

УДК:539.3 УДК:677.4.017.4 или 678.067:623-9

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С 3D-ЯЧЕЙСТАМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

Рубан Д.В.<sup>1,2</sup>, Рыбин А.А.<sup>1</sup>, Червяков А.А.<sup>3</sup>, Турков В.Е.<sup>1,2</sup>, Ульянов С.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики имени Д.И. Менделеева», г. Москва, Россия;<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (Государственный университет)», г. Долгопрудный, Россия;<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

Предложен метод сравнительного анализа этапов механического поведения двух типов материалов, используемых для формирования внешних монолитных слоёв и внутренних ячеистых прослоек трёхслойных панелей. В качестве монолитных систем изучен полиамидный волокнистонаполненный композит, а в качестве внутреннего ячеистого заполнителя – формируемая методом аддитивной технологии полимерная композиция на основе метакрилатного олигомера. Модельные ячеистые образцы имели квадратную внутреннюю ячейку. Образцы испытывали на сжатие при различных скоростях деформирования и температурах контроля. Для рассмотренных систем изучены параметры интенсивности удельного энергопоглощения образцами энергии внешнего воздействия и их поведение на различных этапах деформационных процессов. Параметры свойств исследованных образцов изучены в зависимости от параметров ячеек материалов заполнителя и параметров волоконных наполнителей композитных материалов.

**Ключевые слова:** механические свойства; испытание на сжатие; метакрилатные олигомеры; лазерная стереолитография; ячеистые материалы композиты; алифатические полиамиды; стеклянные волокна; диаграммы деформирования; этапы деформирования; удельное энергопоглощение

## THE FEATURES OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF COMPONENTS OF THE COMPOSITE PANEL WITH 3D-MESH FILLERS

Ruban D.V.<sup>1,2</sup>, Rybin A.A.<sup>1</sup>, Chervyakov A.A.<sup>3</sup>, Turkov V.E.<sup>1,2</sup>, Ulyanov S.A.<sup>1</sup><sup>1</sup>Central Research and development Institute of Chemistry and Mechanics,  
Moscow, Russia<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia<sup>3</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

### ABSTRACT

The article proposes the method of comparative analysis of mechanical behavior stages of two types of materials which are used for forming monolithic outer layers and inner cellular layers of sandwich panels. Fiber reinforced polymer composite has been explored as monolithic

systems and a polymer compound, that's based on a methacrylate oligomer and created by additive technology, has been researched as an inner cellular fiberfill. The model cellular samples had an inner square cell. The samples have been tested in compression at different strain rates and temperatures. To analyze specific stages of deformation response of studied systems, have been applied the intensity parameters of specific energy absorption by energy samples of external influence on the development of successive steps of deformation processes. Property parameters of the researched samples have been examined depending on parameters of fiberfill material cells and parameters of fiber filler as part of composite.

**Keywords:** mechanical properties; testing in compression; (meth)-acrylated oligomers; laser stereolithography; cellular materials; composites; aliphatic polyamides; fiberglass; deformation diagram; deformation stages; specific energy absorption

## ВВЕДЕНИЕ

Системные экспериментальные и расчётно-аналитические исследования многослойных элементов конструкций [1,2] убедительно выявили высокую конструкционную эффективность слоистых пластин и оболочек из современных композиционных материалов. Работы в этом направлении активно развиваются. И прежде всего, отметим появление новых композитных структур материалов для внешних монолитных слоёв. Разработку таких материалов производят на основе методов модификации их структур на микро- и наноуровнях [3,4]. Для внутренних слоёв применяют лёгкие наполнители с необходимым комплексом функциональных свойств. Перспективны ячеистые структуры [5,6], изготавливаемые методами аддитивных технологий [7]. В частности, существуют образцы трёхслойных панелей с ячеистыми наполнителями, на которых показана возможность достижения повышенных характеристик свойств в сравнении с типовыми сотовыми материалами.

Обобщение источников о достижениях в обсуждаемых областях разработок показывает необходимость развития методов, как теоретического анализа путей оптимизации структур новых композитов и лёгких ячеистых материалов, так и отработки методов экспериментальных исследований специализированных структур новых материалов. Очевиден и вопрос о принципиальной необходимости методов анализа механизмов взаимодействия различных по физическим и химическим свойствам внешних композитных структур и ячеистых прослоек. Эти механизмы взаимного воздействия слоёв друг на друга определённым образом влияют на формирование напряжённо-деформированных состояний слоёв с разнородными структурами и различными спектрально-релаксационными параметрами свойств [1].

В целях изыскания эффективных способов согласованных разработок оптимальных структур материалов, предназначенных для различных слоёв многослойных конструкций, проведены исследования двух типов полимерных материалов (для внешних слоёв и прослойки), принципиально различных по структуре и технологии изготовления опытных образцов. Предложены параметры для оценки деформационного отклика образцов, формируемых методом лазерной стереолитографии (SLA), а также разработана методика определения названных параметров при нагрузке плоского сжатия.

## 1. МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

### 1.1. Метод оценки механических свойств ячеистых материалов при сжатии.

Оценку механического отклика ячеистой структуры образцов на внешнее воздействие производили по схеме сжатия, показанной на рис.1а. Образец 2 размещался между плоскими обкладками 1, 3, совмещаемыми с элементами оснастки 4 высокоточной разрывной испытательной машины SHIMADZU AG-X plus 10kH, на которой и проводились испытания на сжатие. Направления распределённой нагрузки  $P$  отмечено на рис.1а.

