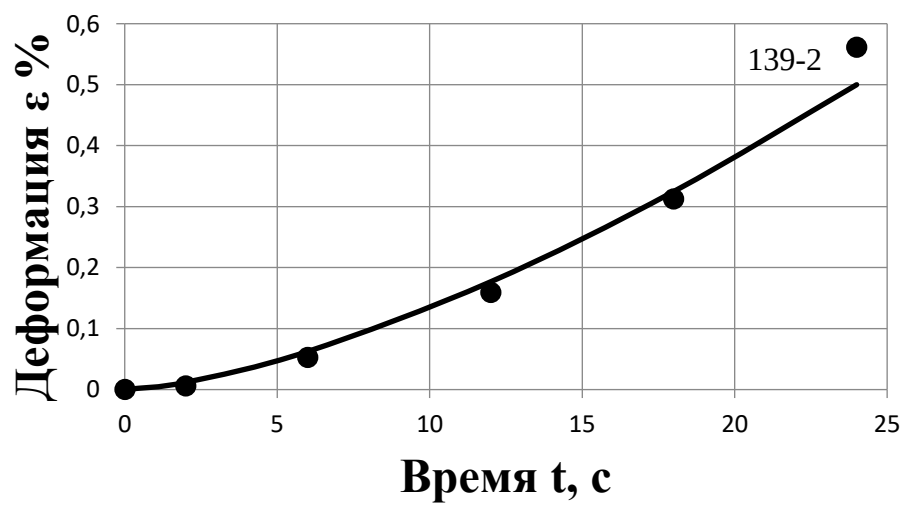


Рисунок 37. Кривые ползучести образца 139-2. $\dot{\sigma}=0,021502$
 •эксперимент — аппроксимация

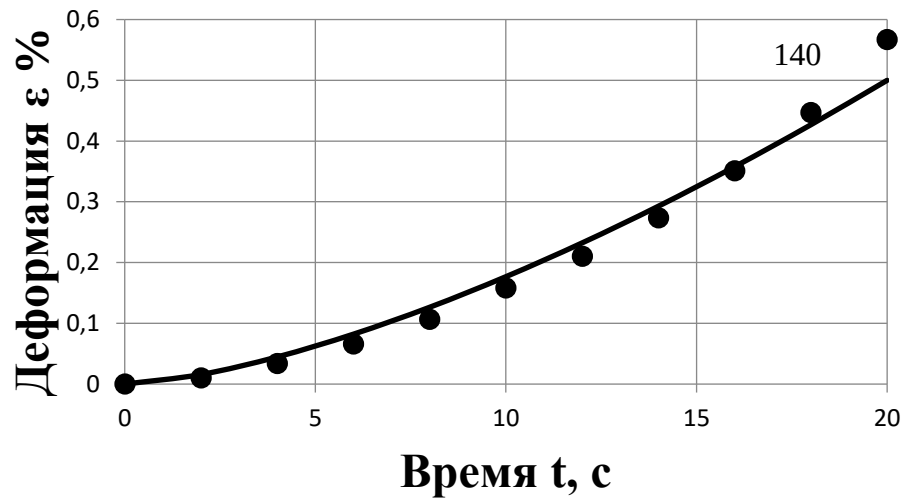


Рисунок 38. Кривые ползучести образца 140. $\dot{\sigma}=0,020966$
 •эксперимент — аппроксимация

