

Санкт-Петербургский государственный университет

ПЕТРУЧОК Алексей Иванович

Выпускная квалификационная работа

**Применение оптико-акустической методики для исследования изменения
упругих характеристик конструкционных материалов**

01.04.03 – Механика и математическое моделирование
ВМ.5506.2021 – Механика и математическое моделирование
Механика деформируемого твердого тела

Научный руководитель:
Старший научный сотрудник,
Кандидат физико-математических наук
Арутюнян. А. Р.

Рецензент:
Доцент кафедры прикладной математики,
Государственный университет морского и речного флота
Имени адмирала С.О. Макарова,
Кандидат физико-математических наук
Денисова А. А.

Санкт-Петербург

2023

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

PETRUCHOK Aleksey Ivanovich

Master Thesis

**Application of optical-and-acoustic methodology for study of elastic
characteristics changes in constructional materials**

01.04.03 – Mechanics and mathematical modeling
BM.5506.2021 – Mechanics and mathematical modeling
Solid Mechanics

Scientific supervisor:
Senior researcher,
Ph.D. (phys – math)
Arutyunyan A. R.

Reviewer:
Associate Professor at the Department of Applied Mathematics,
Ph.D. (phys – math)
Denisova A.A.

Saint-Petersburg

2023

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор литературы.....	6
1.1 Основы оптико-акустической методики исследования свойств материалов	6
1.2 Изменение коэффициента поперечных деформаций при механических испытаниях	8
1.3 Работы по исследованию упругих характеристик материалов и изменения коэффициента поперечных деформаций	10
Глава 2. Цели исследования	13
Глава 3. Применение оптико-акустической методики для измерения упругих характеристик конструкционных материалов в процессе механических испытаний.....	14
3.1. Методика измерения упругих характеристик материалов оптико-акустическим методом в ходе механических испытаний	14
3.2. Экспериментальное исследование изменений упругих характеристик конструкционных материалов в опытах на простое растяжение с использованием оптико-акустического метода	19
3.3. Экспериментальное исследование изменения упругих характеристик образцов капролона в серии испытаний на растяжение и ползучесть с использованием оптико-акустического метода.....	25
Выводы.....	28
Глава 4. Энергетический баланс в процессе механических испытаний	30
4.1. Расчет энергетического баланса конструкционных материалов при механических испытаниях на растяжение	30
Выводы.....	36
Заключение	38
Список использованной литературы.....	41

Введение

В настоящее время всё больше и больше в различные сферы инфраструктуры внедряются полимерные и композиционные материалы на их основе, такие как оргстекло, капролон, углепластик и прочее. Они, в отличие от металлов, обладают большей лёгкостью, коррозионной прочностью и меньшей плотностью. Исследования эволюции упругих характеристик в полимерных конструкционных материалах являются важной задачей материаловедения, позволяющей повысить безопасность производственных объектов, установить наличие критических дефектов и устранять браки на начальных стадиях производства.

Диаграмма растяжения, построенная по деформации образца, характеризует поведение материала при деформировании. Она даёт возможность проводить анализ неупругих явлений в твёрдом теле по продольным деформациям. Однако такого же рода анализ можно провести по записям поперечных деформаций. На изменение величины поперечных деформаций в большей степени сказывается состояние деформируемого тела. Следовательно, закономерности изменения поперечных деформаций дают более полную информацию о неупругих явлениях [1]. Механические свойства материалов позволяют оценить остаточный ресурс детали. Поэтому разработка оперативных неразрушающих методов контроля имеет особое значение.

В данной работе рассмотрено применение оптико-акустического метода для оценки напряжённо-деформированного состояния и структурных преобразований на некоторых материалах (в основном полимерные и композиционные материалы). В частности, исследуются изменения коэффициента поперечных деформаций, скоростей продольных и поперечных волн.

Проведены экспериментальные исследования эволюции упругих характеристик образцов из меди, углепластика, оргстекла, капролона и эпоксидной смолы в опытах на растяжение и ползучесть.

Также в работе исследован энергетический баланс в ходе испытаний на растяжение образцов из капролона с учетом разделения работы внешних сил по деформации тела на энергию изменения объема и энергию сдвиговых деформаций.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Основы оптико-акустической методики исследования свойств материалов

Для исследования изменения структуры различных материалов используются различные методы диагностики, в том числе и неразрушающие методы контроля, которые позволяют проводить исследование материалов без их разрушения. Данные методы основываются на наблюдении, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических явлений с объектом исследования.

В основе оптико-акустического (ОА) метода лежит ОА эффект. Под данным эффектом подразумевают генерацию акустических волн в веществе в результате поглощения оптического излучения. Впервые это явление было описано в 1881 г. Рентгеном и Тиндалем. Изначально этот эффект применялся на практике для количественного и качественного анализа газовых смесей, измерения слабых потоков оптического излучения, определения времени жизни возбуждённых состояния атомов, исследования спектров поглощения газов и паров с низким спектральным разрешением и т.д. [2].

ОА метод является калориметрическим методом, основанным на регистрации и анализе характеристик ультразвуковых волн, распространяющихся в среде. Преимущество ОА методов заключается в проведении бесконтактной дефектоскопии и очень широким спектральным составом возбуждаемого акустического импульса. В течении последних лет исследования ОА эффекта показали возможность его применения для неразрушающего контроля материалов. Особенно перспективно применение лазерных методов для возбуждения акустических импульсов [3, 4].

На данный момент существует несколько лазерных систем для исследования физико-механических свойств твёрдых тел. Лазерные методы

возбуждения и регистрации акустических импульсов позволяют получать более полную информацию о структуре материала путем анализа эволюции формы распространяющихся акустических импульсов. Широкий спектральный состав возбуждаемых акустических импульсов позволяет создавать устройства с высокой разрешающей способностью для проведения измерения частотных зависимостей дисперсии, скорости звука и затухания. Помимо этого, метод позволяет легко повышать амплитуду акустических импульсов, что делает его весьма перспективным для проведения исследований и дефектоскопии.

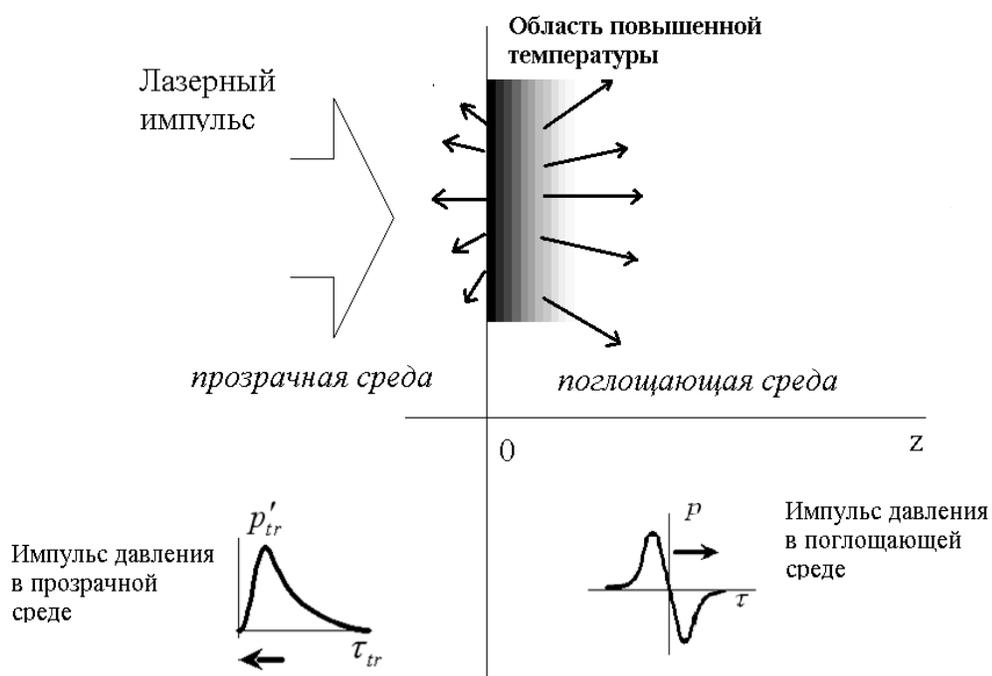


Рис 1. Принцип лазерного термооптического возбуждения ультразвуковых импульсов. Стрелками показано направления смещения частиц поглощающей среды при её тепловом расширении. Заштрихованный участок – область повышенной температуры.

Принцип лазерного термооптического возбуждения схематически показан на рис. 1. Лазерный импульс с длительностью τ_L падает из прозрачной среды на поверхность поглощающей среды. При поглощении импульса происходит неоднородный нагрев поверхностного слоя. За счёт этого нагрева поглощающая

среда расширяется и в ней, как и в прозрачной среде, начинают распространяться импульсы акустических волн $p(\tau)$ и $p_{tr}(\tau_{tr})$ соответственно. Форма и амплитуда возбуждаемого ультразвукового импульса определяются как параметрами лазерного излучения (интенсивность и длительность импульса, диаметр пятна), так и теплофизическими параметрами поглощающей среды (коэффициент поглощения света, коэффициент теплового расширения, теплоёмкость).

1.2 Изменение коэффициента поперечных деформаций при механических испытаниях

В твёрдых телах анализ неупругих явлений позволяет получать диаграммы, построенные в испытаниях на растяжение или сжатие. По ним можно определить величину продольных деформаций, по которой можно судить о способности тела оказывать сопротивление внешним нагрузкам. Подобного рода анализ можно проводить по деформациям, возникающим по направлениям, ортогональным направлению приложения нагрузки, так называемым «поперечным» деформациям. Как известно, коэффициент Пуассона, определяющий отношение поперечной деформации к продольной, является упругой константой. Однако она перестаёт быть постоянной за пределами упругости. В литературе для отношения поперечной и продольной деформации в пластической области существует другой термин – коэффициент поперечных деформаций μ [5].

Анализ закономерностей изменения поперечных деформаций даст более богатую информацию о неупругих явлениях. Это утверждение основывается на том, что поперечные деформации происходят в направлениях, в которых не действует нагрузка, приложенная к телу. Деформируемое тело как бы трансформирует влияние внешних сил в действие, ортогональное приложенной

нагрузке. У разных твёрдых тел данный процесс различен и зависит от состояния тела. Таким образом, поперечные деформации в значительной степени зависят от обоих свойств: как от способности твёрдого тела сопротивляться деформируемым силам, так и способности твёрдого тела преобразовывать внешнюю нагрузку в ортогональное действие. Следовательно, на величине поперечных деформаций больше сказывается развивающиеся в твёрдом теле неупругие явления. В связи с этим закономерности поведения поперечных деформаций несут большую информацию о процессах в твёрдых телах, чем закономерности продольных. Например, с увеличением пористости твёрдого тела коэффициент Пуассона падает, а при нагревании μ приближается к значению 0,5. Такая зависимость $\mu(T)$ подтверждается результатами многих работ, выполненных для различных материалов при различных температурах [6, 7].

Анализ зависимости между неупругими явлениями и коэффициентом поперечных деформаций μ может характеризовать изменения таких механических свойств в области пластичности, как хрупкость и текучесть. Однако данную взаимосвязь требуется рассматривать в полуколичественном плане, как тенденцию, трудно поддающуюся аналитическому описанию из-за сложной зависимости свойств хрупкости и текучести от структурных факторов. Было подтверждено [8], что при уменьшении пластичности уменьшается коэффициент Пуассона. Аналогично действуют и другие факторы, например, с повышением содержания углерода в отожженной углеродистой стали её пластические свойства уменьшаются вместе с коэффициентом Пуассона.

1.3 Работы по исследованию упругих характеристик материалов и изменения коэффициента поперечных деформаций

Применение ОА метода для исследования структуры материалов в частности рассматривалось в работах [9, 10, 11]. Исследования изменения коэффициента поперечных деформаций проводились в работах [12, 13, 14, 15, 16].