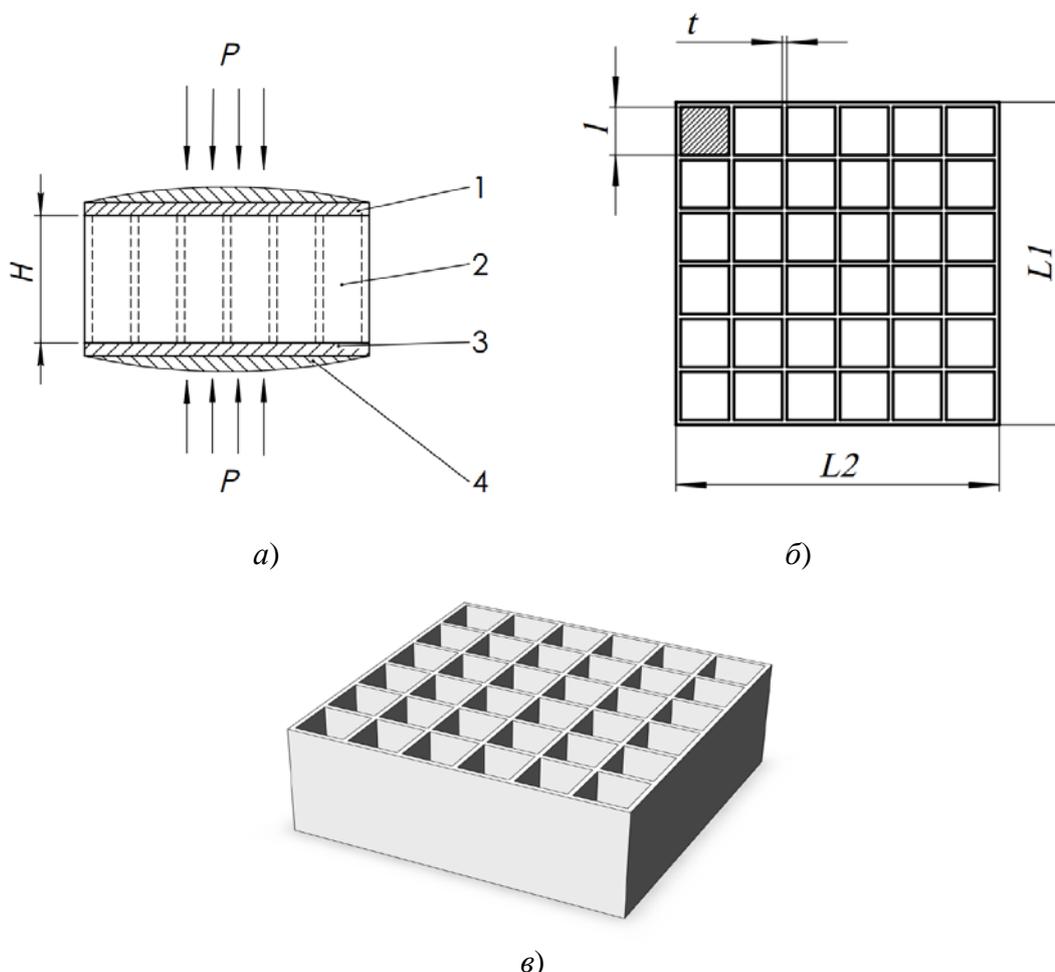


Рис.1. Схема испытания ячеистого образца на сжатие (а) и параметры образца (б) ячеистой структуры (в).

Схема образца поясняется на рис.1б и в. Его внешние контуры имеют призматическую форму со сторонами  $L1$  и  $L2$ , и высотой  $H$ . В пределах указанной формы варьировали геометрические параметры ячеистой структуры, в частности:  $t$  – толщины стенки структурной ячейки,  $l$  – длины стенки ячейки (межузловые расстояния).

Испытания идентичных образцов проведены при двух скоростях деформирования:  $\dot{X}_1 = 1$  мм/мин и  $\dot{X}_2 = 200$  мм/мин. В ходе испытаний силовой отклик регистрировали в зависимости от перемещений контрольных элементов оснастки.

При обработке результатов измерений использовались следующие данные и расчетные формулы:

– величины, измеряемые испытательной машиной:  $P$ ,  $H$  – нагрузка;  $\Delta H$ , мм – ход траверсы;  $\tau$ ,  $c$  – время;

– габаритно-массовые характеристики образцов:  $L1$ ,  $L2$ ,  $H$ ,  $t$ ,  $l$  – геометрические параметры образцов в мм;  $m$ ,  $\rho$  – масса образцов;  $N$  – количество ячеек;

– площадь поперечного сечения недеформированных ячеистых образцов в мм<sup>2</sup>:  $S_{сеч} = L1 \cdot L2 - l^2 \cdot N$ ;

–  $\sigma(\tau) = \frac{P(\tau)}{S_{сеч}}$  – напряжение в МПа;  $\varepsilon(\tau) = \frac{\Delta H(\tau)}{H}$  – относительная деформация;

– удельная работа затраченная на деформацию образца:

$$A(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon(\tau)} \sigma(\tau) d\varepsilon(\tau), \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right];$$

– удельная работа деформации ячеистого образца, приведенная на массу образца

$$W(\varepsilon) = \frac{A(\varepsilon)}{m}, \left[ \frac{\text{Дж}}{\rho \cdot \text{м}^3} \right];$$

– скорость поглощения энергии деформации:  $\frac{dW}{d\tau} = \frac{\dot{X}_i}{H} \frac{dW}{d\varepsilon}$ ,  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\rho \cdot c \cdot \text{м}^3} \right]$

– интенсивность поглощения энергии деформации образца, приведенная на массу

$$\text{образца: } \frac{d^2W}{d\tau^2} = \frac{\dot{X}_i^2}{H^2} \frac{d^2W}{d\varepsilon^2}, \left[ \frac{\text{Дж}}{\rho \cdot c^2 \cdot \text{м}^3} \right]$$

Первичные диаграммы определяемых усилий в стенках образцов использовали для расчётов диаграмм исследовательского назначения в координатах:

–  $\sigma(\tau) - \varepsilon(\tau)$ ;

–  $W(\varepsilon) - \varepsilon(\tau)$ ;

–  $\frac{dW}{d\varepsilon} - \varepsilon(\tau)$ ;

–  $\frac{d^2W}{d\varepsilon^2} - \varepsilon(\tau)$ .

Могут быть получены и другие типы диаграмм для более углублённого анализа механизмов внутреннего отклика элементов изучаемой ячеистой системы.

Все испытания ячеистых образцов проведены при комнатной температуре (~24°C).

## 1.2. Метод оценки механических свойств композиционных материалов.

Применён метод специализированных испытаний монолитных композиционных образцов материалов на одноосное сжатие. Использована модифицированная установка, описанная в [8].

Оценку параметров свойств термопластичных композитов производили в условиях сжатия при скоростях деформации  $\dot{\varepsilon}_v$  до 250 с<sup>-1</sup>. Использована методика испытаний призматических образцов с размерами 12x6x4 мм. Коэффициент вариации результатов измерений по уровням напряжений около 10%.

В ходе испытаний силовой отклик регистрировали в зависимости от времени при контролируемой постоянной скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_v$ . Полученные данные использовались для расчета диаграмм исследовательского назначения [8]:

- скорость удельного энергопоглощения материалом образца за весь период силового воздействия ( $\frac{dA}{dt}$ ,  $\left[ \frac{\text{ТДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \right]$ ,  $A$  – удельная энергоёмкость процессов деформирования и разрушения образца);
- интенсивность удельного энергопоглощения материалом образца за весь период силового воздействия ( $\frac{d^2A}{dt^2}$ ,  $\left[ \frac{\text{ТДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}^2} \right]$ ).

Удельные значения названных параметров получали делением расчётных значений, выраженных в тераджоулях, энергий деформирования и разрушения материалов всех этапов силового воздействия на объём образца.

Удельная энергоёмкость  $A$ , ТДж/м<sup>3</sup> определялась как

$$A = \frac{\int_0^{\Delta l} P(\Delta l) \cdot d\Delta l}{l \cdot S} \cdot 10^{12},$$

где  $P(\Delta l)$  – действующее усилие, Н;  $\Delta l = \dot{\varepsilon}_v \cdot t \cdot l$ , перемещение сечений образца, [м], на базе измерений  $l$ , [м], в течение активного времени  $t$ , [с];  $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

Зависимость параметра  $A$  от активного времени определялась с использованием метода б диаграмм, подробно описанного в [9], с применением интерполяции диаграммы усилие-перемещение (график 3, см [9]).