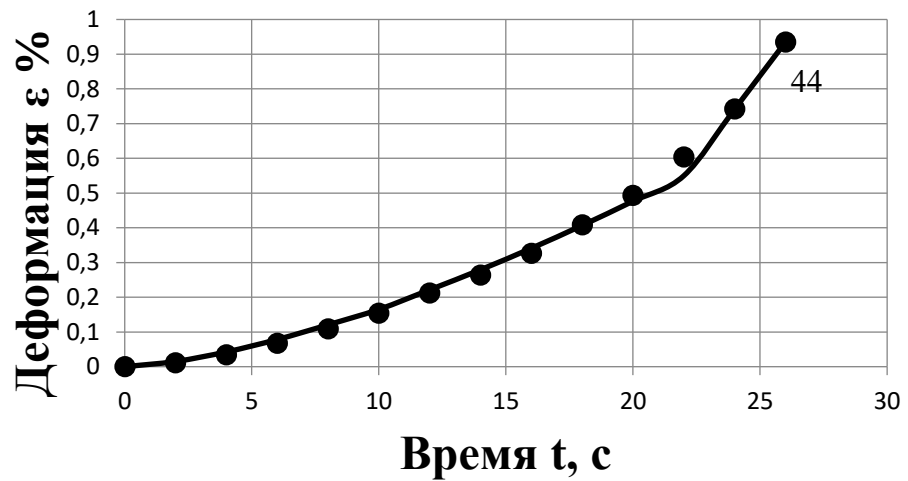


Рисунок 39. Кривые ползучести образца 44. $\dot{\sigma}=0,020966$
 •эксперимент — аппроксимация

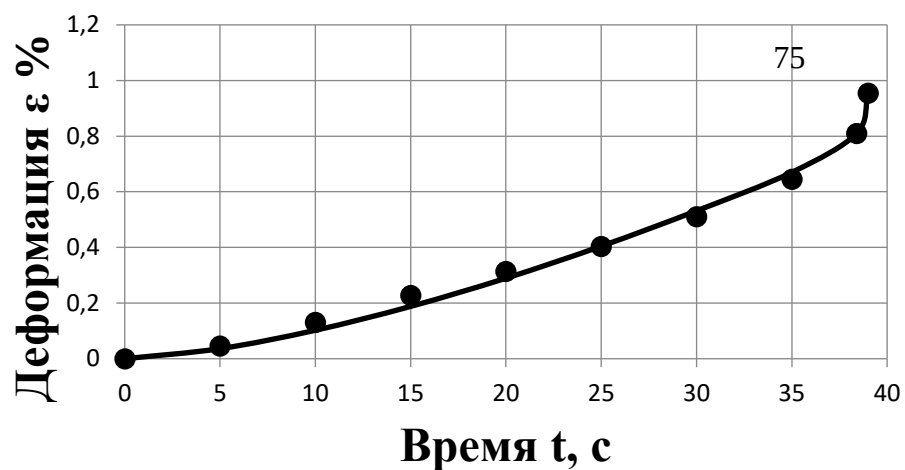


Рисунок 40. Кривые ползучести образца 75. $\dot{\sigma}=0,022212$
 •эксперимент — аппроксимация

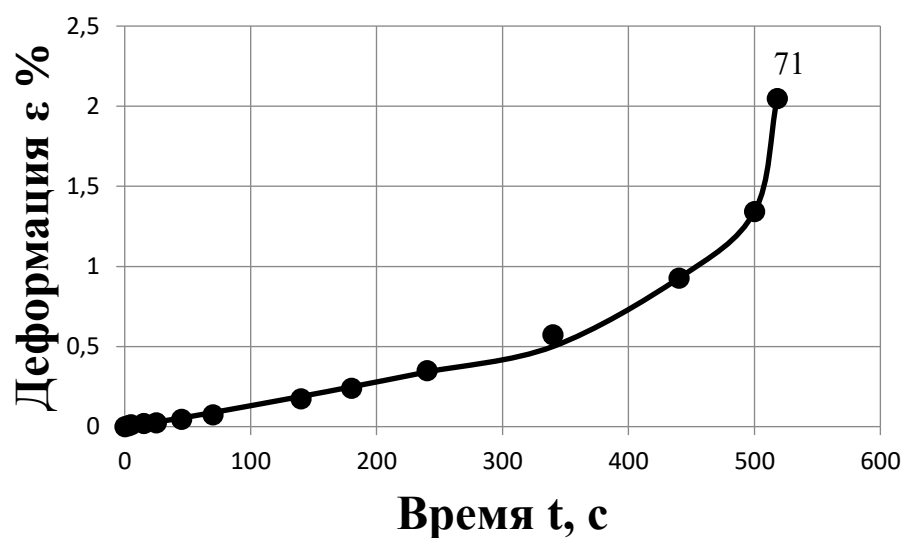


Рисунок 41. Кривые ползучести образца 71. $\dot{\sigma}=0,000563$
 •эксперимент — аппроксимация

