

А.А. БАРУЗДИН¹, Л.В. ЗАКРЕВСКАЯ¹

¹Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

РЕЦИКЛИНГ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Разработано технологическое решение обеспечивающее получение композиционного строительного материала на основе отходов сшитого полиэтилена и боя керамического кирпича. Выявлен характер влияния сшитого полиэтилена на прочностные и деформативные характеристики композита. Проведено сравнение характера разрушения композитов на основе полиэтиленовых гранул, отходов сшитого полиэтилена, кастробетона и традиционного бетона. Выявлено, что характер разрушения предлагаемых композитов больше соответствует традиционному бетону, при этом предел прочности на сжатие составляет 20-40 МПа в зависимости от содержания сшитого полиэтилена. Оценена адгезия заполнителя в виде сшитого полиэтилена к цементной матрице. Установлено, что заполнитель в виде сшитого полиэтилена обладает хорошим сцеплением с цементной матрицей за счет неправильной формы частиц, шероховатости поверхности и наличия в составе сшитого полиэтилена технического углерода. Измеренное значение адгезии поверхности частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице составило 0,98 МПа, что сопоставимо с адгезией цементной матрицы к полированной поверхности каменных заполнителей. Дано объяснение формированию гетерогенной прочной структуры за счет механического и химического взаимодействия компонентов.

Ключевые слова: рециклинг, сшитый полиэтилен, кирпичный бой, прочность, модуль деформации, характер разрушения, адгезия.

A.A. BARUZDIN¹, L.V. ZAKREVSKAYA¹

¹ Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, Vladimir, Russia

RECYCLING OF CROSS-LINKED POLYETHYLENE TO CREATE COMPOSITE BUILDING MATERIALS

Abstract. A technological solution of the production of composite building material based on waste cross-linked polyethylene and ceramic brick has been developed. The nature of the influence of cross-linked polyethylene on the strength and deformation characteristics of the composite is revealed. The nature of the destruction of composites based on polyethylene granules, waste of cross-linked polyethylene, hempcrete and traditional concrete is compared. It was revealed that the nature of the destruction of the proposed composites corresponds more to traditional concrete than to hempcrete, while the compressive strength is 20-40 MPa, depending on the content of crosslinked polyethylene. The adhesion of the aggregate in the form of cross-linked polyethylene to the cement matrix was evaluated. It was found that the aggregate in the form of cross-linked polyethylene has good adhesion to the cement matrix due to the irregular shape of the particles, surface roughness and the presence of carbon black in the composition of cross-linked polyethylene. The measured value of adhesion of the surface of cross-linked polyethylene particles to the cement matrix was 0.98 MPa, which is comparable to the adhesion of the cement matrix to the polished surface of natural aggregates. An explanation for the formation of a heterogeneous durable structure due to the physical and chemical interaction of the components is given.

Keywords: recycling, cross-linked polyethylene, brick scrap, strength, modulus of deformation, nature of destruction, adhesion.

Введение

В настоящее время большую популярность получают композиционные материалы на основе органических заполнителей природного происхождения под общим названием арболит. Это разновидность легкого бетона на основе минерального вяжущего и органического заполнителя, такого как древесина. Основные достоинства данного материала: экологичность, низкая плотность ($400-850 \text{ кг/м}^3$), малая теплозвукопроводность, хорошая обрабатываемость, высокая морозо- и биостойкость. Прочность арболита на сжатие может достигать 5 МПа, в то время как прочность на изгиб изменяется от 0,7 до 1 МПа. Наряду с достоинствами арболит имеет и ряд недостатков. Содержащиеся в нем в большом количестве древесные материалы склонны быстро накапливать влагу, а также арболит чувствителен к качеству исходного сырья и изменению состава [1,2].

Вышеперечисленных недостатков могут быть лишены легкие бетоны на основе органического синтетического сырья.

Учеными со всего мира ведутся исследования, направленные на применение отходов полимеров в качестве заполнителей различных композиционных материалов на неорганическом вяжущем.

Авторы [3-4] отмечают, что при добавлении в состав растворов, бетонов пластиковых волокон в количестве 1-2% имеет место улучшение механических характеристик материалов.

При полной или частичной замене натурального заполнителя на заполнитель из полимерных отходов происходит понижение плотности бетона, снижается прочность при сжатии и изгибе, что по мнению большинства ученых связано с пониженной адгезией полимерных частиц к цементной матрице, ограниченной гидратацией цемента вблизи пластиковых частиц, несоответствием модуля упругости матрицы и заполнителя [5-6]. Помимо этого, растворы с добавлением пластиковых отходов более стойки в кислых средах, обладают пониженным проникновением хлорид ионов и меньше подвержены растрескиванию вследствие усадки [6-7].