В работе [9] был предложен и экспериментально реализован лазерный ОА метод локального измерения упругих модулей изотропных композиционных материалов. Исследовались образцы на базе алюминиевых сплавов *AK12M2MgH* и *AK12*, упрочнённых частицами. ОА методом измерялись фазовые скорости продольных и сдвиговых акустических волн в центре и на периферии образцов. По этим данным были измерены локальные упругие модули (модуль сдвига G , модуль Юнга E , коэффициент Пуассона μ). Было выявлено, что образцы, изготовленные на основе сплава *AK12* и упрочнённых частицами SiC_{28} , имели максимальные значения модуля Юнга. Тем временем для слишком неоднородных или пористых образцов наблюдалась разница в упругих коэффициентах в центре и на периферии образцов.

В работе [10] исследовалось циклическая долговечность конструкционных материалов ОА методом. Образцы из стали и ПММА испытывались на циклический изгиб с частотой 15 Гц и длительностью нагрузки ≈ 12 мс. Каждые $5 * 10^4$ циклов проводился контроль изменения структуры образца методом оптико – акустической спектроскопии. Анализ осциллограмм позволил определять такие характеристики материалов как скорость звука, затухание и изменение спектров акустических сигналов при распространении по образцу, модуль Юнга. Из результатов экспериментов следует, что на начальном этапе циклических нагружений имеет место

адаптация прочностных свойств материала к внешним нагрузкам. Такое поведение обуславливается стремление к минимизации внутренней энергии за счёт перестройки структуры. И только по завершению этого этапа начинается накопление повреждений.

Диссипация энергии и изменения коэффициента поперечных деформаций в ходе квазистатического растяжения металлов были исследованы в работе [11]. В процессе растяжения образцов стали и меди с помощью ОА метода измерялись скорости продольных и поперечных волн. На основе полученных данных исследовался характер изменения коэффициента поперечных деформаций, коэффициента упрочнения. Было показано, что существенные изменения термодинамических и механических параметров процесса пластического деформирования коррелируют со стадиями пластического деформирования.

Работа [12] посвящена исследованию коэффициента поперечных деформаций в пластической области непосредственно из опытов на растяжение. Испытания проводились на сплошных цилиндрических образцах из различных марок стали и меди. Использовались два тензометра, один для продольных деформаций другой для поперечных. Было выявлено, что коэффициент поперечных деформаций наиболее интенсивно увеличивался с момента начала пластических деформаций.

В работе [13] исследовалось изменение коэффициента Пуассона при релаксации напряжений. Испытывались плоские образцы из отожжённой меди и отожжённого алюминия. Опыт состоял из двух этапов: нагрузки образца до 300, 500 или 1000 часов и последующей разгрузки. На каждом этапе измерялись продольные и поперечные деформации. Было выявлено, что после разгрузки вместо ожидаемого значения $\mu = 0,50$ в действительности коэффициент Пуассона оказывался несколько меньше.

В исследовании [14] проводились измерения коэффициента поперечных деформаций хромоникелевой стали в испытаниях на растяжение. Была предложена методика определения коэффициента μ на основании диаграммы деформации. Испытания проводились до деформации $\varepsilon = 3\%$. Результат показал согласованность расчётных и экспериментальных данных.

В работе [15] была предложена методика по вычислению коэффициента Пуассона. Стали марок Ст 40 и Ст 45 подвергались двухчасовому отпуску при 680° и последующему деформированию на 10%. Исследование коэффициента поперечных деформаций проводилось по методике, основанной на измерении плотности образца до и после деформации. Предложенный способ позволял определить μ с точностью до 1%.

Глава 2. Цели исследования

Целью данной работы является экспериментальное исследование эволюции упругих характеристик, а также энергетического баланса конструкционных материалов в процессе механических испытаний с использованием оптико-акустического метода.

Для достижения данной цели требуется решить следующие задачи:

1. Обзор литературы по изменению коэффициента поперечных деформаций при механических испытаниях, а также по применению оптико-акустического метода для исследования упругих характеристик материалов и изменения коэффициента поперечных деформаций.
2. Экспериментальное исследование изменения скоростей распространения продольных и поперечных волн непосредственно в процессе механических испытаний для образцов из меди, капролона, ПММА, углепластика и эпоксидной смолы с использованием оптико-акустического метода. Расчет изменений коэффициента поперечных деформаций в процессе механических испытаний.
3. Экспериментальное исследование изменения коэффициента поперечных деформаций образцов из капролона в серии испытаний, состоящей из экспериментов на растяжение и ползучесть при комнатной температуре.
4. Исследование энергетического баланса в ходе испытаний на растяжение образцов из капролона с учетом разделения работы внешних сил по деформации тела на энергию изменения объема и энергию сдвиговых деформаций.

Глава 3. Применение оптико-акустической методики для измерения упругих характеристик конструкционных материалов в процессе механических испытаний

3.1. Методика измерения упругих характеристик материалов оптико-акустическим методом в ходе механических испытаний

В рамках данной работы были исследованы следующие материалы: медь М1, углепластик T26/22502/1131636, полиамид-6 блочный (капролон), эпоксидная смола и ПММА ТОСП. Растяжение образцов проводилось на испытательной машине Tinius Oslen 10ST при комнатной температуре. Во время испытаний параллельно измерялась температура образцов, которая определялась по инфракрасному излучению, регистрируемому с частотой 50 Гц тепловизионной камерой ThermoCAM SC 3000. Исследование упругих характеристик в образцах проводилось на основе ОА метода, который основывается на возбуждении акустических импульсов путём лазерного воздействия на поверхность образца. С обратной стороны образца находится датчик, вырезанный из пьезокерамики. Направление поляризации пьезокерамики составляет 45° , что позволяет регистрировать как продольные так и поперечные акустические волны одновременно. Регистрация сигналов с пьезодатчика осуществлялась цифровым осциллографом Lecroy с $\Delta f=600$ МГц.

В ходе испытаний для полимеров и металлов использовались образцы в виде двусторонних лопаток, для композитов – в виде полосок с накладками. Размеры и геометрия испытанных образцов представлены на рис. 2. Размеры указаны в миллиметрах. Толщины образцов были следующими: медь – 2 мм, углепластик – 0,8-1 мм, капролон – 6,6 мм, эпоксидная смола – 2,9 мм и ПММА – 3.56 мм.

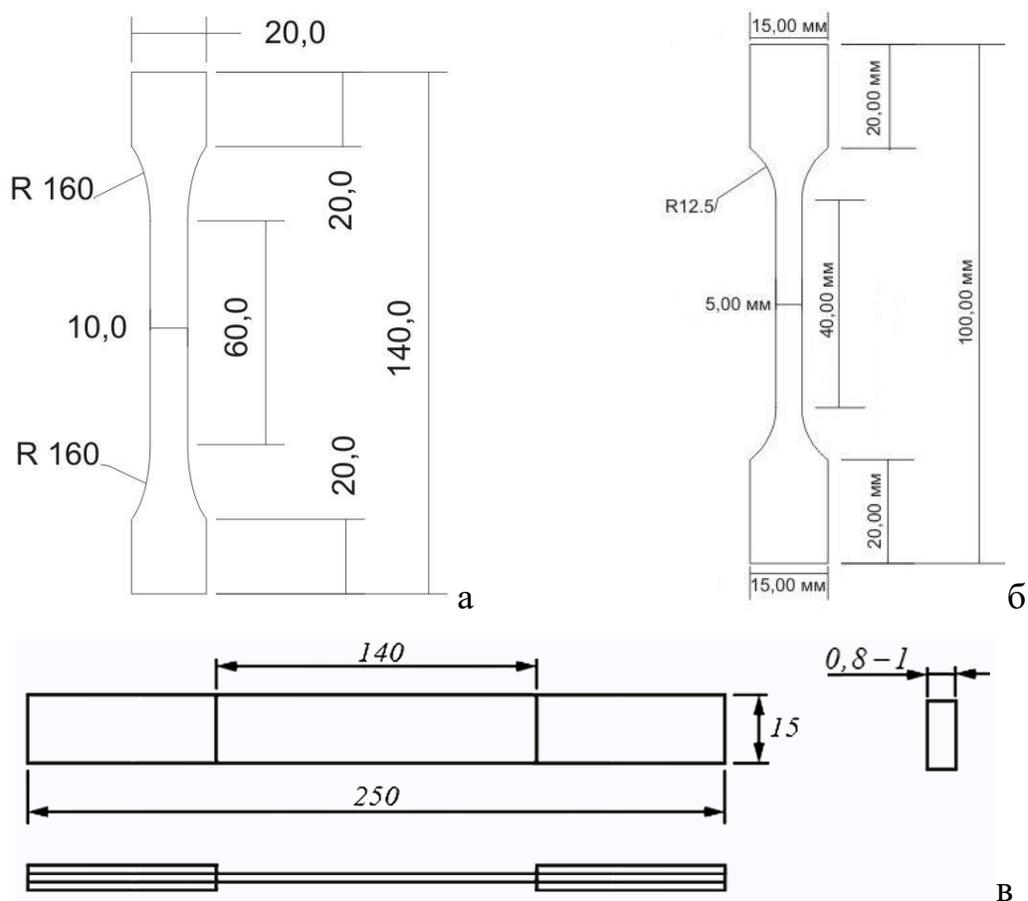


Рис. 2. Геометрические размеры образцов из полимеров (а), металлов (б) и композитов (в) (размеры указаны в миллиметрах).

На рис. 3 представлена блок схема эксперимента. Для возбуждения акустических импульсов используется лазер 1. Импульс лазера с длительностью порядка 10^{-8} с и энергией $\leq 10^{-3}$ Дж направляется по оптическому кварцевому волокну 2 диаметром 0,9 мм, которое закрепляется на одной стороне образца с помощью стандартного разъёма. Разъём позволяет сменить оптоволокно в случае его повреждения. Лазерный импульс, выведший из волокна, падает на поверхность образца 3. Акустические импульсы регистрируются датчиком из пьезокерамики 4 толщиной 3 мм, который вырезался из толстой плоскопараллельной пластины пьезокерамики ЦТС19 под углом 45° к направлению ее поляризации. Далее сигнал идёт к усилителю 5 и затем на

цифровой осциллограф 6. Лазерный импульс также регистрируется и сигнал идёт на осциллограф.

Основное преимущество такого подхода заключается в возможности проведения измерений ОА методом прямо во время испытаний. Акустический контакт пьезодатчика с образцом обеспечивается через тонкий слой акустического геля. В экспериментах обычно сигнал представлял собой осциллограмму, содержащую зарегистрированные акустические импульсы.

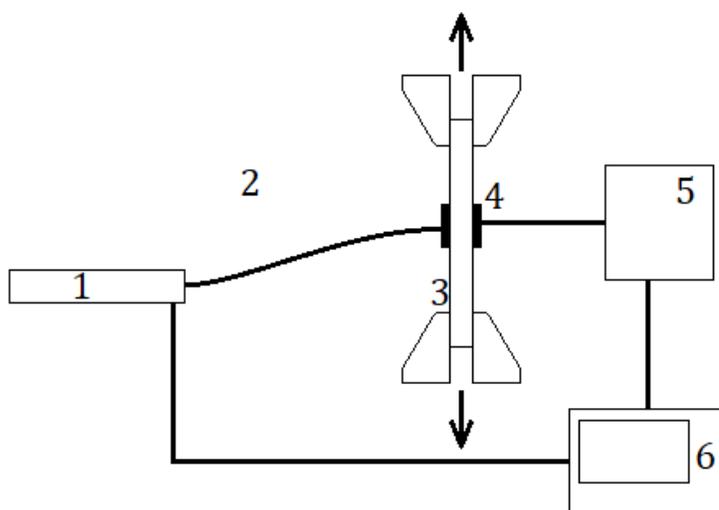


Рис 3. Блок схема методики проведения эксперимента: 1 – лазер, 2 – оптическое волокно, 3 – образец, 4 – пьезодатчик, 5 – усилитель, 6 – осциллограф.