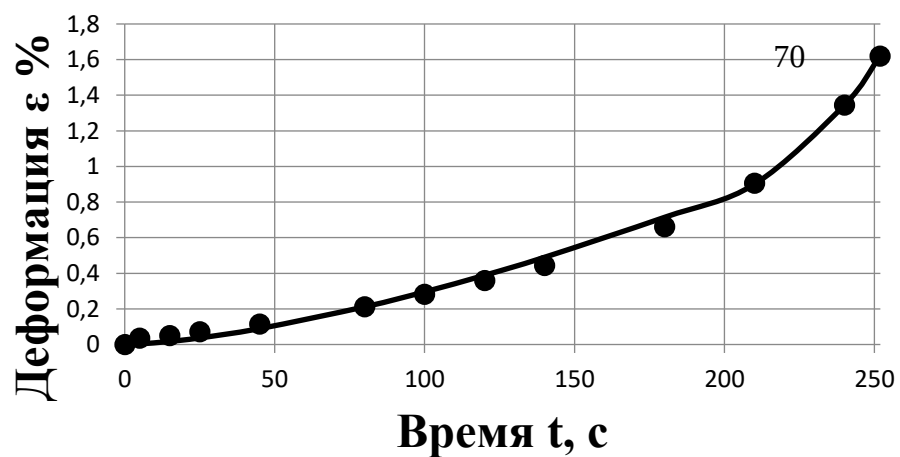


Рисунок 42. Кривые ползучести образца 70. $\dot{\sigma}=0,001698$

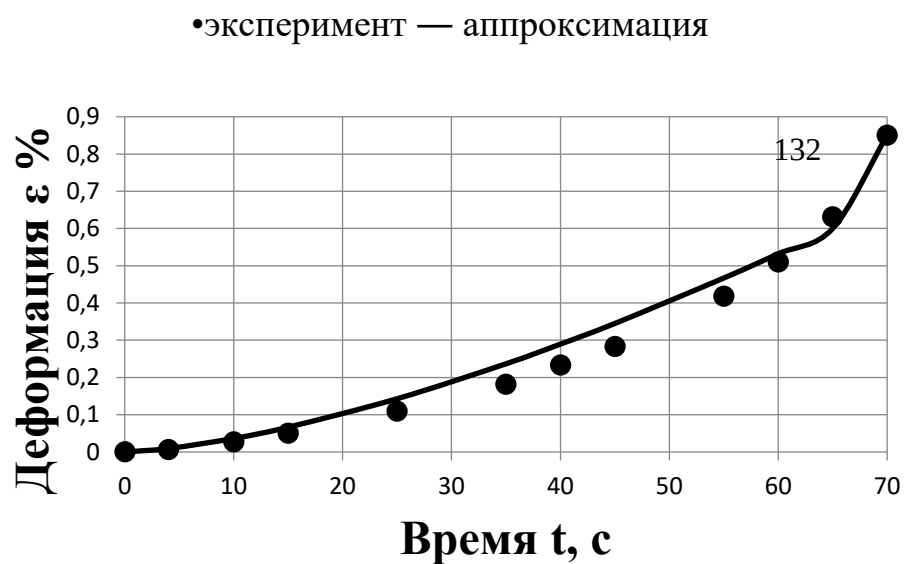


Рисунок 43. Кривые ползучести образца 132. $\dot{\sigma}=0,005753$
 •эксперимент — аппроксимация

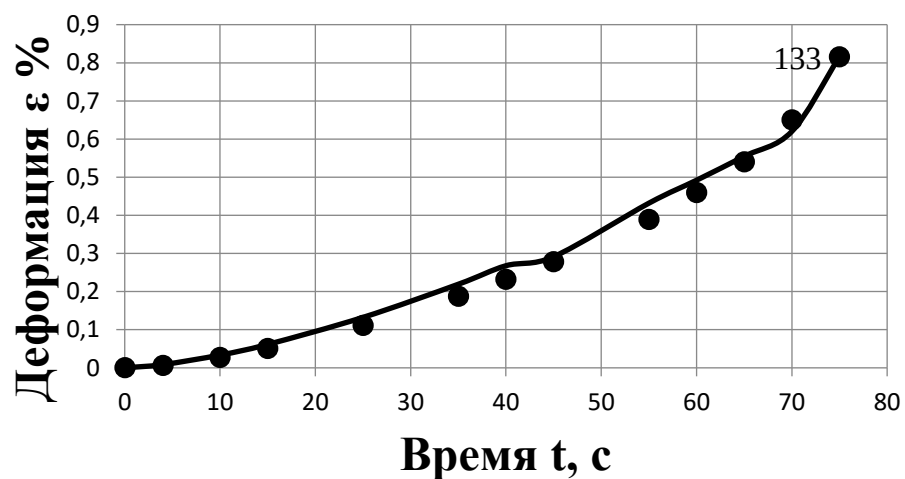


Рисунок 44. Кривые ползучести образца 133. $\dot{\sigma}=0,005676$
 •эксперимент — аппроксимация