Одним из видов полимерных строительных отходов являются отходы труб, кабелей и изоляции, изготовленные из сшитого полиэтилена. Данный вид отходов обладает рядом особенностей. Благодаря технологии сшивки молекулы полиэтилена образуют пространственную структуру, которая увеличивает термостойкость, диэлектрические и механические свойства полиэтилена, однако по этой же причине затруднена переработка таких отходов традиционными для полимеров методами. Поэтому значительная часть отходов сшитого полиэтилена складывается на полигонах [8].

Отходы сшитого полиэтилена также возможно использовать в качестве заполнителя при производстве бетонов и композиционных материалов на неорганическом вяжущем. При этом происходит снижение прочности бетона на сжатие, растяжение и изгиб, уменьшается модуль упругости и увеличивается усадка. Положительными эффектами от введения в состав бетона отходов сшитого полиэтилена являются снижение водопоглощения и плотности образцов. Такое изменение свойств авторы [9] связывают со снижением жесткости каркаса бетона вследствие включения отходов сшитого полиэтилена, пониженным удельным весом и водопоглощением самого полиэтиленового заполнителя, а также его плохой адгезией к цементной матрице.

Отходы на основе сшитого полиэтилена в своем составе зачастую содержат небольшое количество технического углерода, который может положительно влиять на свойства композиций на основе неорганических вяжущих.

Авторами работ [10,11] было установлено, что при концентрации технического углерода 0,005% от массы цемента прочность бетона на изгиб и сжатие повышается до 50,25%. Отмечается, что образцы без технического углерода имеют значительное количество мелких пор. В то время как образцы, модифицированные свежеприготовленной дисперсией технического углерода, имеют плотную и ровную зону контакта цементной матрицы с заполнителем.

Введение технического углерода в состав бетона приводит к его структурированию, увеличению плотности упаковки зерен цементной матрицы, уплотнению контактных слоев на границе матрицы и заполнителя, а также интенсификации процесса гидратации цемента с образованием гидросиликатов кальция меньшей основности за счет введения ультрадисперсной сажи. Данные эффекты по степени модификации цементной матрицы сопоставимы с дисперсиями углеродных нанотрубок [10-11].

Отличительной чертой, как композитов на основе отходов древесины, так и композитов на основе отходов полимеров, является характер поведения композитов под разрушающей нагрузкой. Не наблюдается типичного хрупкого разрушения как в случае с традиционным бетоном, характер поведения под нагрузкой становится более пластичным. Испытуемый образец деформируется, сжимается без видимых признаков разрушения [12].

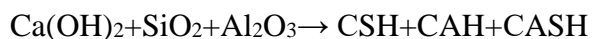
В данной работе предпринята попытка описать характер разрушения композитов на основе неорганических вяжущих и полимерных отходов.

В качестве вяжущего в таких композитах могут выступать цемент, известь, цемент Сореля, гипс и т. д.

Весьма перспективным в этом отношении может быть синтез комплексного вяжущего вещества на основе рециклинга в строительстве состоящего из цемента и отходов кирпича керамического в виде тонкомолотой составляющей.

Частицы тонкомолотого кирпича играют роль дополнительных центров кристаллизации, позволяющих ускорить процесс образования новой фазы и способствующей наиболее полной организации системы.

Тонкомолотая составляющая отходов керамического кирпича имеет удельную поверхность от 2500 см²/г. Благодаря размеру частиц добавки соразмерному с размером частиц вяжущего ($S_{уд}=3000-4000$ см²/г) и наличию в составе молотого кирпича SiO₂, Al₂O₃, происходит уплотнение и упрочнение структуры композиционного материала за счет взаимодействия портландита (Ca(OH)₂) и указанных оксидов и образования гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, по следующим схемам[13,14]:



В качестве добавок улучшающих свойства композитов рационально применять пластификаторы и растворы электролитов.

Добавки пластификаторы, в частности П-17, способны адсорбироваться на поверхности частиц вяжущего вещества и новообразований, понижая поверхностное натяжение и позволяя снизить водоцементное соотношение и как следствие повысить прочность композитов.

Добавки электролитов, в частности, CaCl₂ в свою очередь приводят к пересыщению раствора и укрупнению частиц, и ускорению их твердения и повышению (ранней) прочности цементного камня. В системах с добавками электролитов происходит переход коагуляционной структуры в кристаллизационную на ранних стадиях гидратации и твердения.