Испытания композитных образцов проведены в температурном диапазоне 213-353 К.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

### 2.1. Объекты исследования.

Объектами исследования явились структурные фрагменты, входящие в качестве составных элементов в конструкцию трёхслойных панелей различных назначений. Вариант трёхслойной панели с ячеистым наполнителем отображён на рис.2. Внешние монолитные слои (1 и 3) изготавливают из полимерных композитов методом литья под давлением. Внутренний облегчённый слой (2) изготавливают стереолитографическим методом 3D-печати.

Изготовленные названными способами компоненты панелей имеют свойства, которые могут регулироваться в широком диапазоне топологией ячеек внутреннего слоя, параметрами процесса аддитивной технологии, свойствами фотополимера. Специфика механических свойств пакетных систем рассматриваемого типа в значительной степени определяется характером взаимодействия внешних слоёв с ячеистой системой внутреннего слоя, который, в свою очередь, регулируется параметрами внутренних ячеек и свойствами материалов, которые структурируются процессами аддитивного формирования.

Для проведения работ по оптимизации панелей с рассматриваемой послойной структурой целесообразны следующие данные:

- характеристики отклика материала стенок ячеистых структур в зависимости от условий нагружения, топологии макроструктуры ячеек и технологических параметров формирования;
- свойства материалов внешних слоёв, влияющие на основные этапы их внутреннего взаимодействия с ячеистыми слоями.

Перечисленные свойства не являются стандартными характеристиками материалов и требуют постановки специальных исследований.

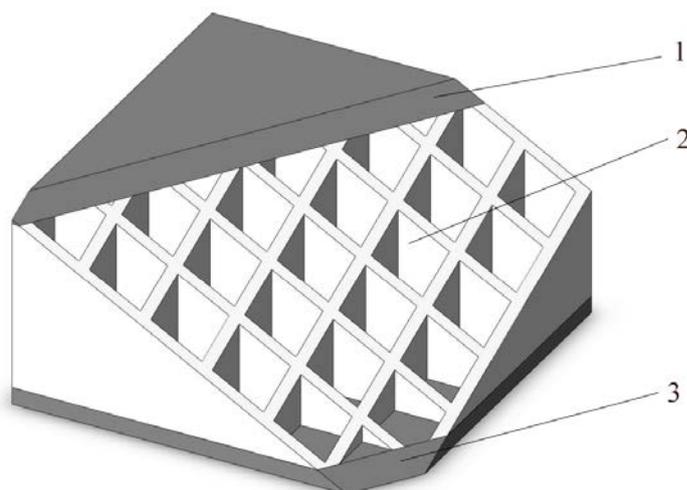


Рис.2. Схема трёхслойной панели с внешними композитными слоями (1 и 3) и внутренним ячеистым наполнителем (2).

### 2.1.1. Материалы и образцы ячеистых структур.

В рамках данной работы исследованы образцы, схематично поясняемые на рис.1б. Принята квадратная индивидуальная ячейка со стороной  $l$ . Общее количество ячеек в направлении  $L1$  и  $L2$  равно 6. Рассмотрены три вида образцов с варьируемыми толщиной стенки  $t$ , длиной  $l$ , и, соответственно, размерами  $L1$  и  $L2$ . Значения геометрических параметров изготовленных образцов представлены в таблице 1. Там же приведены производные характеристики образцов, например,  $S_{сеч}$  – суммарная площадь поперечных сечений всех стенок ячеек образца.

Для изготовления образцов использовался 3D-принтер «Formlab 1+» (США), реализующий SLA технологию. Образцы формовали из метакрилатного функционального олигомера ((meth)-acrylated oligomers), также поставленного фирмой «Formlab».

Таблица 1.

Числовые параметры исследованных ячеистых образцов.

Номер	Размер, N×N	L1=L2, мм	Толщина стенки t, мм	Длина стенки l, мм	Площадь стенок $S_{сеч}$ , мм <sup>2</sup>	Высота H, мм	Масса m, г
1	6	14,8	0,4	2	75	10	0,9
2	6	50,8	0,4	8	276		2,5
3	6	40,2	0,6	6	320		3

### 2.1.2 Материалы внешних монолитных слоёв.

В качестве материалов внешних слоёв рассмотрены достаточно изученные полиамидные композитные структуры, наполненные короткими стеклянными волокнами [10]. Образцы формовали методом литья под давлением из алифатического полиамида ПА6 по штатному режиму литья. Длину стеклянных волокон (СВ) варьировали в пределах  $1\div 10$  мм, массовую долю СВ в композиции – в пределах  $0\div 34\%$  масс.ч.

Данные о параметрах статических свойств полиамидов достаточно представлены в справочной литературе. В рамках данного анализа рассмотрены особенности этапного отклика этих композитов на силовое воздействие, стандартными методами не выявляемые.

## 2.2. Результаты и обсуждение.

Проведены испытания 3D-ячеистых образцов на сжатие и испытания полимерных композитных материалов на ударное сжатие.

В процессе деформации образцов совершается работа внешней нагрузки, идущая на увеличение внутренней энергии образца. Можно выделить различные механизмы поглощения энергии внешних воздействий. При этом, соотношение долевых составляющих поступающей в систему энергии между этими механизмами существенно различается на различных этапах деформирования. В частности, на начальных этапах деформирования затраченная энергия преимущественно идет на увеличение потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия. На последующих этапах работа, совершенная внешней нагрузкой, может расходоваться на конформационные молекулярные процессы, образование дилатонных структур, формирование локальных пластических зон и т.д. Важно отметить, что характер механизмов поглощения энергии существенно различается между собой.

### 2.2.1. 3D-ячеистые образцы.

Влияние выделенных к рассмотрению параметров ячеек модельных образцов (см. таблицу 1) на характеристики ячеистой структуры первично подвергнем анализу посредством экспериментальных диаграмм деформирования при сжатии со скоростью 1 мм/мин. Сопоставление этих диаграмм для трёх видов квадратных структур дано на рис.3а. Напряжение рассчитаны на общее поперечное сечение материала всех стенок ячеек (см. таблица 1). Диаграмма отчётливо указывают на различие деформационного поведения образцов при указанных различиях толщин и длин стенок в ячейках. Модельная система типа 1 проявляет почти в два раза более высокие уровни достигаемых напряжений при одновременно повышенных предельных относительных деформациях. Образцы типов 2 и 3 при сохранении общего характера деформационной кривой проявляют существенно более низкие уровни достижимых напряжений и деформаций. При этом осадка образцов типа 1 развивается по механизмам пластических деформаций, а образцов типов 2 и 3 – по механизмам поперечных срезов и раскола стенок ячеек.