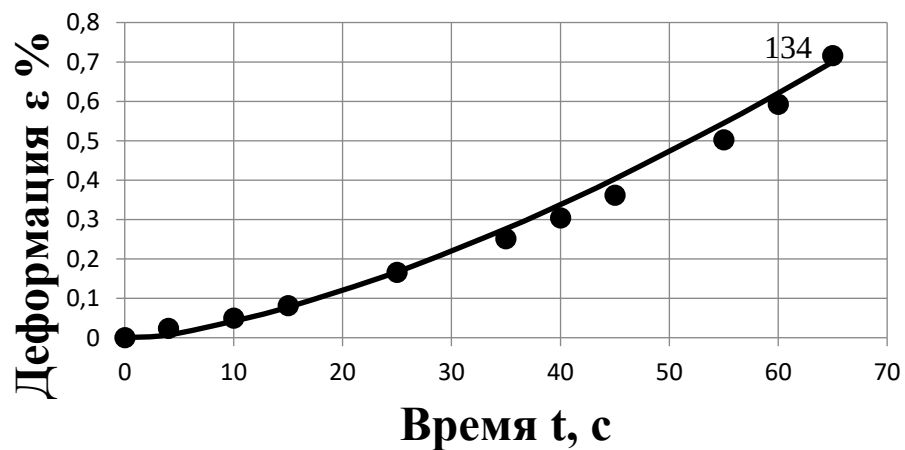


Рисунок 45. Кривые ползучести образца 134. $\dot{\sigma}=0,005798$
 •эксперимент — аппроксимация

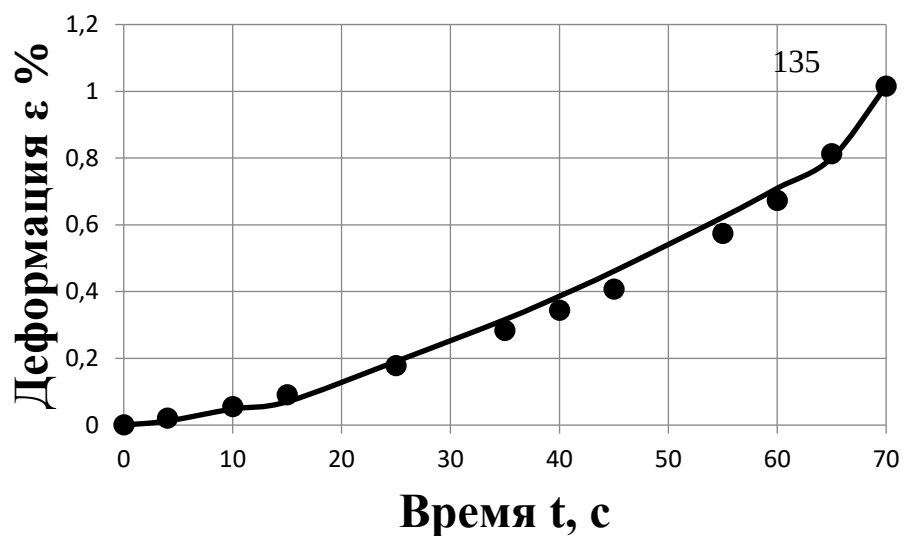


Рисунок 46. Кривые ползучести образца 135. $\dot{\sigma}=0,005754$
 •эксперимент — аппроксимация