В данной работе произведена разработка составов композиционных материалов на основе портландцемента, отходов сшитого полиэтилена, кирпичного боя, а также добавки белой сажи, пластификатора П-17 и раствора CaCl₂. Выявлен характер влияния отходов сшитого полиэтилена на свойства композита, также произведено сравнение характера разрушения разработанных композитов на основе сшитого полиэтилена, композитов с заполнителем в виде полиэтиленовых гранул, костробетона и обычного бетона.

Также, в работе оценена адгезия заполнителя в виде отходов сшитого полиэтилена к цементной матрице. Один из важных факторов долговечности бетона это хорошее сцепление в зоне контакта заполнителя и цементной матрицы. В случае заполнителей из полимерных

отходов, которые химически не взаимодействуют с вяжущим контактный слой практически отсутствует. Сцепление заполнителя с цементным камнем в этом случае осуществляется в основном за счет неровностей поверхности.

По данным обзоров [15,16] сцепление цементного камня с полированной поверхностью известняка, гранита, песчаника составляет от 0,6 до 0,9 МПа. А при шероховатой поверхности порядка 1 – 1,8 МПа, таким образом, изменение сцепления может составлять до 1,5-2 раз.

Материалы и методы

Исследования проводились на базе кафедры СП ВлГУ имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых с помощью современного оборудования и приборов, таких как пресс ПИ-2000-II производства компании «МЕТРОТЕСТ», машина для определения прочности при изгибе МИИ-100, смеситель лабораторный ЗУБР-1400, прибор для измерения удельной поверхности и среднего размера частиц ПСХ-10, лабораторная мельница ЛМ-2, стандартный конус ППР для определения подвижности смеси, прибор Вика, формы для образцов-балочек 16x4x4 см, набор сит, оптический микроскоп МБС-9, сканирующий электронный микроскоп FIB-SEM LMI-700. Рентгенофазовый анализ проводился на порошковом дифрактометре Bruker AXS D8 ADVANCE (модель D8, фирма-производитель: «Bruker Optik GmdH», Германия).

Отходы кирпичного боя дробились с помощью ручного инструмента на куски менее 5-10 мм и подвергались помолу на лабораторной мельнице, представленной на рисунке 1а. Помол велся до прохождения крошки кирпича через сито 0,08 мм и достижения удельной поверхности $S_{уд} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$.

Содержание тонкомолотых отходов боя керамического кирпича во всех образцах поддерживалось на уровне 20% от содержания цемента. Данное значение было выбрано на основании предыдущих экспериментов и исследований авторов, по результатам которых было установлено, что замена цемента тонкомолотой кирпичной крошкой до 20% безболезненно сказывается на основных свойствах композитов (прочность, плотность, водопоглощение).

Измельчение отходов сшитого полиэтилена производилось с помощью измельчителя для пластмасс XFS-300 представленном на рисунке 1б. Для достижения наилучшего результата каждую партию полиэтилена подвергали дроблению несколько раз, после чего отсеивали наименьшую фракцию 2,5-5 мм, а остаток на сите отправляли на повторное измельчение.



Рисунок 1 – Оборудование для подготовки отходов: а) лабораторная мельница ЛМ-2, б) измельчитель для пластмасс XFS-300

В таблице 1 приведены свойства материалов использовавшихся для синтеза композитов на основе отходов сшитого полиэтилена.

Таблица 1 – Свойства используемых материалов

Материалы	Свойства
Портландцемент ПЦБ 1-500-Д0	Цемент белый, без добавок, марки 500, $S_{уд} > 460 \text{ м}^2/\text{кг}$
Кирпичная крошка	Фракция менее 0,08 мм; $S_{уд}=2500 \text{ см}^2/\text{г}$; $\rho_{нас}=820 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_{ист}=2650 \text{ кг}/\text{м}^3$;
Отходы сшитого полиэтилена	Фракция 2,5-5 мм
Белая сажа БС-120	$S_{уд}=120 \text{ м}^2/\text{г}$; Массовая доля $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} - 87\%$
Пластификатор П-17	50%-ный раствор, плотностью $\geq 1,1 \text{ г}/\text{см}^3$

На рисунке 2 представлено исследование структуры отходов сшитого полиэтилена с помощью рентгенофазового анализа.