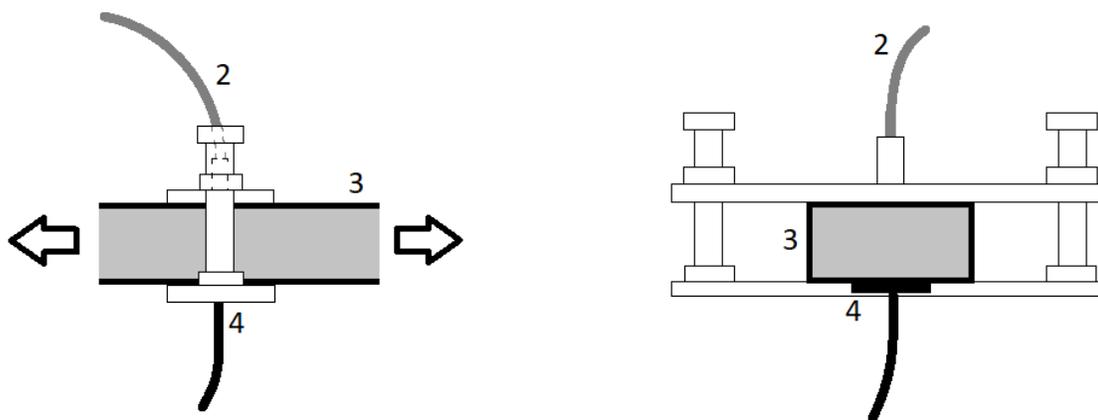


Рис. 4. Схема закрепления выхода оптического волокна к образцу: 2 – оптическое волокно, 3 – образец, 4 – пьезодатчик. Стрелками показано направление нагрузки при испытании.

На рис. 4 показан метод закрепления пьезодатчика и оптического волокна к образцу.

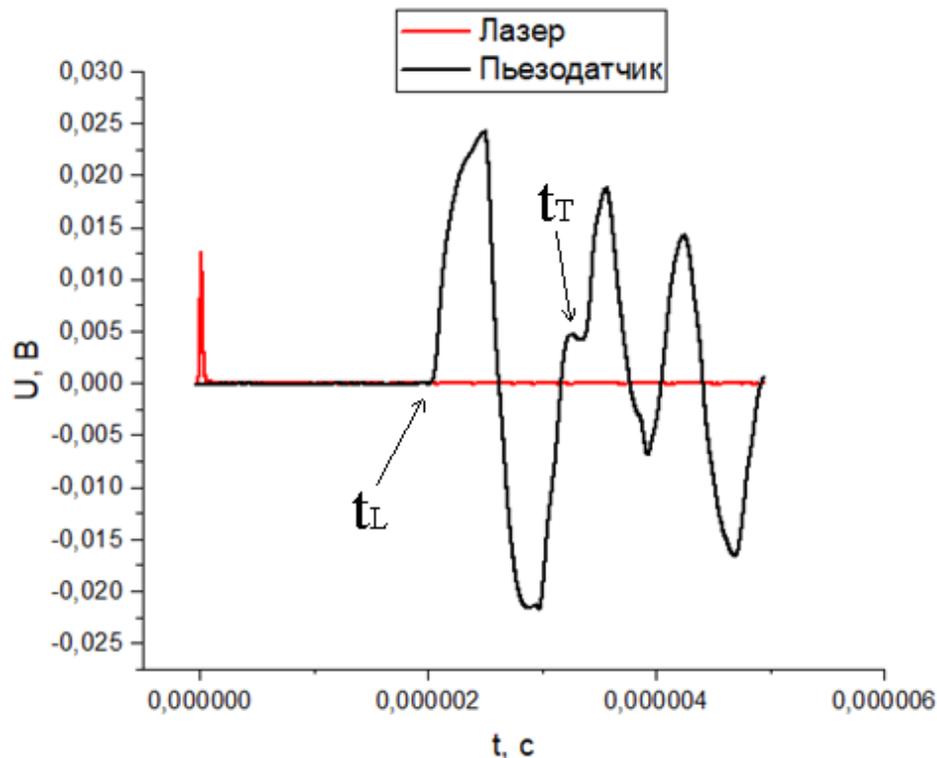


Рис. 5. Осциллограмма зарегистрированного акустического импульса образца меди и лазерного импульса. t_L и t_T – времена прихода продольной и поперечной волн соответственно.

На рис. 5 показана осциллограмма, полученная при исследовании образца из меди. На ней видно несколько характерных положительных импульсов, соответствующих приходу акустических волн. Первый соответствует продольной акустической волне, как самой быстрой. Зная толщину образца h можно вычислить скорость продольной волны V_L . Чтобы найти на графике пик, характеризующий приход поперечной волны, образец заранее был исследован ОА методом до испытаний. Для нахождения нужного пика использовались табличные данные о коэффициентах Пуассона рассматриваемых материалов.

Таким образом, с помощью ОА метода можно определить скорость продольных и поперечных волн в материале на протяжении всей длительности испытания.

Зная скорости V_L и V_T продольных и поперечных волн можно рассчитать текущий коэффициент поперечных деформаций μ по следующей формуле:

$$\mu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (1)$$

Предложенная методика позволяет измерять скорости V_L и V_T в любой момент времени в течении эксперимента. Для исследования изменения μ в каждом испытании осуществлялась генерация лазерного импульса с частотой 1 Гц, т.е. каждую секунду. Ещё одним преимуществом предложенной методики заключается в поляризации пьезокерамики, из которой сделан датчик для регистрации акустических импульсов. Поляризация в 45° позволяет измерять обе скорости одним датчиком, а не двумя, что увеличивает точность измерений. Положительно сказывается на точности и область измерения предложенного датчика, которая составляет примерно 0,5 мм в диаметре.

Соотношение (1) может применяться и для условий неупругого состояния испытуемого материала при малых скоростях деформирования, т.е. в условиях квазиравновесного состояния среды. Возможности использования соотношения (1) для определения коэффициента поперечной деформации в условиях пластического деформирования достаточно обосновано [16,17,18].

При этом диагностика состояния среды должна осуществляется за времена много меньшие времени изменения параметров нагружения, а энергия, переносимая акустическим импульсом, должна быть много меньше характерных энергий активации механизмов пластической деформации. Методика оптоакустической диагностики в этом плане полностью удовлетворяет указанным требованиям. При использовании ОА метода зондирование образца происходит короткими акустическими импульсами,

возбуждаемыми лазерным импульсом с длительностью порядка 10^{-8} с. При этом величины деформаций в упругом импульсе, возбуждаемом в данной методике, не превышают $10^{-(6\div 5)}$. Время диагностики образцов с толщинами порядка $1\div 3$ мм составляет величину порядка $(1\div 5)\times 10^{-6}$ с, то есть при скорости движения захвата машины равной 5 мм/мин изменение $\sigma(\varepsilon)$ за время диагностики практически отсутствует.

С учетом всего вышесказанного, применение соотношения (1) для определения коэффициента поперечной деформации является вполне приемлемой.

3.2. Экспериментальное исследование изменений упругих характеристик конструкционных материалов в опытах на простое растяжение с использованием оптико-акустического метода

Экспериментальное исследование изменений упругих характеристик для образцов из меди, углепластика, ПММА и эпоксидной смолы проводилось следующим образом. Образцы были испытаны на растяжение, при этом каждую секунду лазер посылал импульс, который проходя по оптоволокну попадал на поверхность образца. Возбуждаемые акустические волны регистрировались пьезодатчиком, сигнал с которого сначала поступал на усилитель и затем на осциллограф.

Экспериментальные результаты показаны на рис. 6-10. На данных рисунках представлены диаграммы $\sigma - \varepsilon$, графики изменения скоростей продольных и поперечных волн и коэффициента поперечных деформаций в рассматриваемых материалах. Все испытания на растяжение проводились со скоростью 5 мм/мин до разрушения.

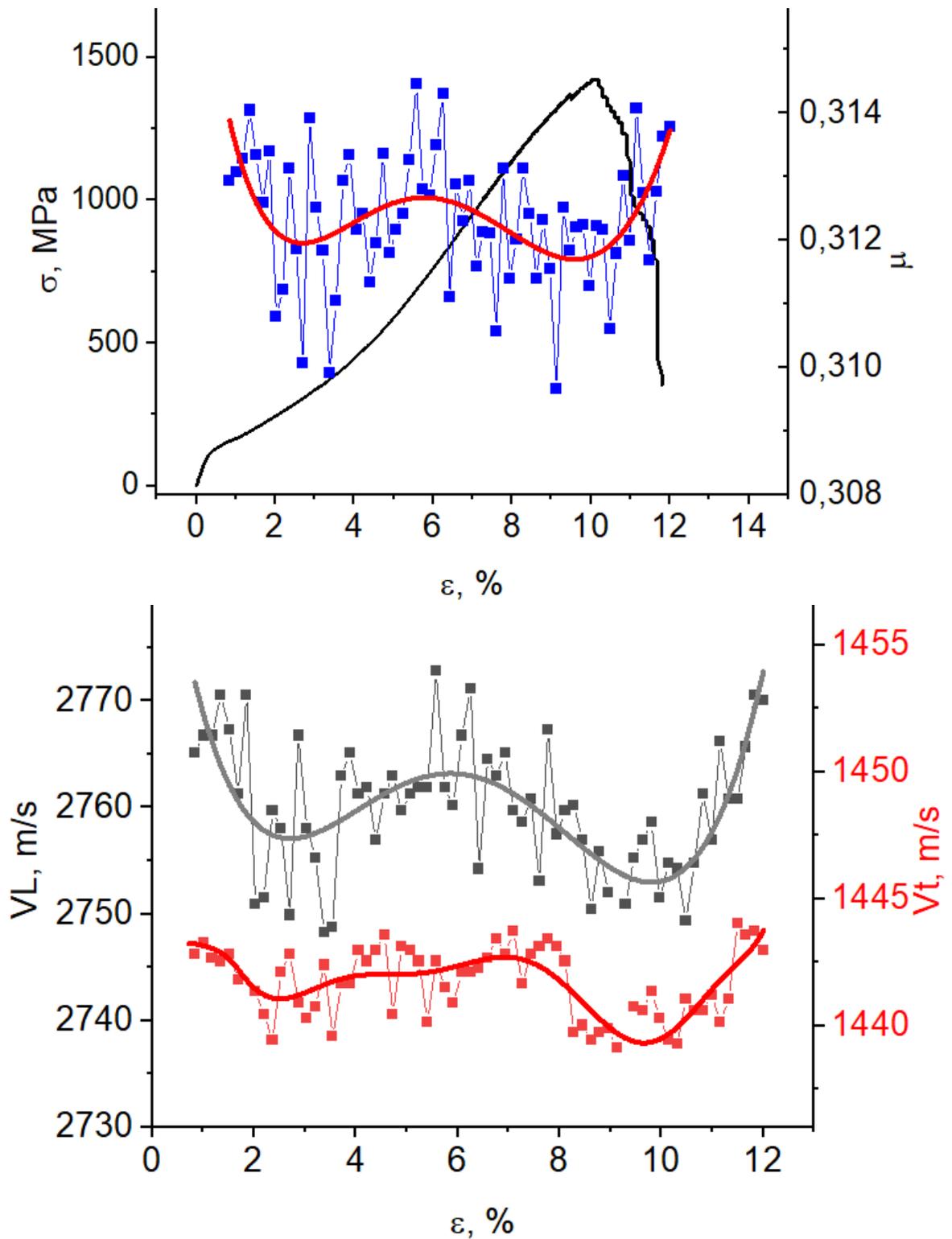


Рис. 6. Экспериментальные результаты для образца углепластика: диаграммы $\sigma - \epsilon$, изменение коэффициента поперечных деформаций μ и скоростей продольных и поперечных волн.