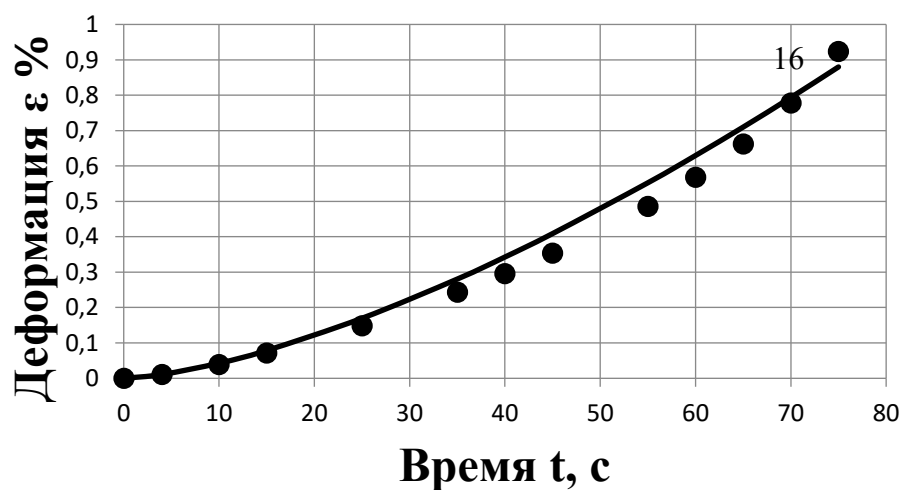


Рисунок 47. Кривые ползучести образца 16. $\dot{\sigma}=0,00565$
 •эксперимент — аппроксимация

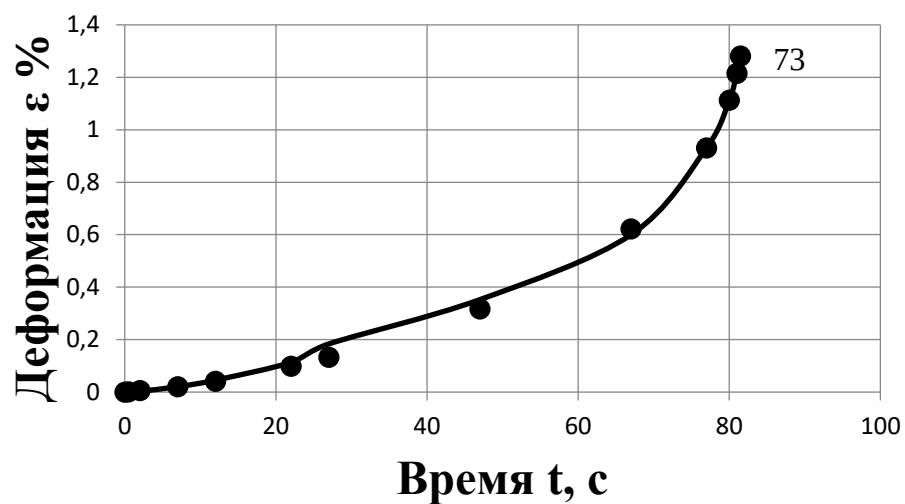


Рисунок 48. Кривые ползучести образца 73. $\dot{\sigma}=0,007115$
 •эксперимент — аппроксимация

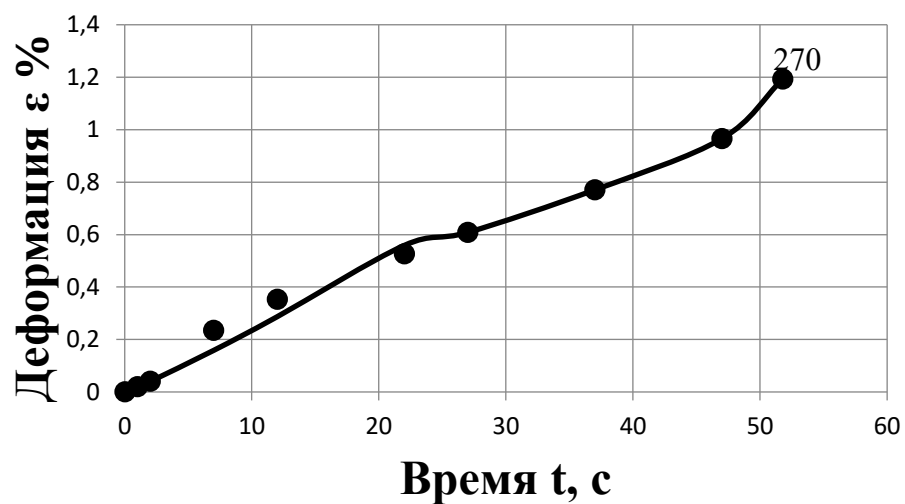


Рисунок 49. Кривые ползучести образца 270. $\dot{\sigma}=0,007373$
 •эксперимент — аппроксимация