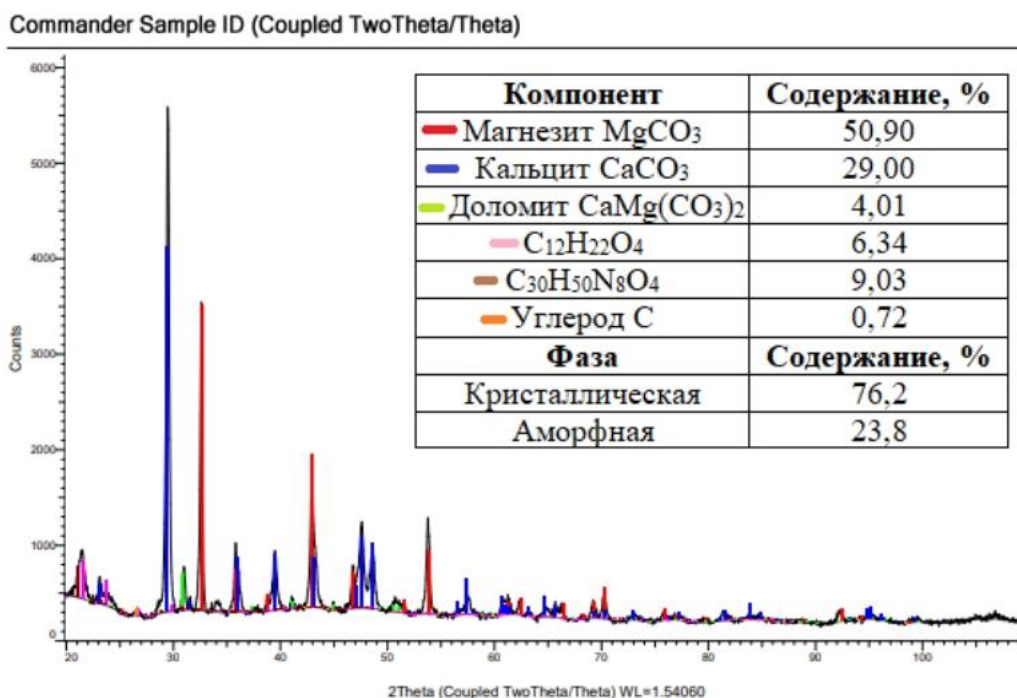


Рисунок 2 – Исследование структуры отходов сшитого полиэтилена с помощью рентгенофазового анализа

Из результатов анализа можно сделать вывод, что в составе сшитого полиэтилена содержится технический углерод, который при взаимодействии с цементной матрицей может улучшать ее структуру и уплотнять зону контакта с заполнителем.

Наличие органических соединений свидетельствуют о возможной сшивке методом азотирования. Минеральная часть в виде магнезита, кальцита и доломита очевидно присутствует из-за применения их при сшивке. Роль каждого из этих компонентов предстоит изучить при дальнейших исследованиях, бесспорно их присутствие сказывается на улучшении механических свойств композита.

На рисунке 3 представлен внешний вид отходов сшитого полиэтилена и результаты исследования их структуры с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

На рисунке 3а видно, что дробленые отходы сшитого полиэтилена представлены частицами неправильной формы с неровной, шероховатой поверхностью. Эти же факты подтверждаются и исследованиями частиц с помощью растровой электронной микроскопии

(РЭМ). Частицам отходов сшитого полиэтилена присущи микропустоты и поры (рис.3б), значительная неровность, шероховатость поверхности (рис.3в) и волокнистая разветвленная структура (рис.3г). Все эти данные могут явиться причиной неплохой механической адгезии частиц дробленого сшитого полиэтилена к цементной матрице вопреки данным авторов [5,9].

Механические испытания проводились с использованием пресса ПИ-2000-II компании «МЕТРОТЕСТ» (прикладывает нагрузку до 2000 кН, относительная погрешность силоизмерителя $\pm 1\%$, перемещение подвижной плиты до 360 мм, абсолютная погрешность измерения перемещения подвижной плиты при перемещениях до 10 мм - $\pm 0,1$ мм).

Для сравнения характера разрушения испытуемых материалов помимо образцов композита на основе отходов кирпичного боя и сшитого полиэтилена были изготовлены образцы традиционного бетона и костробетона.

Образцы доводились до разрушения и по результатам испытания, были получены графики зависимости укорочения образца от нагрузки, которые затем были преобразованы в диаграммы напряжений при сжатии.