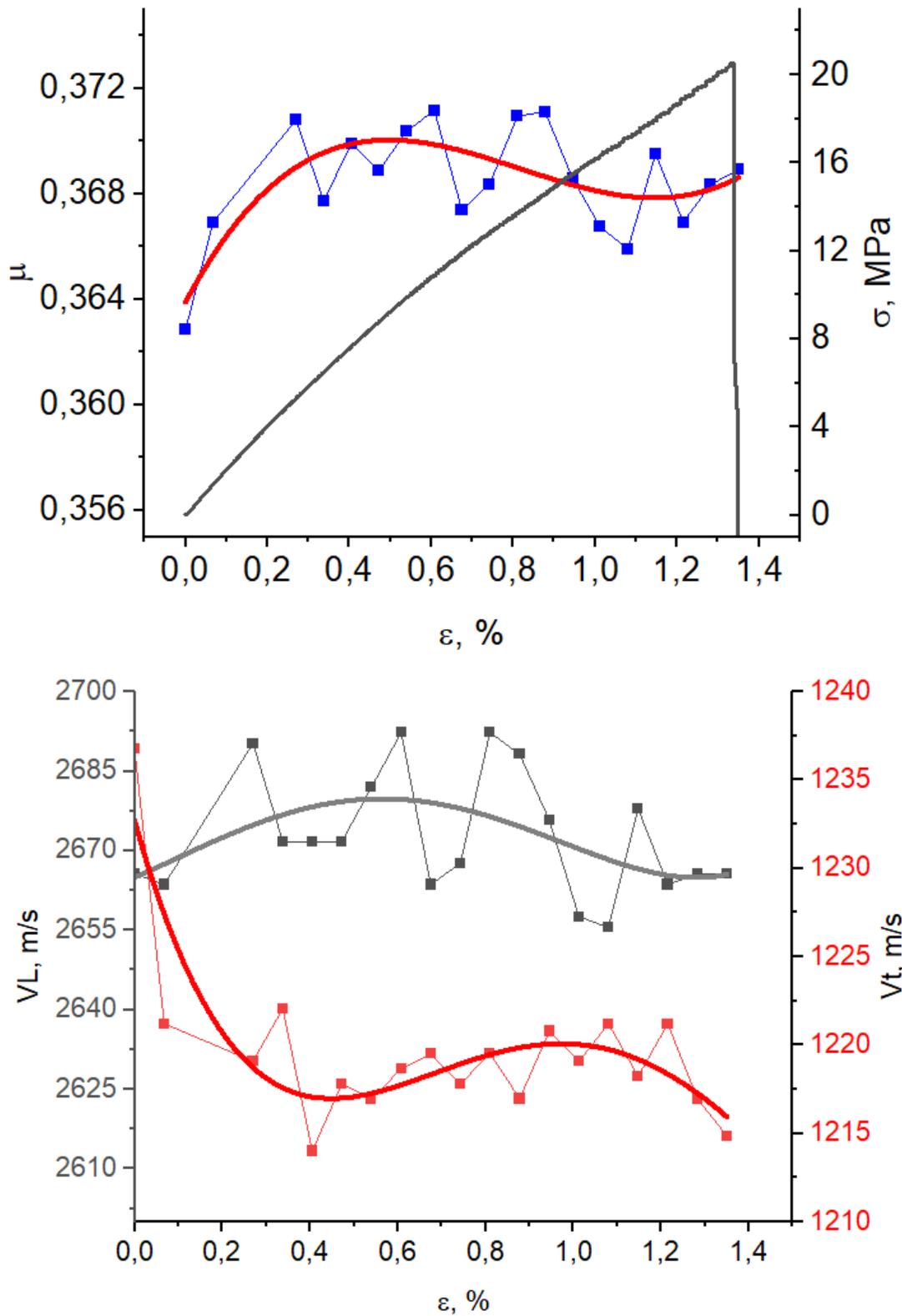


Рис. 7. Экспериментальные результаты для образца из ПММА: диаграммы $\sigma - \epsilon$, изменения коэффициента поперечных деформаций μ и скоростей продольных и поперечных волн.

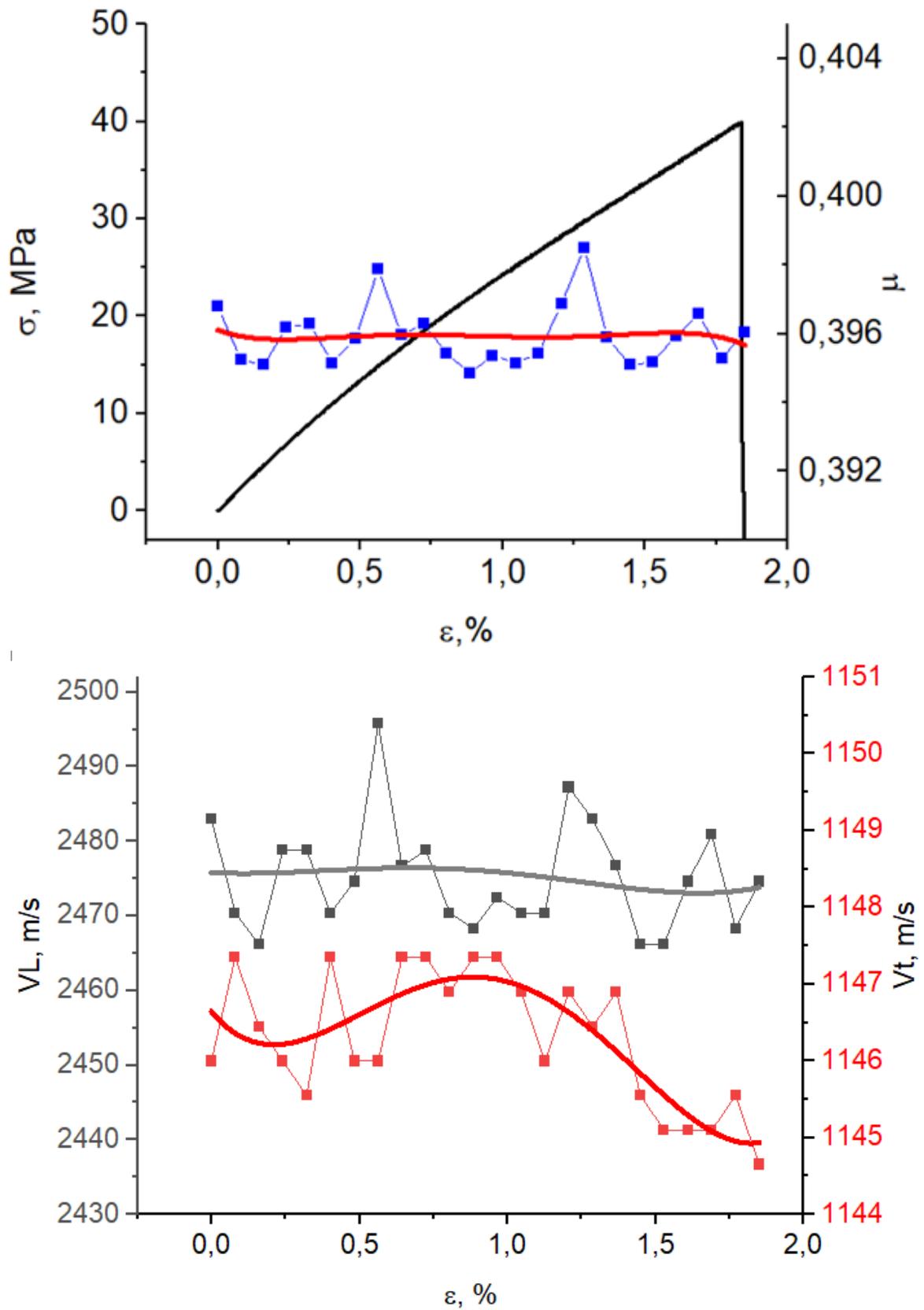


Рис. 8. Экспериментальные результаты для первого образца из эпоксидной смолы: диаграммы $\sigma - \epsilon$, изменения коэффициента поперечных деформаций μ и скоростей продольных и поперечных волн.

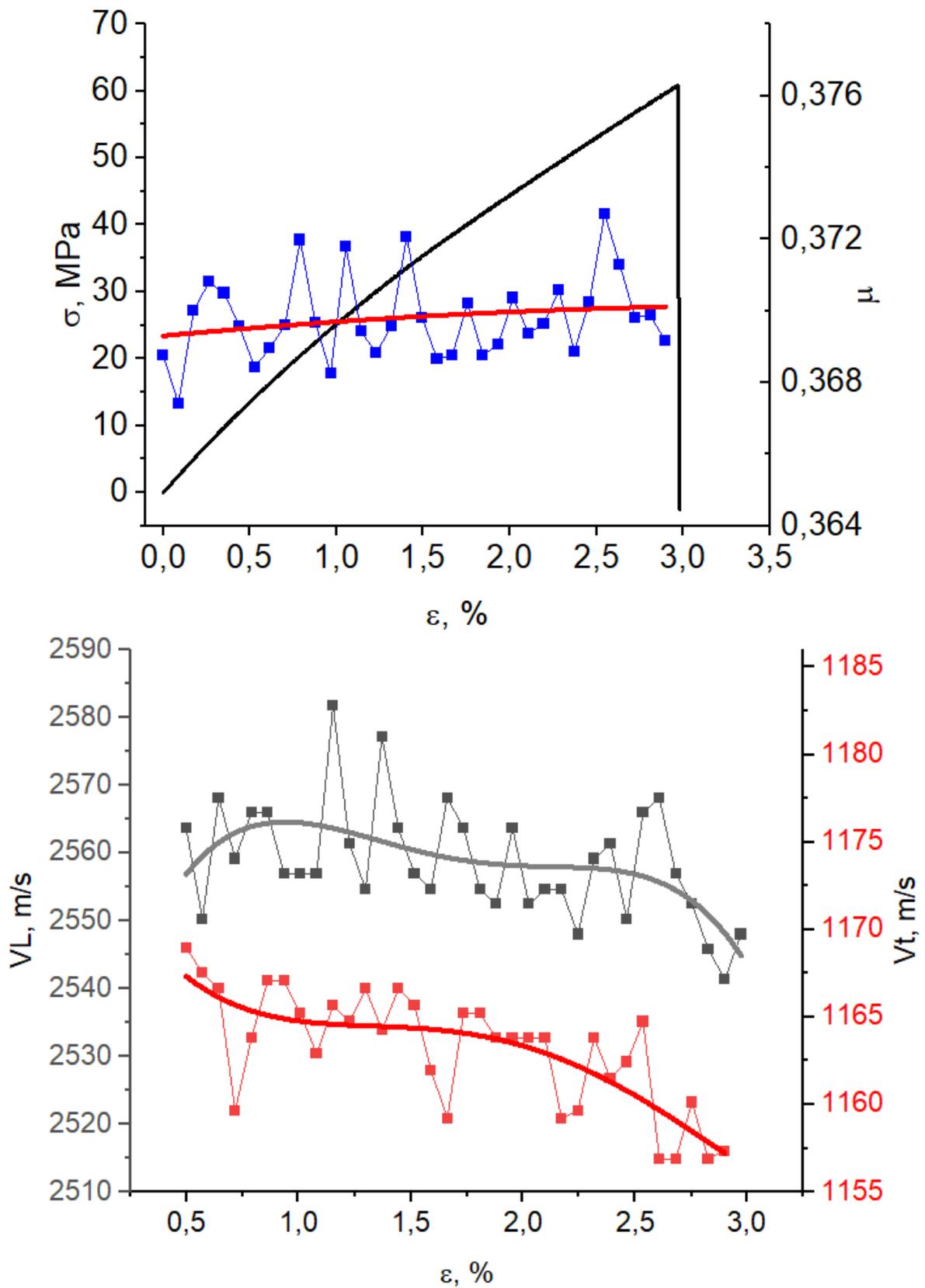


Рис. 9. Экспериментальные результаты для второго образца из эпоксидной смолы: диаграммы $\sigma - \epsilon$, изменения коэффициента поперечных деформаций μ и скоростей продольных и поперечных волн.