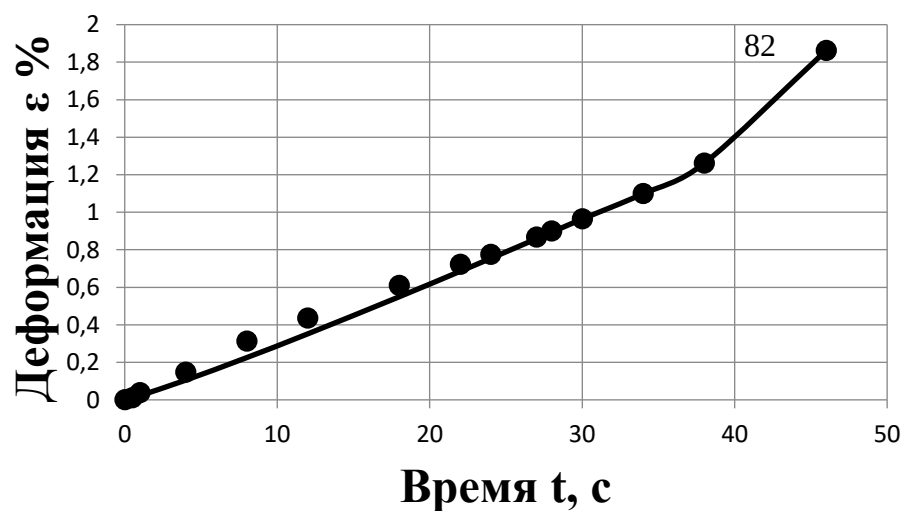


Рисунок 50. Кривые ползучести образца 82. $\dot{\sigma}=0,012111$

•эксперимент — аппроксимация

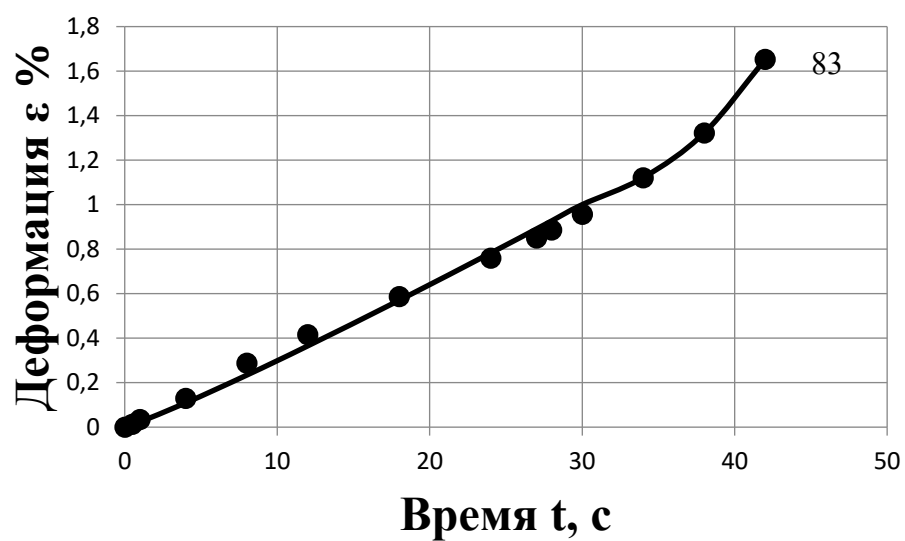


Рисунок 51. Кривые ползучести образца 83. $\dot{\sigma}=0,0113682$

•эксперимент — аппроксимация

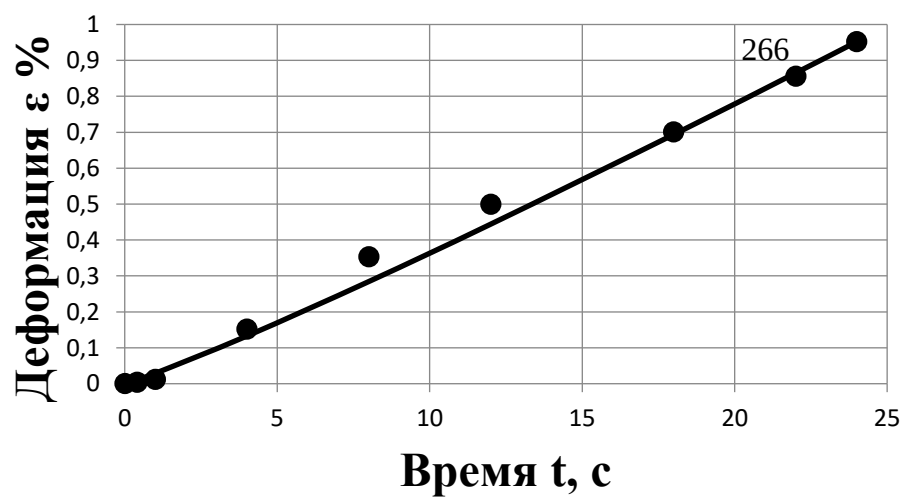