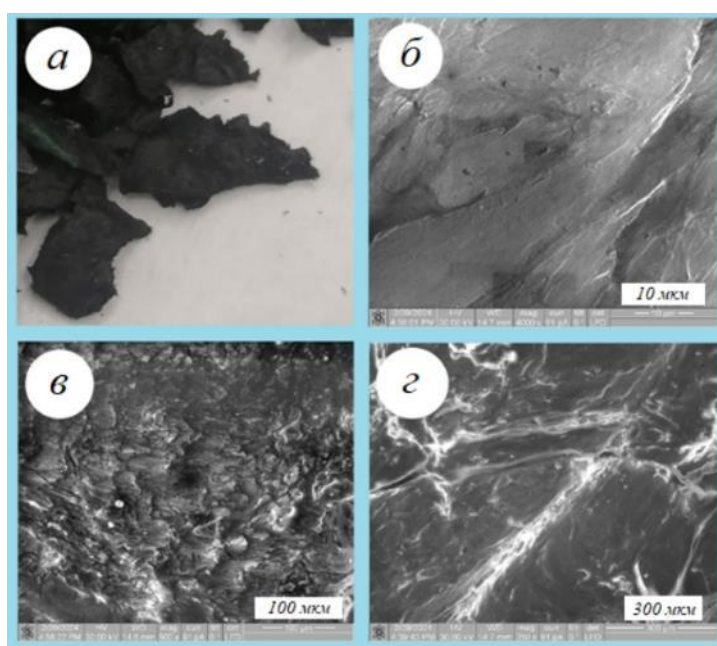


Рисунок 3 - Внешний вид отходов сшитого полиэтилена и результаты исследования их структуры с помощью растровой электронной микроскопии(РЭМ): а) внешний вид частиц сшитого полиэтилена, б,в,г)исследование структуры отходов сшитого полиэтилена с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ)

Оценка адгезии заполнителя в виде дробленых отходов сшитого полиэтилена к цементной матрице производилась с помощью прибора ПСО-МГ4 по следующей методике: изготавливался образец цементной матрицы размером 16×16×4 см, на поверхность которого в центре в процессе был нанесен равномерный слой частиц сшитого полиэтилена; после этого по прошествии 28 суток к покрытию из частиц сшитого полиэтилена на двухкомпонентный клей была приклеена отрывная пластина размером 30×30 мм и измерено усилие отрыва пластины. Схематически методика измерения адгезии представлена на рисунке 4.

Адгезия частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице была вычислена по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

где F – усилие отрыва пластины, кН;

S – площадь отрывной пластины, см²;

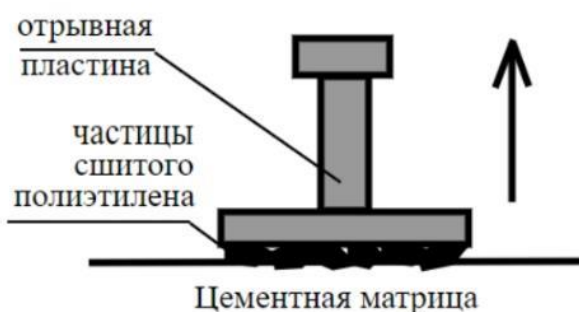


Рисунок 4 – Схема методики определения адгезии заполнителя в виде сшитого полиэтилена к цементной матрице

Результаты исследования и их анализ

В таблице 2 приведены составы образцов композиционных материалов на основе портландцемента и отходов кирпичного боя и сшитого полиэтилена.

В таблице 3 приведены свойства образцов синтезированных композиционных материалов.

Таблица 2 – Составы образцов композиционных материалов на основе портландцемента и отходов кирпичного боя и сшитого полиэтилена.

Марка состава	Компоненты, масс %					
	Портланд-цемент	Кирпичная крошка	Белая сажа	Сшитый полиэтилен	Пластификатор П-17	10%-ый раствор CaCl_2
КСП1	48,00	12,00	0,80	22,57	0,43	16,20
КСП2	49,00	12,25	0,80	20,95	0,45	16,55
КСП3	50,00	12,50	0,80	19,40	0,45	16,85
КСП4	52,50	13,13	0,80	15,40	0,47	17,70
КСП5	55,00	13,75	0,80	11,45	0,50	18,50
КСП6	56,00	14,00	0,80	9,80	0,50	18,90

Таблица 3 – Свойства образцов синтезированных композиционных материалов.

Марка состава	Наименование свойств			
	Плотность ρ , кг/м^3	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа	Прочность на изгиб $R_{изг}$, МПа	Водопоглощение $W_{масс}$, %
КСП1	1762	20,4	4,0	2,13
КСП2	1787	23,1	4,3	2,05
КСП3	1799	26,6	4,3	2,30
КСП4	1813	37,0	4,6	1,86
КСП5	1943	41,6	4,5	2,23
КСП6	1961	43,5	4,8	2,02

На рисунках 5-6 представлены графики зависимости плотности и прочности синтезированных образцов от содержания отходов сшитого полиэтилена по массе.