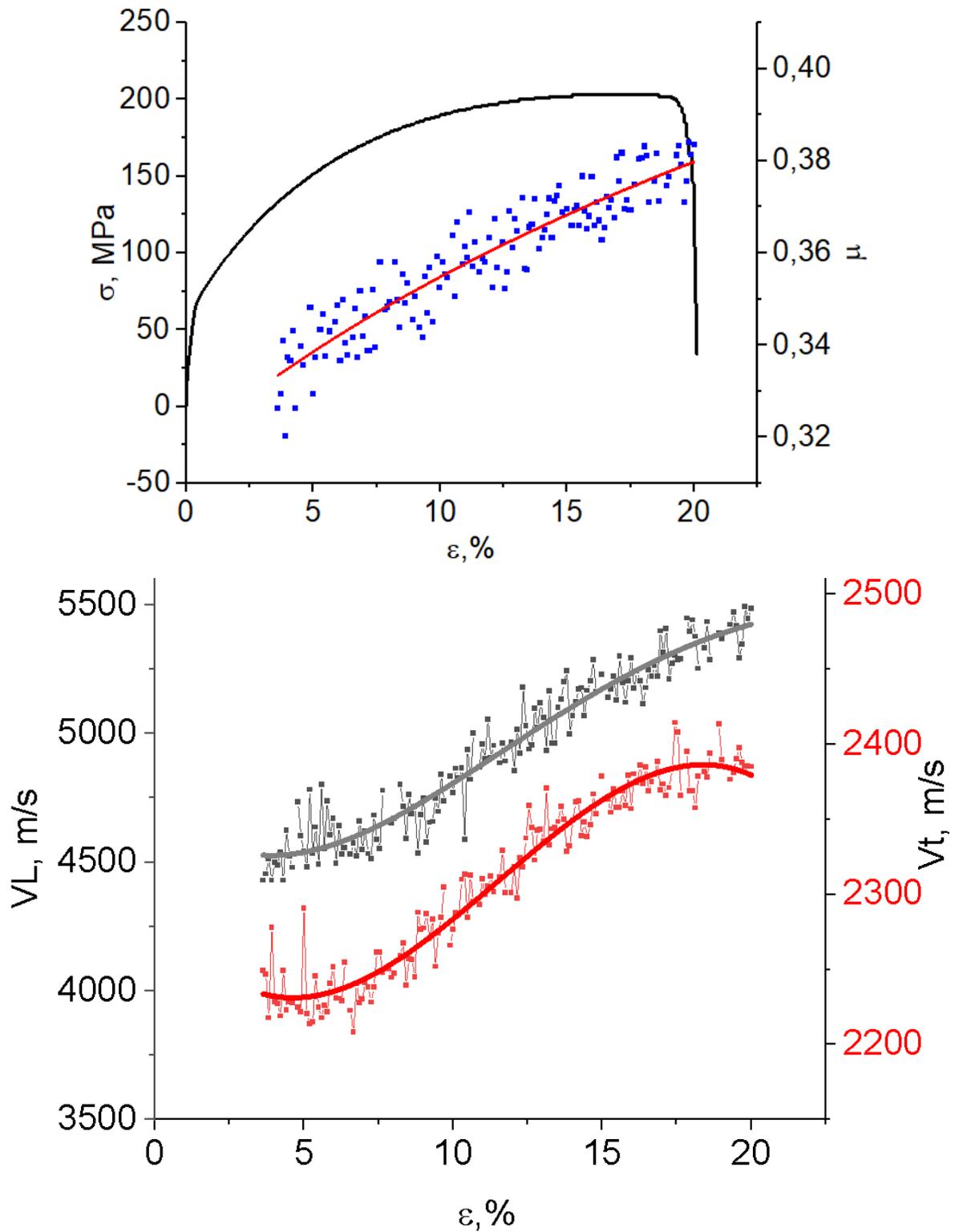


Рис. 10. Экспериментальные результаты для образца меди: диаграммы $\sigma - \epsilon$, изменения коэффициента поперечных деформаций μ и скоростей продольных и поперечных волн.

Экспериментальные данные показывают, что для образцов из ПММА, углепластика и эпоксидной смолы не наблюдалось значительного изменения коэффициента поперечных деформаций. Для меди с ростом деформации наблюдается возрастание как скоростей акустических волн, так и коэффициента поперечных деформаций. Данный результат согласуется со многими исследованиями. Рост μ в пластической области обуславливается пластическим течением частей микрообъемов тела.

3.3. Экспериментальное исследование изменения упругих характеристик образцов капролона в серии испытаний на растяжение и ползучесть с использованием оптико-акустического метода

Эксперименты по исследованию эволюций упругих характеристик для образцов из капролона проходили по следующей программе:

- Простое растяжение со скоростью 5 мм/мин до нагрузки $\sigma^* = 67$ МПа без разрушения. Данная величина на диаграмме $\sigma - \varepsilon$ находится вблизи временного сопротивления, чтобы образец подвергся пластическим деформациям, но в тоже время еще не разрушился.
- Испытание на ползучесть в течение 4 часов при постоянной нагрузке σ_{pol} . Эксперименты проводились при уровнях нагрузки 45 МПа и 35 МПа, при этом образцы не доводились до разрушения.
- Испытание на растяжение до разрушения образца со скоростью 5 мм/мин.

Между этапами испытаний образцы восстанавливались в течение нескольких дней, для релаксации напряжений. Во время первого и третьего этапа на протяжении всего процесса деформирования каждую секунду проводилось измерение скоростей продольных и поперечных волн ОА методом.

В испытании на ползучесть данные измерения проводились только на начальном этапе нагружения, когда напряжение растёт от 0 до σ_{pol} . Полученные экспериментальные кривые показаны на рис. 11 и рис. 12.

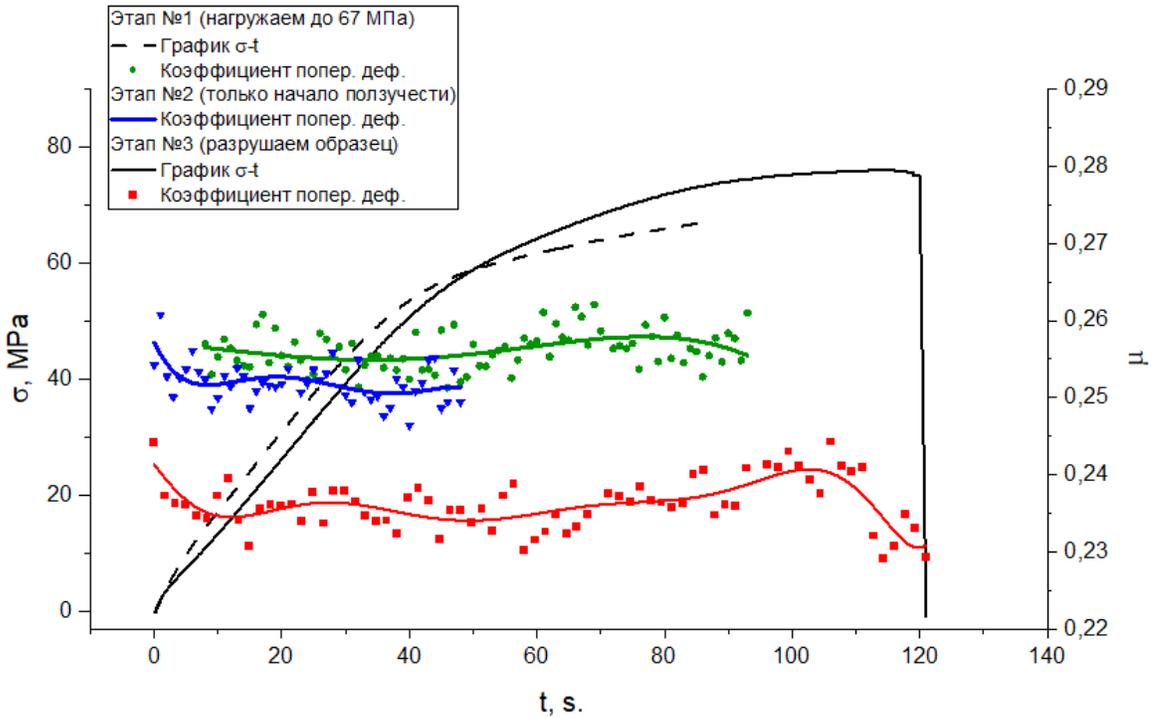


Рис. 11. Экспериментальные результаты для первого образца капролона, испытанного на ползучесть с нагрузкой $\sigma_{pol} = 35$ МПа: диаграммы $\sigma - t$ первого и третьего этапа испытания и изменения коэффициентов поперечных деформаций.

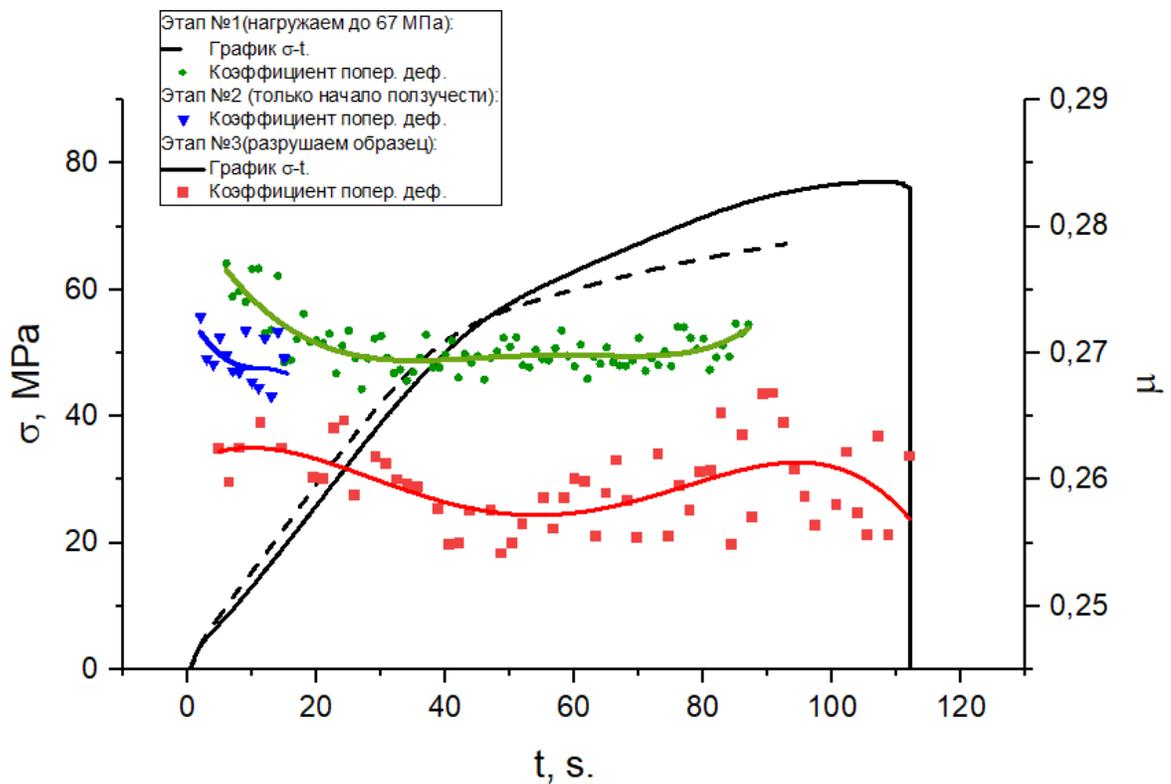


Рис. 12. Экспериментальные результаты для второго образца капролона, испытанного на ползучесть с нагрузкой $\sigma_{pol} = 45$ МПа: диаграммы $\sigma - t$ первого и третьего этапа испытания и изменения коэффициентов поперечных деформаций.