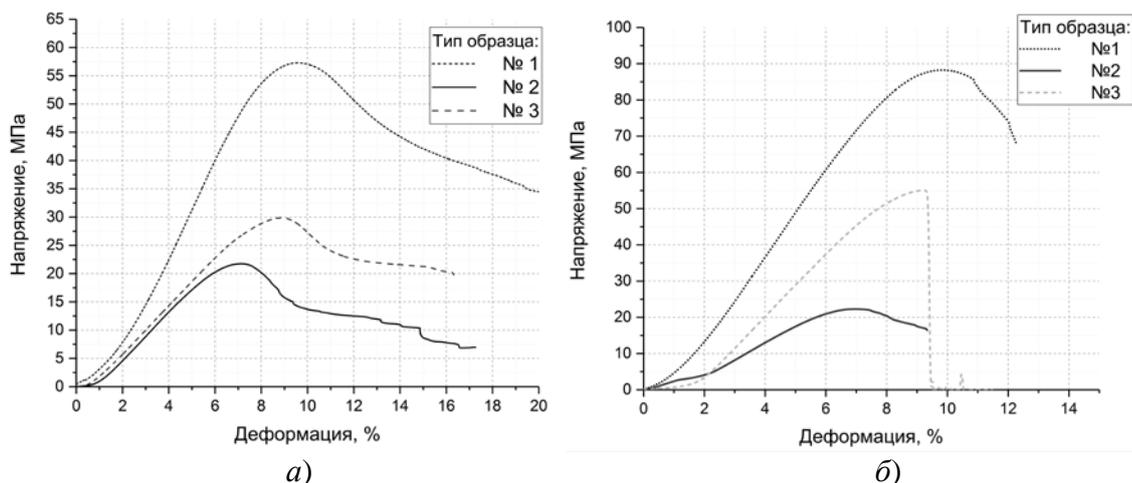


Рис.3. Диаграммы деформирования материалов стенок образцов при сжатии со скоростью осадки: а) 1 мм/мин, б) 200 мм/мин.

Обратимся к аналогичным деформационным диаграммам тех же типов образцов, полученных при скорости осадки 200 мм/мин (см. рис.3б). Выделим следующие значимые отличия скоростных диаграмм (200 мм/мин) от диаграмм медленно деформируемых таких же образцов (1 мм/мин). Отметим значительное увеличение достигаемых напряжений у образцов типа 1, некоторое увеличение – у образцов типа 3 и неизменившееся значение – у образцов типа 2. Несмотря на значительное изменение достигнутых напряжений, деформационные характеристики остались неизменными. Также, практически, все виды рассматриваемых ячеистых структур изменили характер разрушения внутренних стенок. Все рассматриваемые типы образцов при скорости осадки 200 мм/мин разрушались хрупко, с незначительными деформационными искажениями. Вероятно, к эффектам влияния форм ячеек на свойства материала стенок добавляются эффекты проявления свойств собственно материала при увеличении скоростных параметров нагрузки.

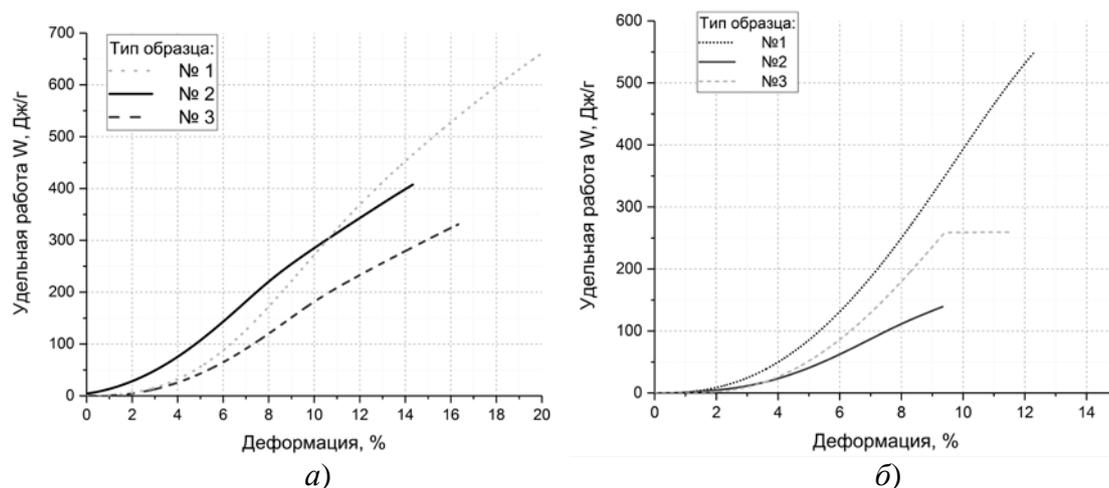


Рис.4. Влияние типа ячеек в образцах на удельную работу деформаций при осадке сжатия: а) 1 мм/мин, б) 200 мм/мин.

На рис.4 дана сравнительная характеристика особенностей свойств образцов с различными ячейками по уровням удельной работы деформации материала при осадке сжатия. Удельный параметр работы деформации рассчитан отнесением

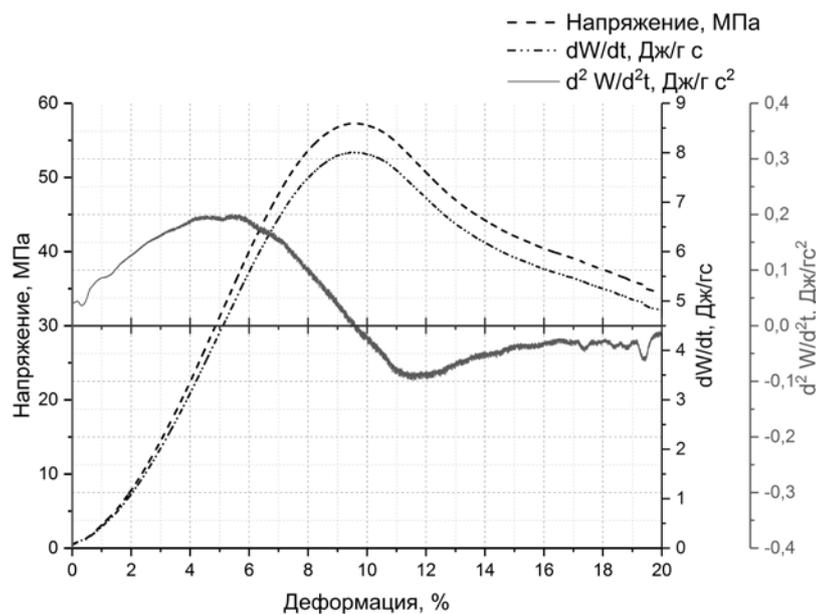
энергии деформации к единице массы каждого образца. Обращение к характеристике свойств материала, приведенной к массе образца, обусловлено стремлением более информативно оценить влияние топологии ячеистой структуры на редукцию свойств конкретного материала аддитивно формируемого в системы с различными параметрами ячеек. Представленные на рис.3 данные для различных модельных структур достаточно отчётливо свидетельствуют о возможности протекания различных механизмов поглощения энергии деформационной осадки образцов с квадратными ячейками.