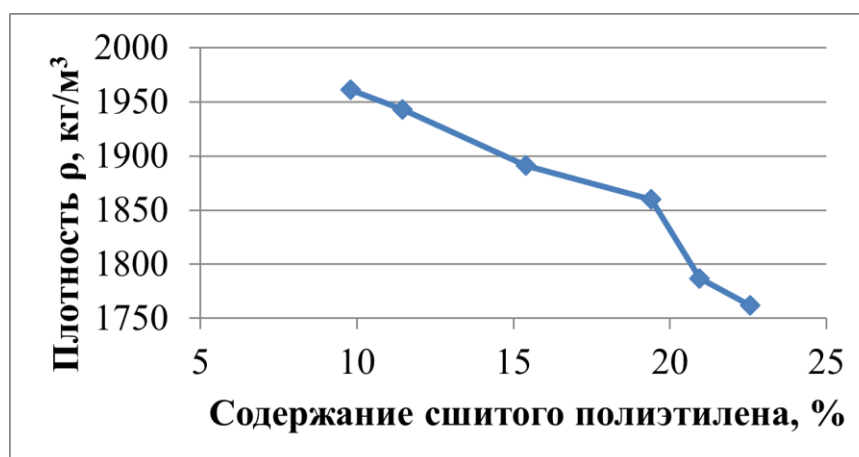


Рисунок 5 – График зависимости плотности синтезированных образцов от содержания отходов сшитого полиэтилена по массе

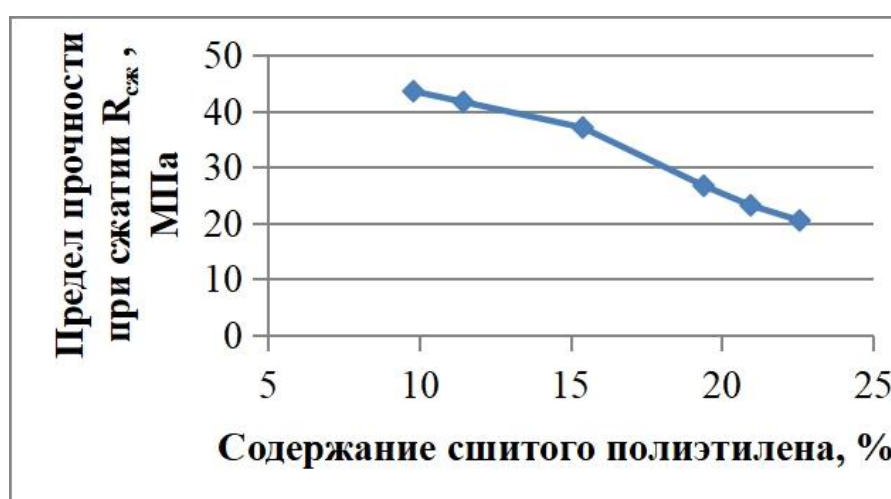


Рисунок 6 – Зависимость предела прочности на сжатие синтезированных образцов от содержания отходов сшитого полиэтилена по массе

Согласно результатам исследования свойств синтезированных образцов прочность материала на основе отходов сшитого полиэтилена и кирпичного боя уменьшается с увеличением доли содержания сшитого полиэтилена, при этом уменьшается плотность образцов.

На рисунках 7-8 представлены графики напряжений-деформаций для исследуемых композитов на основе отходов сшитого полиэтилена, для обычного бетона и для костробетона.

Построенные диаграммы свидетельствуют о том, что характер разрушения образцов синтезированного материала на основе отходов сшитого полиэтилена и кирпичного боя схож с характером разрушения традиционного бетона.

По разрушающей нагрузке предел прочности костробетона (2 МПа) на порядок отличается от двух других бетонов (20 и 26 МПа).