Согласно полученным результатам, коэффициент поперечной деформации в начале каждого этапа уменьшается. Такое поведение характерно для каждого этапа эксперимента. Также из графиков видно, что после каждого следующего этапа кривые изменения μ находятся ниже, чем в предыдущем этапе нагружений. Так для первого образца на первом этапе $\mu \approx 0,257$. На втором этапе, пока нагрузка растёт до значения $\sigma_{pol} = 35$ МПа, коэффициент поперечной деформации падает со значения 0,256 до 0,251. И наконец, на третьем этапе, при растяжении образца до разрушения, μ вначале уменьшается с 0,244 до 0,234, немного возрастает в конце до 0,241 и затем падает до 0,229. Похожая тенденция наблюдается и для второго образца капролона.

Последовательное уменьшение коэффициента поперечных деформаций от этапа к этапу обуславливается усилением хрупких свойств материала после

испытания, вследствие накопления дефектов и образования несплошностей после релаксации напряжений. Увеличение μ в пластической области объясняется пластическим течением части микрообъемов деформируемого твёрдого тела.

Выводы

Исследование упругих характеристик в образцах проводилось на основе ОА метода, который основывается на возбуждении акустических импульсов путём лазерного воздействия на поверхность образца. С обратной стороны образца находится датчик, вырезанный из пьезокерамики, направление поляризации которой составляет 45° , что позволяет регистрировать как продольные, так и поперечные акустические волны одновременно. Основное преимущество такого подхода заключается в возможности проведения измерений ОА методом прямо во время испытаний.

При использовании ОА метода зондирование образца происходит короткими акустическими импульсами, возбуждаемыми лазерным импульсом с длительностью порядка 10^{-8} с. При этом величины деформаций в упругом импульсе, возбуждаемом в данной методике, не превышают $10^{-(6\div5)}$. Время диагностики образцов с толщинами порядка $1\div3$ мм составляет величину порядка $(1\div5)\times 10^{-6}$ с, то есть при скорости движения захвата машины равной 5 мм/мин изменение $\sigma(\varepsilon)$ за время диагностики практически отсутствует. Таким образом, диагностика состояния среды осуществляется за времена много меньшие времени изменения параметров нагружения, а энергия, переносимая акустическим импульсом, много меньше характерных энергий активации механизмов пластической деформации.

С помощью ОА метода получены экспериментальные данные по изменению коэффициента поперечных деформаций, скоростей продольных и

поперечных волн в ходе испытаний на растяжения для следующих материалов: медь М1, углепластик Т26/22502/И131636, эпоксидная смола и ПММА ТОСП. Для образцов из углепластика, эпоксидной смолы и ПММА не наблюдалось значительного изменения коэффициента μ и скоростей V_L и V_T . Для меди в пластической области наблюдается рост как μ так и V_L и V_T , что обусловлено пластическим течением частей микрообъемов тела.

Исследовано изменение коэффициента поперечных деформаций для образцов из капролона (полиамид-6 блочный) в серии испытаний на растяжение и ползучесть. Полученные экспериментальные данные показывают, что наблюдается последовательное уменьшение коэффициента поперечных деформаций от этапа к этапу, что объясняется усилением хрупких свойств материала после испытания, вследствие накопления дефектов и образования несплошностей после релаксации напряжений. Увеличение μ в пластической области объясняется пластическим течением части микрообъемов деформируемого твердого тела.

Глава 4. Энергетический баланс в процессе механических испытаний

4.1. Расчет энергетического баланса конструкционных материалов при механических испытаниях на растяжение

По предложенной теории Кузьменко [20] о новых представлениях о процессе механики деформирования, предлагается следующая концепция. На первом этапе деформирования внешнее воздействие приводит к накоплению в веществе потенциальной энергии двух видов: W_σ – энергия, затраченная на объемные деформации; W_τ – энергия, затраченная на сдвиговые деформации. Сумма этих величин равняется работе внешних сил W по деформации тела. Изменение объёма тела, характеризуемого энергией W_σ , приводит к развитию ответного механического воздействия, характеризуемого энергией реакции P . Силы реакции в свою очередь преодолевают два вида сопротивления: сопротивление расширению или сжатию и сопротивление приложенных внешних сил, инициировавших деформацию. Поэтому энергия P расходуется на два разных процесса: часть её C затрачивается на всестороннее деформирование твёрдого тела, а другая часть B идёт на работу против сил внешнего источника в связи с изменением размеров тела. Каждая из величин, C и B как их сумма P может быть разделена на составляющие, каждая из которых относится к сдвиговым или объемным деформациям. Наиболее значимым с точки зрения расчётов в механике материалов является разделение энергии деформирования A , для которой верно:

$$A = W - B.$$

В свою очередь

$$A = A_\sigma + A_\tau,$$

где A_σ и A_τ – энергии объемных и сдвиговых деформаций. По теории Кузьменко для A_σ и A_τ справедливы следующие соотношения для произвольного напряженного состояния:

$$\frac{A_\sigma}{A} = \frac{W_\sigma}{W}, \quad \frac{A_\tau}{A} = \frac{W_\tau}{W}$$

В свою очередь:

$$\frac{W_\sigma}{W} = \frac{\mu(1+3\mu+3\mu^2)}{1+\mu}, \quad \frac{W_\tau}{W} = \frac{1-3\mu^2-3\mu^3}{1+\mu}. \quad (2)$$

Таким образом, появляется возможность получить новые теоретические и практические характеристики процесса деформирования. Следует отметить, что с увеличением коэффициента поперечных деформаций удельный вес энергии объемных деформаций увеличивается, а энергий сдвиговых деформаций падает.

Расчёты долей энергий объемных и сдвиговых деформаций согласно соотношениям (2) для двух образцов из капролона, для случаев первого и третьего этапов нагружения представлены на рис. 13-16.

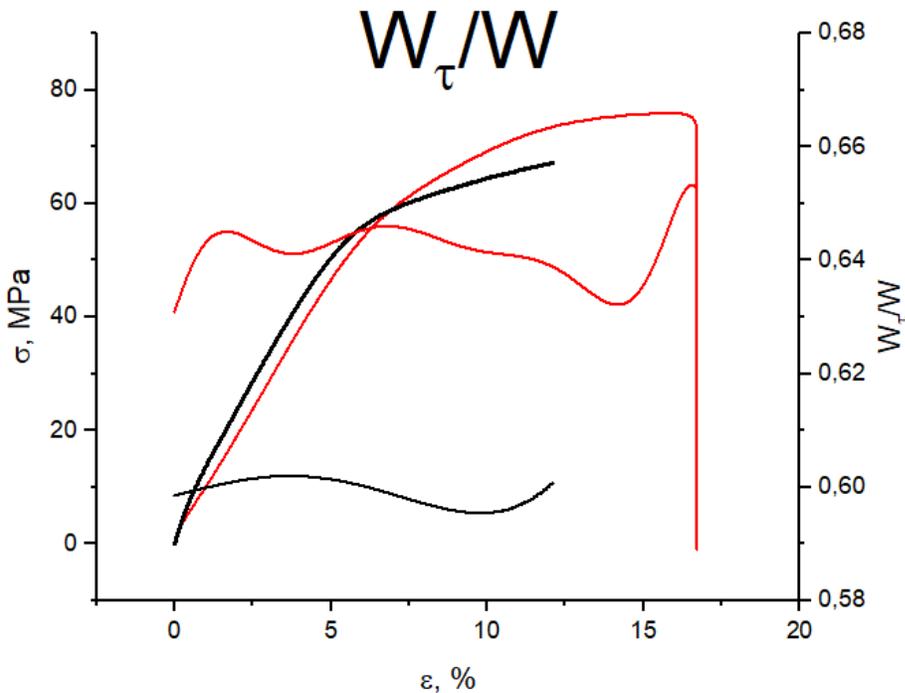


Рис. 13. Кривые деформирования и удельные энергии сдвиговых деформаций первого образца из капролона на первом (чёрный цвет) и третьем (красный цвет) этапе нагружения.

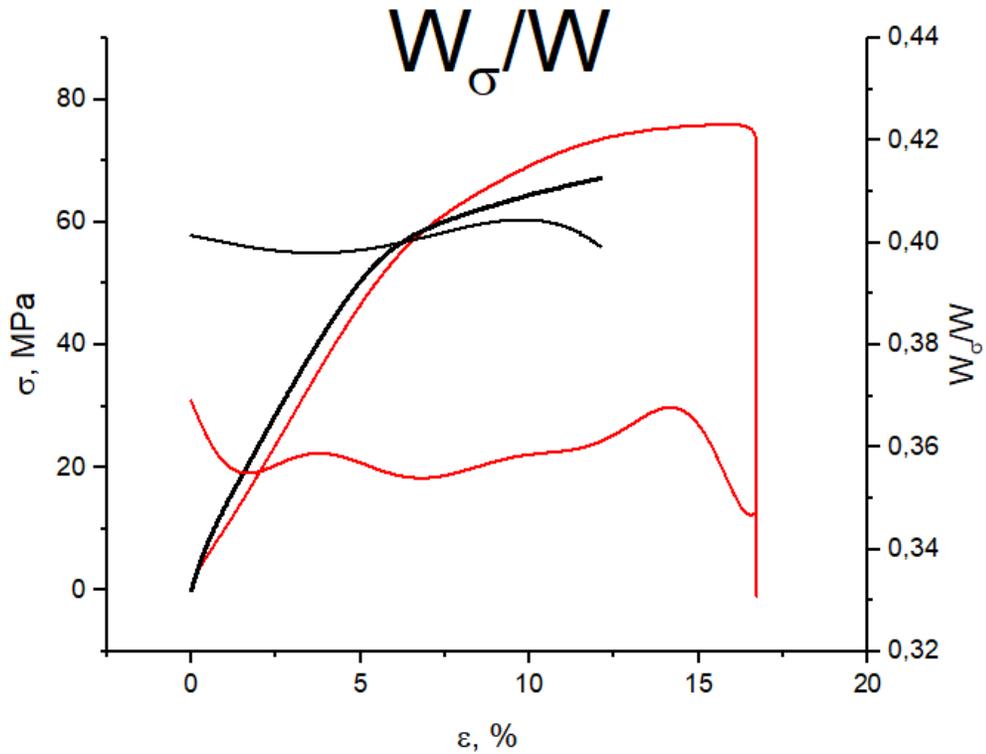


Рис. 14. Кривые деформирования и удельные энергии объемных деформаций первого образца из капролона на первом (чёрный цвет) и третьем (красный цвет) этапе нагружения.