Данные на рис.4 показывают некоторое превосходство ячеек образцов по типу 1 с более тонкими стенками (см. таблицу 1) в плане эффективной активации энергопоглощающих процессов в стенках. Существенно прояснение этапности развития этих процессов.

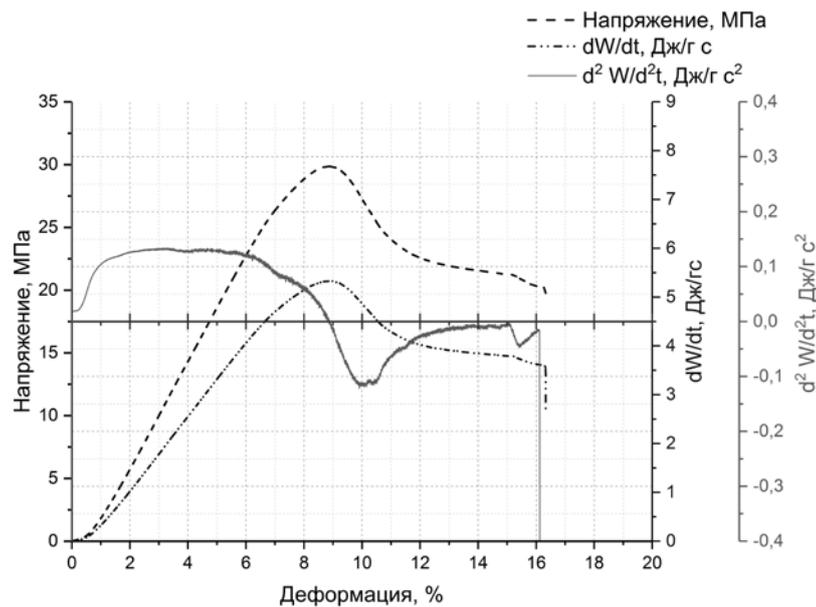
Ввиду сказанного могут представлять аналитический интерес данные, представленные на рис.5 и рис.6 для структур с тонкими ( $a$ ) и утолщёнными ( $b$ ) стенками (типы 1 и 3, соответственно). При обеих скоростях деформирования параметр  $\frac{dW}{dt}$  почти синхронно изменяется с текущим уровнем напряжений в стенках. Однако, интенсивность поглощения энергии на внутренние процессы в стенках  $\left( \text{см. } \frac{d^2W}{dt^2} \right)$  проявляет явную зависимость от толщины стенок, и в большей степени при медленных скоростях осадки (см. рис.5). Укажем на увеличение продолжительности диаграммной характеристики  $\frac{d^2W}{dt^2}$  для стенок 0,6 мм в сравнении со стенками 0,4 мм. Такое различие несколько снижается при увеличении скорости осадки (см. рис.6).

Характеристика  $\frac{d^2W}{dt^2}$  выявляет при этом весьма важную этапность протекания внутренних процессов в структуре стенок ячеек. Для всех структур на рис.5. и рис.6 экстремальный пик на диаграммах  $\frac{d^2W}{dt^2}$  существенно предшествует экстремуму на диаграммах напряжений. Причём пик на диаграммах интенсивности энергии почти синхронизируется с переходом характера деформирования ячеистых образцов от упругого к выражено нелинейному деформированию. Развивается этот переход значительно раньше достижения экстремума на диаграммах напряжений для всех типов рассмотренных образцов.

Физическая природа внутренних процессов структурной перестройки материала ячеек, возможно, частично может быть объяснена с позиций дилатонно-кластерных преобразований в молекулярных состояниях полимерных стенок [11] при достижении определённых напряжений в них. Однако, эти процессы не могут рассматриваться без анализа деформационной устойчивости стенок и их разрушений по различным механизмам. В частности, возникновение отрицательных уровней на диаграммах  $\frac{d^2W}{dt^2}$  может совпадать с началом потери устойчивости стенок, что выражалось, либо в разрушении стенок, либо в их выпучивании. И данное обстоятельство требует серьёзного анализа.

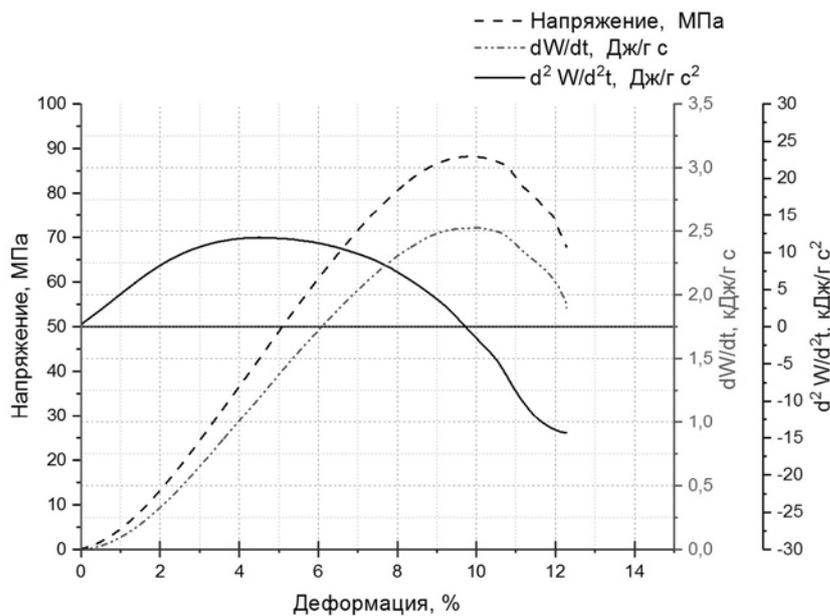


а)

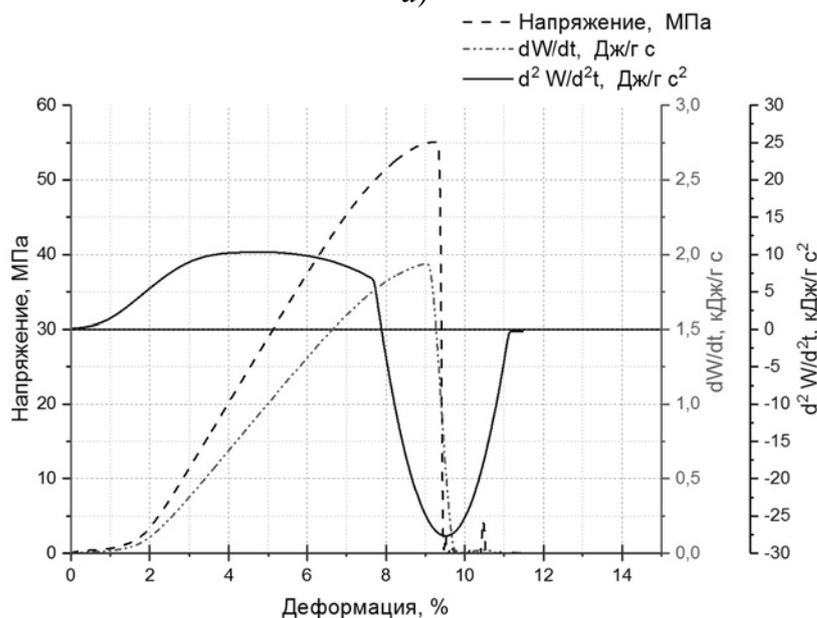


б)

Рис.5. Параметры напряжения, скорости  $\left(\frac{dW}{dt}\right)$  и интенсивности поглощения  $\left(\frac{d^2W}{dt^2}\right)$  энергии в стенках различной толщины при скорости деформирования 1 мм/мин: а) образец типа 1, б) образец типа 3.