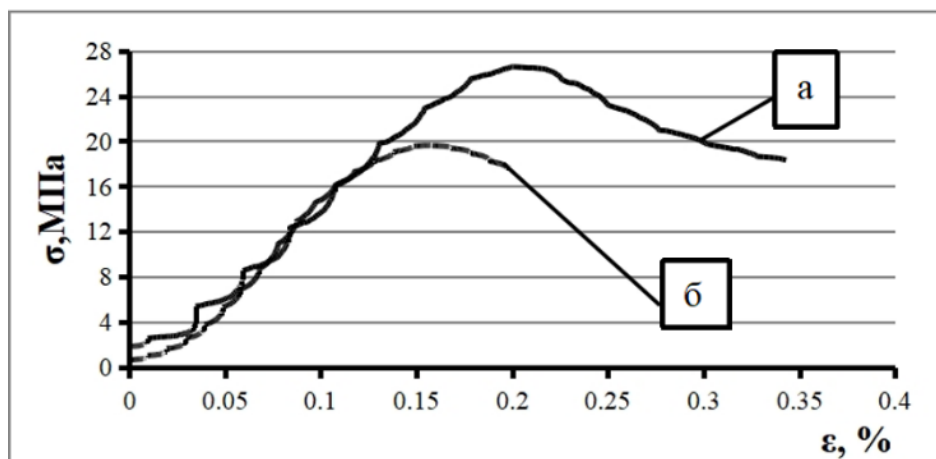


Рисунок 7 – График деформаций-напряжений: а) композита с заполнителем на основе отходов сшитого полиэтилена, б) - традиционного бетона

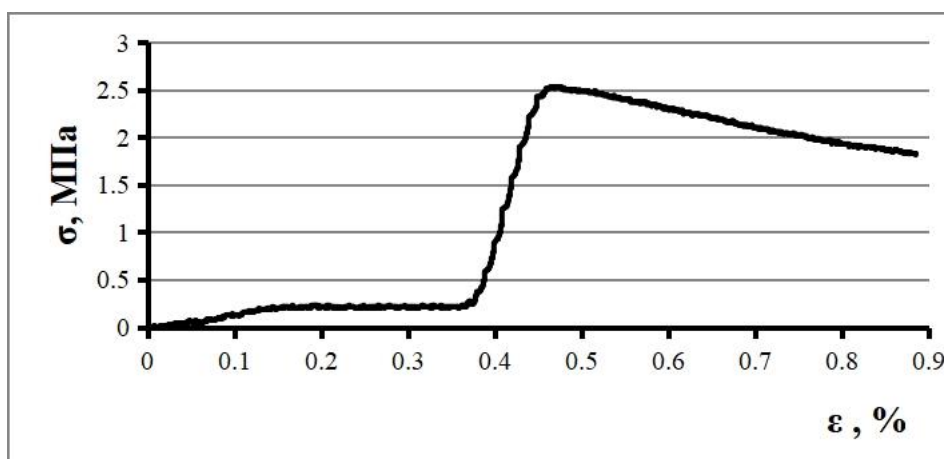


Рисунок 8 – График напряжений-деформаций кострбетона

Упругие деформации композитов под нагрузкой характеризуются модулем упругости ($E=Fl/SΔl=σ/ε$). Чем выше модуль упругости, тем меньше при данной нагрузке будет относительная деформация ($ε=Δl/l_0$). Помимо факторов, связанных с качеством матрицы, модуль упругости композита зависит от содержания и качества заполнителя. Композиционные материалы можно рассматривать как конгломерат из двух компонентов: вяжущего (раствора) и заполнителя. Каждый из этих компонентов занимает в сечении материала определенную часть и участвует в восприятии нагрузки. Если прочность заполнителя в композиционных материалах не всегда полностью используется и, следовательно, не всегда проявляется, то модуль упругости заполнителя непременно отражается на модуле упругости материала.

Модуль упругости гранитного щебня, используемого в качестве заполнителя в обычном бетоне, составляет $E=50000$ МПа, что в 2 раза превышает модуль упругости цементной матрицы $E=25000$ МПа. Модуль упругости органических заполнителей на основе отходов костры конопли и отходов сшитого полиэтилена составляет $E=2000-3000$ МПа и $E=550$ МПа соответственно, что приводит к понижению модуля упругости композиционных материалов на их основе, и повышению пластичности, а следовательно, и изменению характера разрушения материала и его прочности.

В таблице 4 приведены значения модуля упругости при сжатии для традиционного бетона, костробетона и бетона с заполнителем из отходов сшитого полиэтилена, вычисленные по графикам деформаций-напряжений (рис.7, 8).

Сравнивая модули упругости испытанных образцов материалов, можно сделать вывод, что наименее деформативным из сравниваемых материалов является традиционный бетон, сопоставимым, но чуть меньшим модулем деформации обладает синтезированный композит с заполнителем в виде отходов сшитого полиэтилена и наименьшим модулем упругости, а следовательно, наибольшей деформативностью обладает костробетон. Таким образом, по характеру деформаций под нагрузкой синтезированный композиционный материал находится между костробетоном и традиционным бетоном, приближаясь по значению модуля упругости к традиционному бетону.