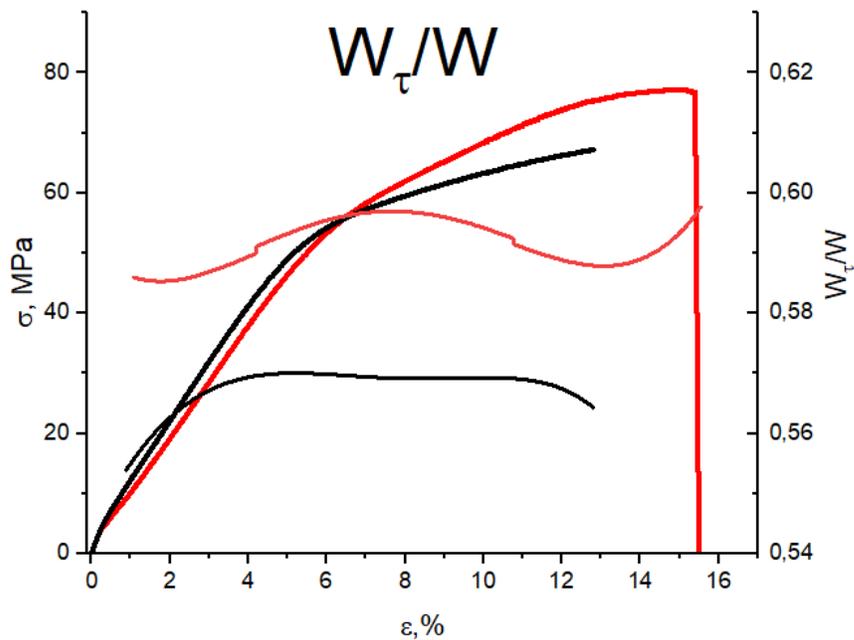


Рис. 15. Кривые деформирования и удельные энергии сдвиговых деформаций второго образца из капролона на первом (чёрный цвет) и третьем (красный цвет) этапе нагружения.

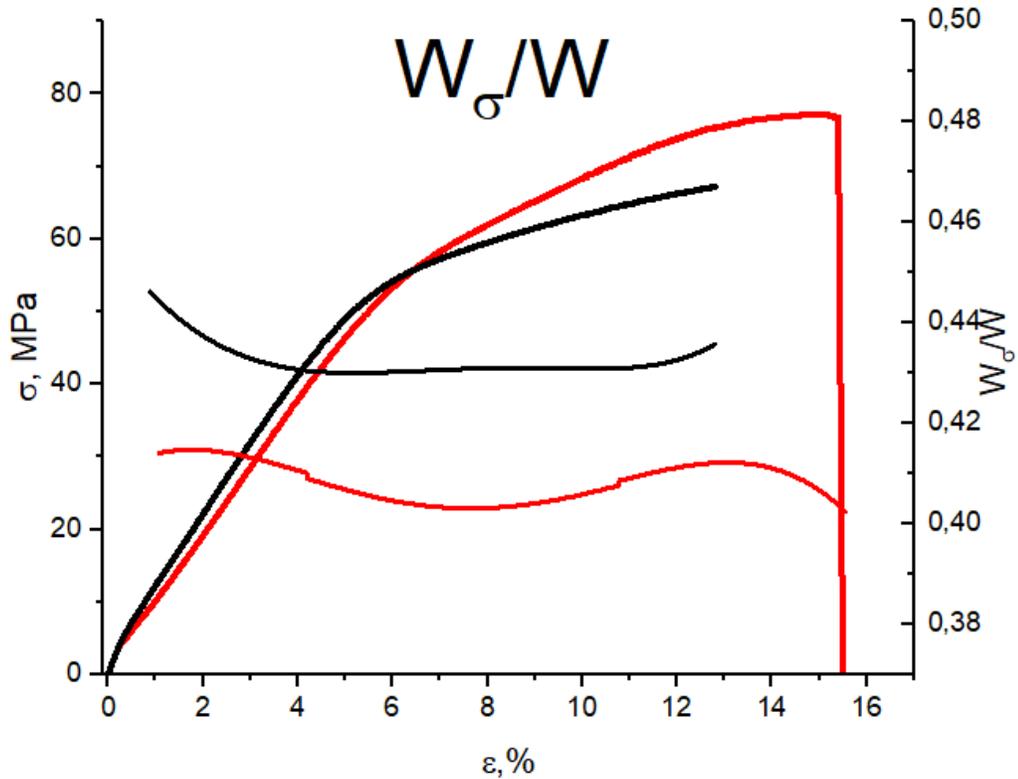


Рис. 16. Кривые деформирования и удельные энергии линейных деформаций второго образца из капролона на первом (чёрный цвет) и третьем (красный цвет) этапе нагружения.

По графикам, представленным на рис. 13-16 видно, что для обоих образцов удельная энергия сдвиговых деформаций W_t/W преобладает над удельной энергией объемных деформаций W_σ/W , как на первом, так и на третьем этапе нагружения (примерно 56 – 60 % от общей энергии W против 40 – 44 %). Можно заметить, что удельная доля объемных деформаций на третьем этапе испытаний меньше, чем на первом для обоих образцов. Для обоих образцов в третьем этапе испытаний прослеживается уменьшение W_σ/W в начале деформации, затем постепенный рост и спад в конце, при разрушении.

Как известно, традиционный энергетический баланс также определяется равенством работы деформации W сумме выделяющегося тепла Q и скрытой, латентной энергией L [21]:

$$W = Q + L,$$

где $W = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon$, $Q = \rho c_p \Delta T$, ρ – плотность материала, c_p – теплоёмкость, ΔT – разность температур. Применяя теорию по разделению энергии на составляющие, можно получить удельные доли энергии для Q и L :

$$Q = Q_\sigma + Q_\tau, \quad L = L_\sigma + L_\tau$$

Как известно, скрытая энергия складывается из внутренней энергии идеального твердого тела и потенциальной энергии дефектной структуры реального образца. При этом, наличие дефектной структуры на микромасштабах определяет несовместность деформаций и существование микронапряжений сдвига. В этой связи, представляется необходимым учитывать в балансе энергии деформирования работу, обусловленную действием внутренних микронапряжений сдвига.

Посчитанные энергии Q_σ , Q_τ , L_σ и L_τ для двух этапов эксперимента (первого и третьего) для двух образцов из капролона представлены на рис. 17-20.

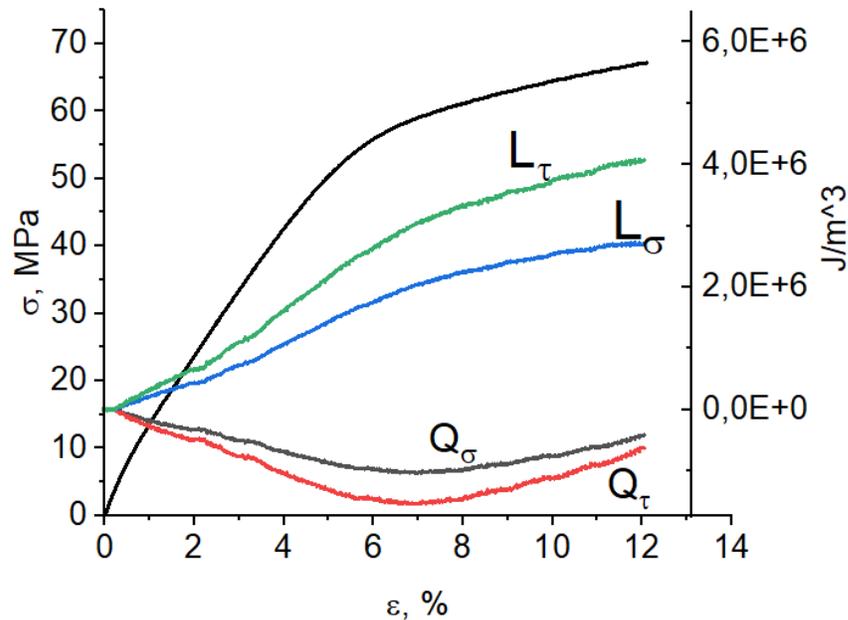


Рис. 17. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ и графики Q_σ , Q_τ , L_σ и L_τ для первого образца из капролона для первого этапа эксперимента (растяжение до 67 МПа).

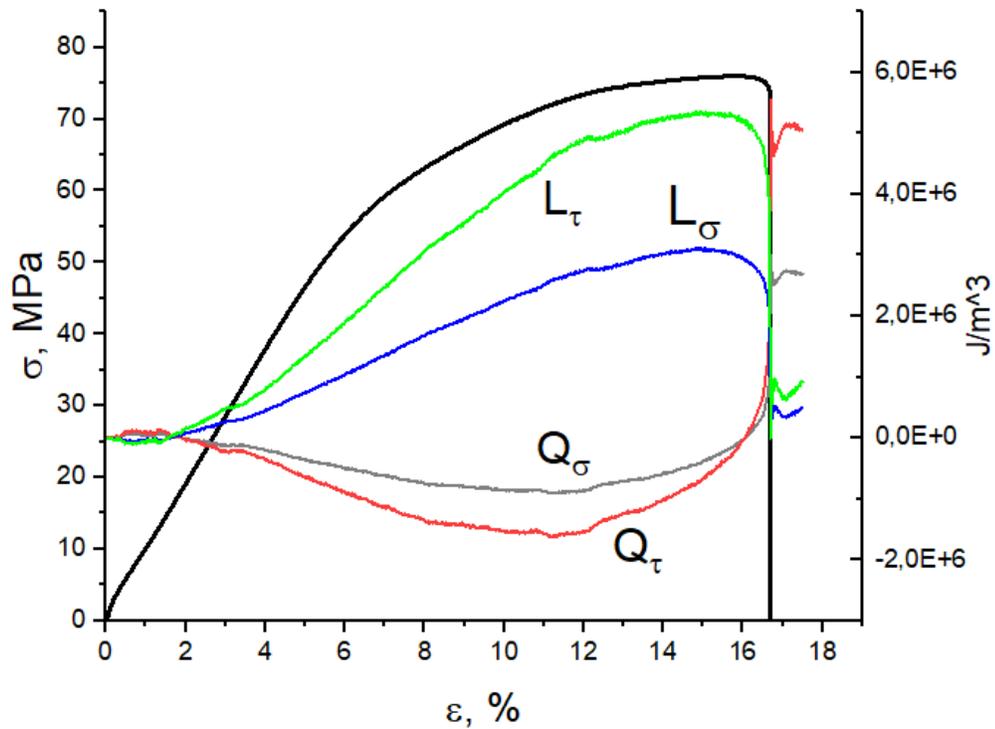


Рис. 18. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ и графики Q_σ , Q_τ , L_σ и L_τ для первого образца из капорлона для третьего этапа эксперимента (растяжение до разрушения).

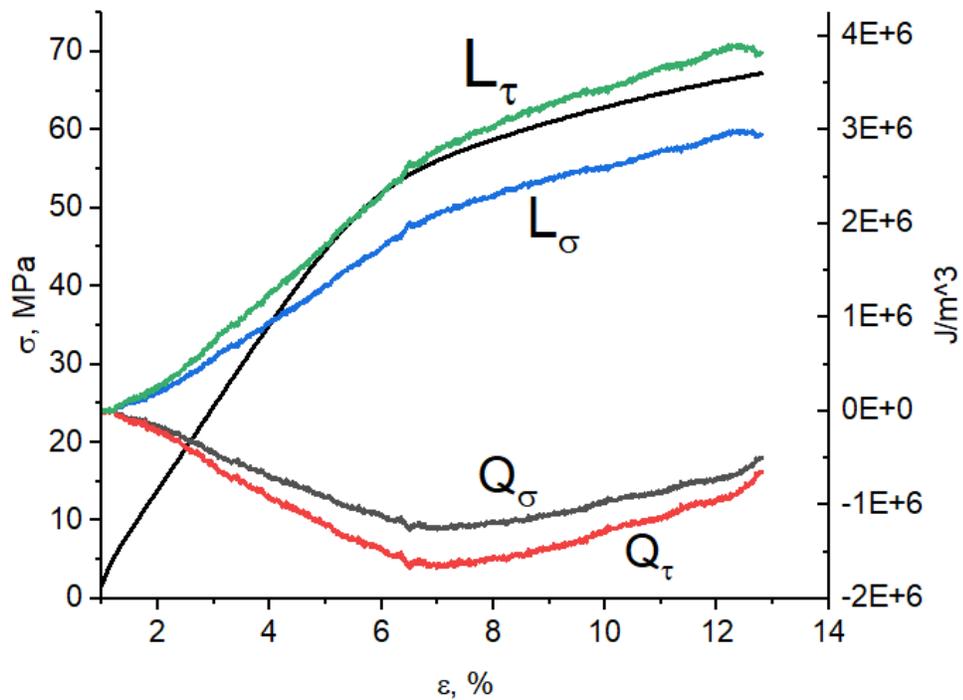


Рис. 19. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ и графики Q_σ , Q_τ , L_σ и L_τ для второго образца из капорлона для первого этапа эксперимента (растяжение до 67 МПа).