Рисунок 52. Кривые ползучести образца 266. $\dot{\sigma}=0,014876$

•эксперимент — аппроксимация

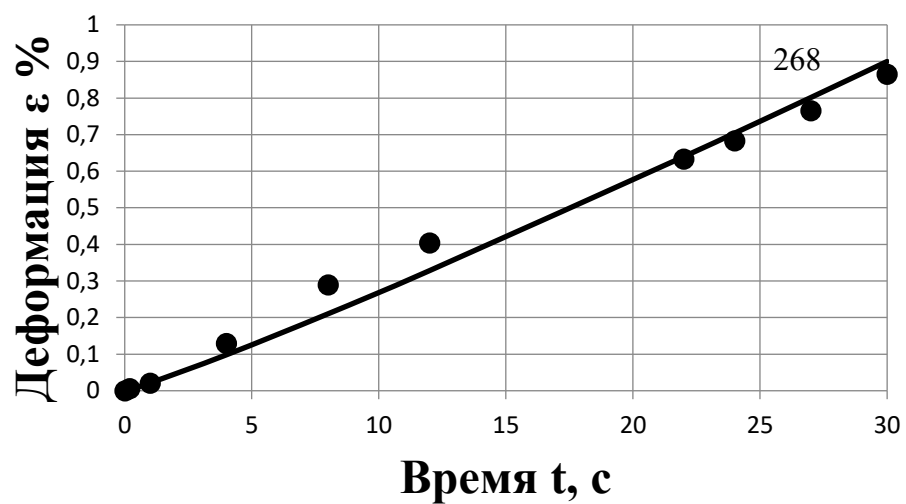


Рисунок 53. Кривые ползучести образца 268. $\dot{\sigma}=0,0114$
 •эксперимент — аппроксимация

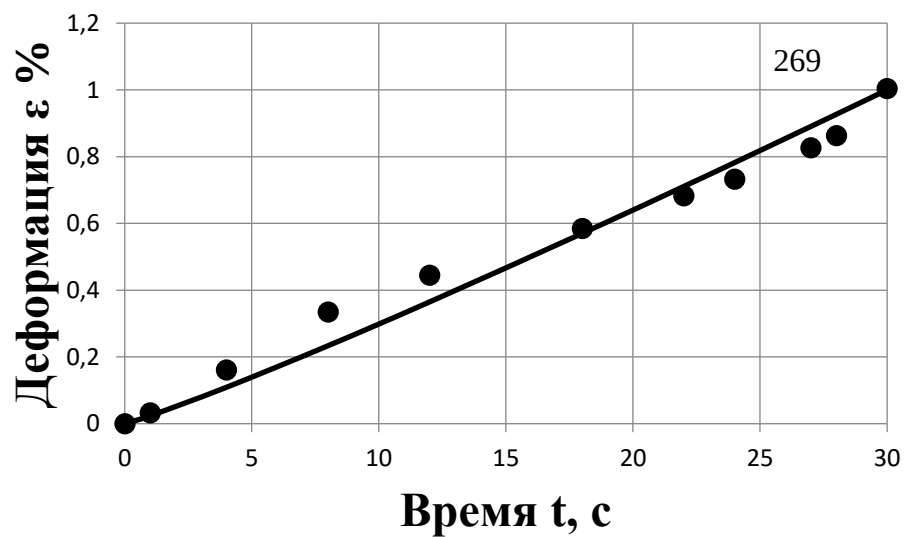


Рисунок 54. Кривые ползучести образца 269. $\dot{\sigma}=0,012784$
 •эксперимент — аппроксимация