а)



б)

Рис.6. Параметры напряжения, скорости  $\left(\frac{dW}{dt}\right)$  и интенсивности поглощения  $\left(\frac{d^2W}{dt^2}\right)$  энергии в стенках различной толщины при скорости деформирования 200 мм/мин: а) образец типа 1, б) образец типа 3.

### 2.2.2 Полимерные композитные материалы.

В рамках анализа особенностей внутреннего отклика материалов сложной структуры на внешнее силовое воздействие получены диаграммы интенсивности энергетических характеристик внутренних процессов полиамидных композитов.

Данные приведены на рис.7 для ненаполненного полиамида ПА6 и на рис.8 для исследованных композитов на его основе.

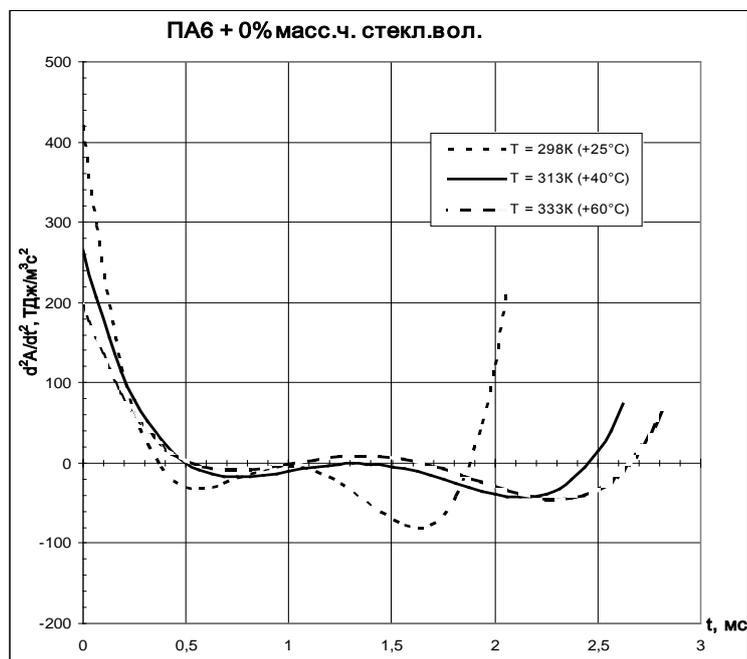
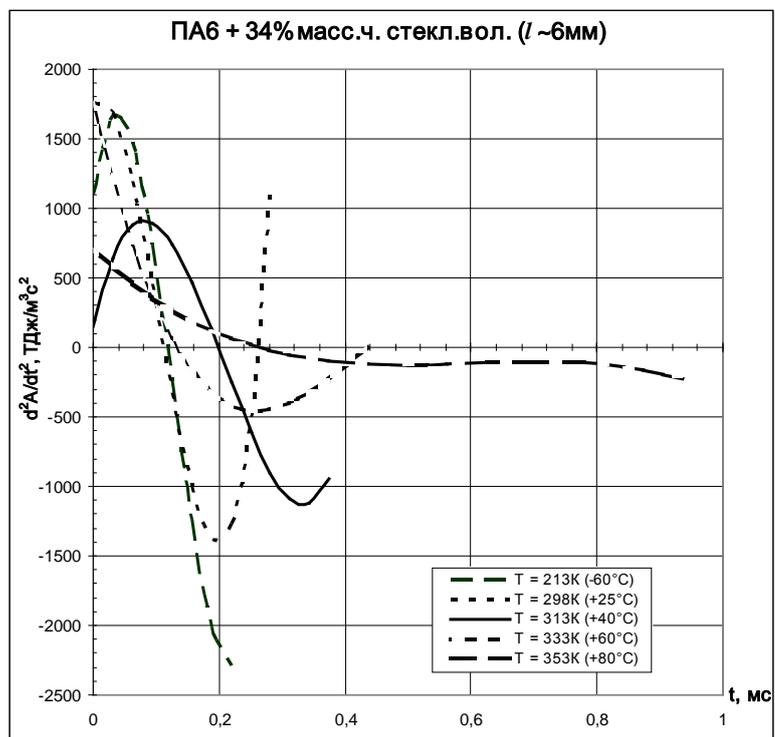
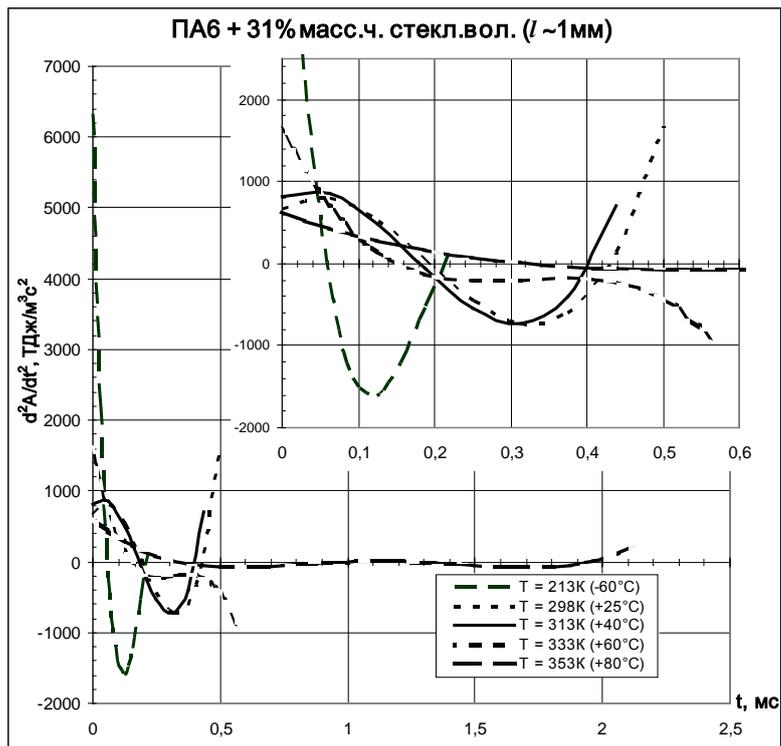
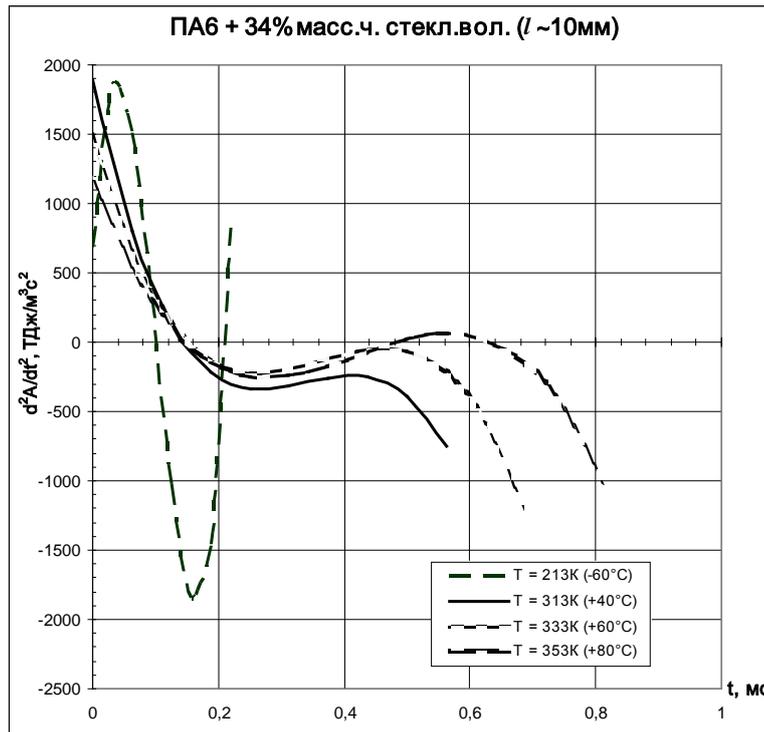