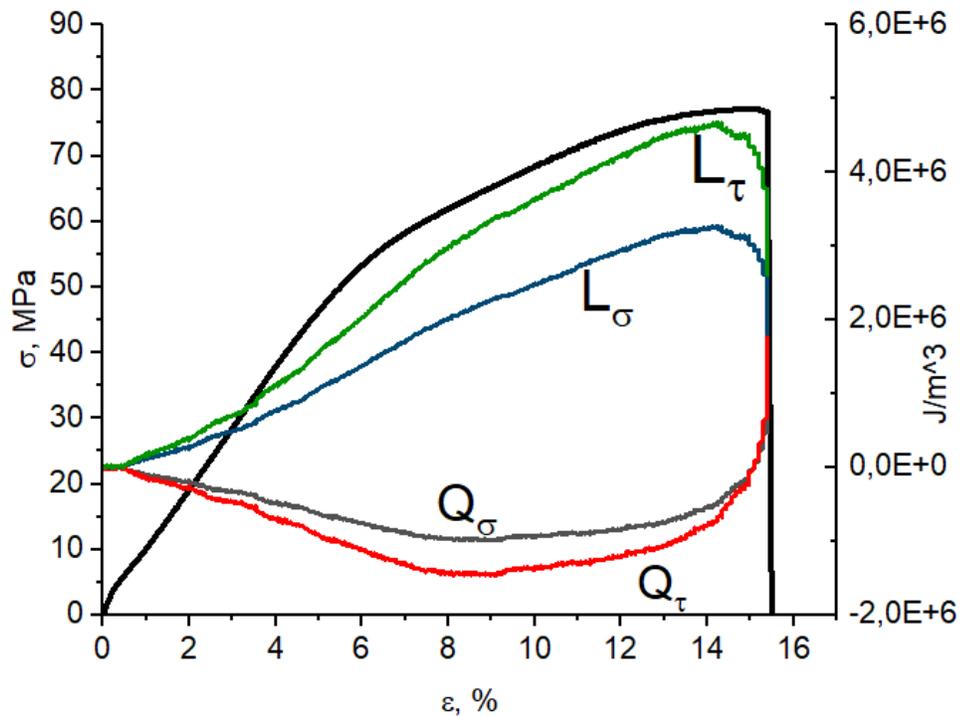


Рис. 20. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ и графики Q_σ , Q_τ , L_σ и L_τ для второго образца из капролона второго этапа эксперимента (растяжение до разрушения)

Из рис. 17-20 следует, что на начальном этапе наблюдается снижение величин Q_σ и Q_τ , в дальнейшем наблюдается рост величин Q_σ и Q_τ вплоть до момента разрушения. Данное поведение говорит о схожести капролона с металлическими материалами. Для величин L_σ и L_τ наблюдается постоянный рост вплоть до момента разрушения.

Выводы

Проведено исследование энергетического баланса в серии испытаний на растяжение двух образцов из капролона с учетом разделения работы внешних сил по деформации тела на энергию изменения объема и энергию сдвиговых деформаций.

Построены графики удельных долей работ, затраченных на объемные W_σ/W и сдвиговые W_τ/W деформации. Удельная энергия сдвиговых деформаций W_τ/W преобладает над удельной энергией объемных деформаций W_σ/W , как на первом, так и на третьем этапе нагружения (примерно 56 – 60 %

от общей энергии W против 40 – 44 %). Также удельная доля объемных деформаций на третьем этапе испытаний меньше, чем на первом для обоих образцов. Для обоих образцов в третьем этапе испытаний прослеживается уменьшение W_{σ}/W в начале деформации, затем постепенный рост и спад в конце, при разрушении.

Построены графики изменения $Q_{\sigma}, Q_{\tau}, L_{\sigma}$ и L_{τ} . На начальном этапе наблюдается снижение величин Q_{σ} и Q_{τ} , в дальнейшем наблюдается их рост вплоть до момента разрушения. Данное поведение говорит о схожести капролона с металлическими материалами. Для величин L_{σ} и L_{τ} наблюдается постоянный рост вплоть до момента разрушения.

Заключение

В данной работе были получены следующие результаты:

- Проведён обзор литературы по исследованию закономерностей изменения коэффициента поперечных деформаций и применению ОА метода в диагностике материалов.
- Исследование упругих характеристик в образцах проводилось на основе ОА метода, который основывается на возбуждении акустических импульсов путём лазерного воздействия на поверхность образца. С обратной стороны образца находится датчик, вырезанный из пьезокерамики, направление поляризации которой составляет 45° , что позволяет регистрировать как продольные так и поперечные акустические волны одновременно. Основное преимущество такого подхода заключается в возможности проведения измерений ОА методом прямо во время испытаний.
- При использовании ОА метода зондирование образца происходит короткими акустическими импульсами, возбуждаемыми лазерным импульсом с длительностью порядка 10^{-8} с. При этом величины деформаций в упругом импульсе, возбуждаемом в данной методике, не превышают $10^{-(6\div 5)}$. Время диагностики образцов с толщинами порядка $1\div 3$ мм составляет величину порядка $(1\div 5)\times 10^{-6}$ с, то есть при скорости движения захвата машины равной 5 мм/мин изменение $\sigma(\varepsilon)$ за время диагностики практически отсутствует. Таким образом, диагностика состояния среды осуществляется за времена много меньшие времени изменения параметров нагружения, а энергия, переносимая акустическим импульсом, много меньше характерных энергий активации механизмов пластической деформации.

- С помощью ОА метода получены экспериментальные данные по изменению коэффициента поперечных деформаций, скоростей продольных и поперечных волн в ходе испытаний на растяжения для следующих материалов: медь М1, углепластик Т26/22502/1131636, эпоксидная смола и ПММА ТОСП. Для образцов из углепластика, эпоксидной смолы и ПММА не наблюдалось значительного изменения коэффициента μ и скоростей V_L и V_T . Для меди в пластической области наблюдается рост как μ так и V_L и V_T , что обусловлено пластическим течением частей микрообъемов тела.
- Исследовано изменение коэффициента поперечных деформаций для образцов из капролона (полиамид-6 блочный) в серии испытаний на растяжение и ползучесть. Полученные экспериментальные данные показывают, что наблюдается последовательное уменьшение коэффициента поперечных деформаций от этапа к этапу, что объясняется усилением хрупких свойств материала после испытания, вследствие накопления дефектов и образования несплошностей после релаксации напряжений. Увеличение μ в пластической области объясняется пластическим течением части микрообъемов деформируемого твердого тела.
- Проведено исследование энергетического баланса в серии испытаний на растяжение образцов из капролона с учетом разделения работы внешних сил по деформации тела на энергию изменения объема и энергию сдвиговых деформаций.
- Построены графики удельных долей работ, затраченных на объемные W_σ/W и сдвиговые W_τ/W деформации с использованием теории В.А. Кузьменко. Удельная энергия сдвиговых деформация W_τ/W преобладает над удельной энергией объемных деформаций W_σ/W , как на первом, так и на третьем этапе нагружения. Также удельная доля

объемных деформаций на третьем этапе испытаний меньше, чем на первом для обоих образцов. Для обоих образцов в третьем этапе испытаний прослеживается уменьшение W_σ/W в начале деформации, затем постепенный рост и спад в конце, при разрушении.

- Построены графики изменения $Q_\sigma, Q_\tau, L_\sigma$ и L_τ . На начальном этапе наблюдается снижение величин Q_σ и Q_τ , в дальнейшем наблюдается рост величин Q_σ и Q_τ вплоть до момента разрушения. Данное поведение говорит о схожести капролона с металлическими материалами. Для величин L_σ и L_τ наблюдается постоянный рост вплоть до момента разрушения.

Список использованной литературы

- [1] *Кузьменко В.А.* Закономерности изменения коэффициента поперечных деформаций// Проблемы прочности. 1971. N 8. С. 48 – 53.
- [2] *Зуев В.Е., Макушкин Ю.С., Пономарев Ю.Н.,* Спектроскопия атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 247с.
- [3] *Scruby C.B.* Some applications of laser ultrasound// Ultrasonic. 1980. V 27. N 4. P. 195 – 208.
- [4] *Судьенков Ю.В., Филиппов Н.М., Воробьев Б.Ф., Недбай А.Й.* Исследование механизмов мощного лазерного излучения с металлами// Письма ЖТФ. 1983. Т 35. N 4. С. 395 – 399.
- [5] *Кузьменко В.А.* Закономерности изменения коэффициента поперечных деформаций// Проблемы прочности. 1971. N 8. С. 48 – 52.
- [6] *Писаревский М.М.* Методика динамического определения модулей упругости и сдвига при разных температурах// Заводская лаборатория. 1938. Т VII. N 6.
- [7] *Смирнова Е.П., Сотников А.В., Schmidt H., Weihnacht M.* Температурные зависимости упругих модулей мультиферроика// Письма в ЖТФ. 2013. Т 39. Вып. 6. С. 9 – 15.
- [8] *Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л.* Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия. 1980. 320с.
- [9] *Карabutov А.А., Кобелева Л.И., Подымова Н.Б., Чернышева Т.А.* Лазерный оптико-акустический метод локального измерения упругих модулей композиционных материалов, упрочненных частицами // Техническая акустика. 2008. Т. 8. С. 2 – 13.
- [10] *Арутюнян А.Р., Зимин Б.А., Судьенков Ю.В.* Исследование циклической долговечности конструкционных материалов методом оптико-акустической спектроскопии // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2008. Сер. 1. вып. 3. С. 88 – 96.

- [11] *Судьенков Ю.В.* Влияние ангармонизма на тепловыделение и упрочнение металлов при квазистатическом растяжении // *Физика твёрдого тела.* 2020. Т. 62. Вып. 1. С. 125 – 130.
- [12] *Жуков А.М.* О коэффициенте Пуассона в пластической области// *Известия академии наук СССР. Отделение технических наук.* 1954. N 12. С. 86 – 91.
- [13] *Ровинский Б.М., Лютцау В.Г.* Коэффициент Пуассона при релаксации напряжений// *Известия академии наук СССР. Отделение технических наук.* 1953. N10. С. 1171 – 1174.
- [14] *Черняк Н.И.* Механические свойства стали в области малых пластических деформаций: моногр. Изд.: АН УССР. 1962. С. 11-22.
- [15] *Давиденков Н.Н., Васильев Д.М.* О коэффициенте поперечной деформации // *Механические методы испытаний. Заводская лаборатория.* 1952. Т. XVIII. N 5. С. 596 – 599.
- [16] *Гусенков А.П., Зацаринный В.В., Шнейдерович Р.М.* Методика получения характеристик сопротивления малоцикловому деформированию и разрушению при изменении поперечных деформаций // *Механические методы испытаний. Заводская лаборатория.* 1971. N 4. С. 464 – 468.
- [17] *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Хикита А.* Ультразвуковые методы исследования пластической деформации // *Физическая акустика.* М.: Мир. 1969. Т. 3. Ч. А. С. 238 – 262.
- [18] *Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А.* Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука. 2008. 328с.
- [19] *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л.* Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука. 1996. 183с.
- [20] *Кузьменко В.А.* Развитие представлений о процессе деформирования материалов// *О поперечных деформациях.* Киев :УкрНИИТИ. 1968. N1.
- [21] *Скорый И.А., Дорожки И.В.* Вопросы сопротивления материалов. 1954. С. 114 – 117.