Рис.7. Интенсивности удельного энергопоглощения ПА6 при сжатии в температурном диапазоне 298К-333К.

Ненаполненный полимер проявляет высокую интенсивность удельного энергопоглощения  $\left(\frac{d^2 A}{dt^2}\right)$  в самом начале процесса осадки. С повышением температуры этот параметр значительно снижается. И на временных моментах  $\sim 0,5$  мс снижается до очень невысокого уровня, практически, на начальных стадиях осадки сжатия, колеблясь на малых значениях до окончания пластического сжатия образца (см. рис.7). Вероятно, для молекулярных структур алифатических полиамидов характерны процессы молекулярных перестроек с интенсивным поглощением энергии воздействия именно на начальных стадиях развития импульса внешней нагрузки. А дальнейшая деформационная осадка с достижением пластичности материала, возможно, сопровождается развитием внутренних перераспределений поступающей энергии. Потеря устойчивости, преимущественно за счёт потери формы–выпучивания, по механизму пластического формоизменения образца на диаграммах рис.7 соответствует этапам с выраженными отрицательными уровнями параметров  $\frac{d^2 A}{dt^2}$ .

Введение волокнистого наполнителя значительно повышает достижимые уровни этого параметра, в особенности, на начальном этапе деформационного отклика всех рассмотренных полиамидных композитов, что отображено на рис.8. Композиты с удлинёнными волокнами (6 и 10 мм) на начальном этапе отклика на импульс воздействия проявляют резко возросшие характеристики по интенсивности энергопоглощения (213 К и 298 К). Причём уменьшение длины волокна до 1 мм может увеличивать величину  $\frac{d^2 A}{dt^2}$  более чем на порядок.





в)

Рис.8. Интенсивности удельного энергопоглощения композитов на основе ПА6, наполненного стекловолокнами длиной: а) 1 мм, б) 6 мм, в) 10 мм.

Данные на рис.8 выявляют также для всех трёх видов композитов отчётливые этапы диаграмм с достаточно большими уровнями отрицательных значений параметра  $\frac{d^2A}{dt^2}$ . Характер и длительности проявляемых исследованными композитами этапов положительных и отрицательных уровней параметров  $\frac{d^2A}{dt^2}$  весьма различны и, очевидно, определяются типом и свойствами волоконных наполнителей, практически, для всех температур испытаний.

Выявляемые представленными данными этапы на диаграммах параметра интенсивности поглощения энергии могут иметь важное значение для выбора путей оптимизации структур композитов обсуждаемого назначения. Первичный этап, характеризующийся весьма значительными показателями поглощения энергии, достаточно скоротечен. Имеющиеся сведения о молекулярных неоднородных процессах фононного энергонасыщения дилатонно-кластерных зон в материалах [10,11], вероятно, могут объяснить некоторые проявления интенсивного поглощения энергии на положительно означенных этапах диаграмм параметра  $\frac{d^2A}{dt^2}$ . Развитие этих зон явно может регулироваться, в определённых пределах, размерной структурой наполнителей. Например, об этом свидетельствуют данные на рис.7 и рис.8. По достижении критических состояний в кластерах (см. [11] и для полиамида [10]) в полимере формируются энергетические потоки, инициирующие развитие отличающихся от изначальных видов деформационных

процессов. На диаграммах  $\frac{d^2A}{dt^2}$  эта стадия характеризуется отрицательными значениями параметра энергопоглощения. Физически это может означать то, что часть энергии, накопленной в образце, может расходоваться на развитие внутренних физико-химических процессов, а часть энергии может рассеиваться на взаимодействие с окружающими материальными объектами.

Обобщая изложенное в разделах 3.2.1 и 3.2.2, отметим следующее:

1. Исследование предложенных параметров энергопоглощения рассмотренных образцов  $\left(\frac{d^2W}{dt^2}, \frac{d^2A}{dt^2}\right)$  позволяют отчетливо выделить этапность развития деформационных процессов. Закономерности формирования этапных состояний и их влияние на напряжённо-деформированные состояния образцовых объектов весьма специфичны и требуют отдельного рассмотрения.
2. Оценка этапности энергопоглощающих состояний с помощью параметра интенсивности  $\left(\frac{d^2W}{dt^2}, \frac{d^2A}{dt^2}\right)$  показывает строгое совпадение положения особых точек (экстремумы, перегибы, пересечения с осями) на диаграммах энергопоглощения (рис.5,6,7,8) с изменением наблюдаемого характера отклика на внешнее воздействие. В частности, в момент времени при котором вторая производная меняет знак на экспериментальных образцах отмечалось начала потери несущей способности, что для ячеистых образцов выражалось, либо в разрушении стенок, либо в их выпучивании, а для композитных преимущественно потерей формы-выпучиванием. Специфические процессы инициируются весьма различающимися физическими состояниями и превращениями структур ячеистых и волокнодержающих образцов материалов. Поэтому кинетика их развития в рассмотренных структурах, очевидно, требует детального их изучения с позиций изложенного подхода.
3. Достаточно отчетливо выявляется зависимость оценок энергопоглощающих факторов в обоих типах структур от параметров ячеистых образцов и композитов рассмотренного типа. Это подтверждает возможность эффективного регулирования и оптимизации структур монолитных слоёв и ячеистых заполнителей в трёхслойных панелях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод анализа особенностей поведения материалов для различных слоёв многокомпонентных панелей на внешнее механическое воздействие, основанный на изучении кинетики изменения параметров интенсивности удельной энергоёмкости, позволяет выделить этапы процессов деформации образцов под нагрузкой сжатия и этапы развития внутренних переходных процессов, формирующих перестройки внутренних структур полимеров. Эти этапы численно характеризуются положительными и отрицательными зонами экспериментальных диаграмм интенсивности энергопоглощения. Разработаны методики испытаний образцов полимеров ячеистых материалов. Проведённые испытания этих материалов позволили выявить явления подобия деформационных процессов в исследуемых типах образцов на начальной стадии деформационной осадки с последующим

переходом на этапы развития специфических внутренних процессов, индивидуально характерных для ячеистых и монолитных композитных структур. Показана целесообразность развития поисковых работ в направлении совершенствования изложенного подхода к развитию методов оптимизации внутренних структур сложных материалов обсуждаемых типов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Яровая А.В. *Механика слоистых вязкоупруго-пластических элементов конструкций*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.
2. Попов Б.Г. *Расчёт многослойных конструкций вариационно-матричными методами: Учебное пособие*. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 294 с.
3. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – СПб.: Изд-во НОТ, 2008. – 822 с.
4. Валиев Р.З., Александров И.В. *Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией*. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
5. Fleck N.A., Deshpande V.S., Ashby M.F. *Micro-architected materials: past, present and future* // Proc.R.Soc.A. – 2010. – Vol.466. – Iss.2121 – Pp.2495-2516.
6. Lorenzo Valdevit, Scott W.Godfrey, Schaedler T.A., Jacobsen A.J., Carter W.B. *Compressive strength of hollow microlattices: Experimental characterization, modeling and optimal design* // J.mater.Res. – 2013. – Vol.28. – No.17. – Pp.2461-2473.
7. Гибсон Ян, Розен Д., Стакер Б. *Технологии аддитивного производства*. – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.
8. Рыбин А.А. *Техника исследования волновых распределений в многослойных пакетных системах при динамическом индентерном внедрении* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2000. – Т.6. – №3. – С.383-400.
9. Рыбин А.А., Белоусов С.Г., Сидоров И.И., Тихонов И.В. *Механические свойства и последовательность этапов разрыва нитей из арамидных волокон типа Русар при ударных нагрузках* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2002. – Т.8. – №2. – С.261-269.
10. Рыбин А.А., Бухаров С.В. *Влияние волокнистого стеклонаполнителя на активацию очагов множественного дилатонного разрушения полиамида при ударном сжатии. Части I и II* // Научные труды МАТИ. – 2006. – Вып.10(82). – С.64-73.
11. Петров В.А., Башкарев В.И., Веттегрень В.И. *Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов*. – СПб.: Политехника, 1993. – 475 с.

## REFERENCES

1. Gorshkov A.G., Starovoitov E.I., Iarovaia A.V. *Mekhanika sloistykh viazkouprugo-plasticheskikh elementov konstruktssii [Mechanics of laminated viscoelastic-plastic elements constructions]*. – Moskva: FIZMATLIT, 2005, 576 p.
2. Popov B.G. *Raschet mnogoslonykh konstruktssii variatsionno-matrichnymi metodami: Uchebnoe posobie [The calculation of multilayer structures variational-matrix methods: textbook]*. – Moskva: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1993, 294 p.

3. Mikhailin Iu.A. *Konstruksionnye polimernye kompozitsionnye materialy [Structural polymer composite materials]*. – St. Petersburg: NOT, 2008, 822 p.
4. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoi plasticheskoi deformatsiei [Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation]*. – Moskva: Logos, 2000, 272 p.
5. Fleck N.A., Deshpande V.S., Ashby M.F. *Micro-architected materials: past, present and future*. Proc.R.Soc.A., 2010, Vol.466, Iss.2121, Pp.2495-2516.
6. Lorenzo Valdevit, Scott W.Godfrey, Schaedler T.A., Jacobsen A.J., Carter W.B. *Compressive strength of hollow microlattices: Experimental characterization, modeling and optimal design*. J.mater.Res., 2013, Vol.28, No.17, Pp.2461-2473.
7. Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker Additive Manufacturing Technologies. – Springer Science+Business Media New York, 2015, 656 p.
8. Rybin A.A. *Tekhnika issledovaniia volnovekhraspredelenii v mnogoslainnykh paketnykh sistemakh pri dinamicheskom indenternom vnedrenii [The technique of study of wave distributions in multilayer pack systems under dynamical indentation of an indenter]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2000, Vol.6, No.3, Pp.383-400.
9. Rybin A.A., Bielousov S.G., Tikhonov I.V., Sidorov I.I. *Mekhanicheskie svoistva i posledovatel'nost' etapov razryva nitei iz aramidnykh volokon tipa Rusar pri udarnykh nagruzkakh [Mechanical properties and successive stages of rupture of fibers made from filaments of Rusar-type under shock loadings]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2002, Vol.8, No.2, Pp.261-269.
10. Rybin A.A., Bucharov S.V. *Vliianie voloknistogo steklonapolnitelia na aktivatsiiu ochagov mnozhestvennogo dilatonnoho razrusheniia poliamida pri udarnom szhatii. Chasti I i II [The influence of fibrous stakanovites activation foci multiple dietologo the destruction of the polyamide under shock compression. Parts I and II]*. Nauchnye trudy Moskovskogo Aviatsionnogo Tekhnologicheskogo Instituta. 2006, Iss.10(82), Pp.64-73.
11. Petrov V.A., Bashkarev V.I., Vettegren' V.I. *Fizicheskie osnovy prognozirovaniia dolgovechnosti konstruksionnykh materialov [The physical basis of prediction of durability of structural materials]*. St. Petersburg: Politekhnik, 1993, 475 p.

Поступила в редакцию 4 сентября 2017 года.

---

Сведения об авторах:

Рубан Даниил Вячеславович – ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (Государственный университет)», г. Долгопрудный, Россия; e-mail: [daniilruban@yandex.ru](mailto:daniilruban@yandex.ru)

Рыбин Александр Александрович – д.т.н., с.н.с., ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», г. Москва, Россия; e-mail: [alex.rubin2011@yandex.ru](mailto:alex.rubin2011@yandex.ru)

Червяков Александр Анатольевич – к.т.н., доц., ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: [dylatonimpact@yandex.ru](mailto:dylatonimpact@yandex.ru)

Турков Владимир Евгеньевич – к.ф.м.н., нач. НИЦ нанотехнологий; зам. ген. дир., ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», г. Москва, Россия; e-mail: [veturkov@yandex.ru](mailto:veturkov@yandex.ru)

Ульянов Сергей Алексеевич – зам. нач. НИЦ нанотехнологий по научной работе, ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», г. Москва, Россия; e-mail: [ulyanov@inbox.ru](mailto:ulyanov@inbox.ru)