Таблица 4 - зависимость модуля упругости композитов от вида заполнителя

<i>Наименование материала</i>	<i>Наименование заполнителя</i>	<i>Значение модуля упругости E, МПа</i>
Костробетон	Костра технической конопли	3000
Бетон	Гранитный щебень	20000
Бетон с заполнителем из сшитого полиэтилена	Сшитый полиэтилен	16000

После испытания на прочность при сжатии из образца на основе отходов сшитого полиэтилена были отобраны частицы заполнителя для исследования с помощью оптической и растровой электронной микроскопии (рис.9,10).

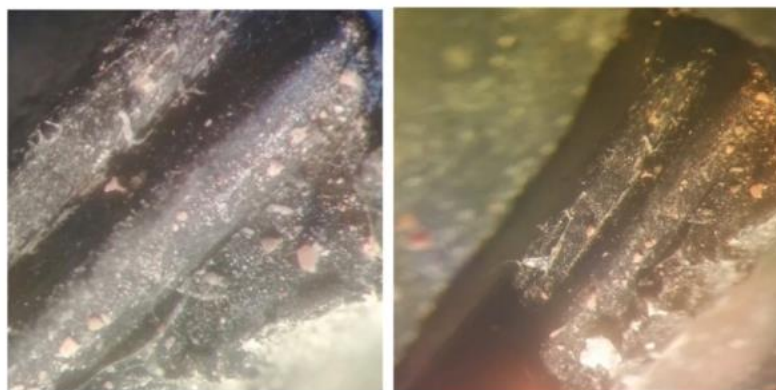


Рисунок 9 – Результаты исследования частиц сшитого полиэтилена с помощью оптической микроскопии после испытания образцов на сжатие

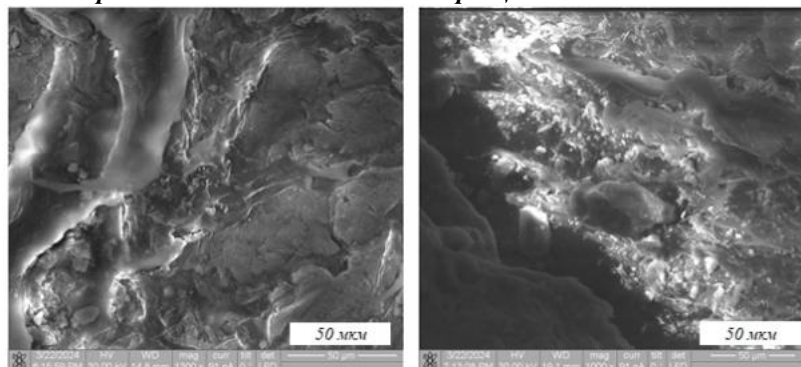


Рисунок 10 – Результаты исследования частиц сшитого полиэтилена с помощью растровой электронной микроскопии после испытания образцов на сжатие

Как видно из результатов исследования, неровности и шероховатости частиц сшитого полиэтилена, извлеченных из затвердевших образцов после испытания на сжатие покрыты продуктами гидратации цементной матрицы, что может говорить о наличии механической адгезии между частицами сшитого полиэтилена и цементной матрицей.

Для большей иллюстративности механического взаимодействия сшитого полиэтилена с цементной матрицей на рисунке 11 приведены снимки оптической микроскопии образцов с наполнителем из отходов сшитого полиэтилена и полиэтиленовых гранул.



Рисунок 11 – Результаты исследования структуры образцов: а) с наполнителем в виде полиэтиленовых гранул, б) с наполнителем в виде дробленых отходов сшитого полиэтилена

На представленных снимках видно, что полиэтиленовые гранулы обладают гладкой сферической формой (рис.11а), что, несомненно, влияет на отсутствие механической адгезии наполнителя и цементной матрицы, тогда как дробленые отходы сшитого полиэтилена за счет неправильной формы и шероховатой поверхности плотно встроены в структуру композита (рис.11б). Как известно полиэтилен прочный термопластичный полимер с переменной кристаллической структурой $((C_2H_4)_n)$, сшивка его обеспечивает превращение структуры из отдельных нитей в сеть и приобретение термореактивных свойств и улучшенных характеристик таких как: химическая стойкость и механическая прочность.

В подтверждение выше сказанного было проведено измерение адгезии частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице с помощью прибора ПСО-МГ4 (рис.12). Об отсутствии адгезии между матрицей и традиционным полиэтиленом можно визуально судить по рис.11а.

По результатам измерения определенное значение адгезии составило 0,98 МПа. Сравнивая полученные при измерениях данные со значениями сцепления цементной матрицы с традиционными натуральными наполнителями (табл.5) можно сделать вывод, что сцепление частиц сшитого полиэтилена и цементной матрицы сопоставимо со сцеплением цементной матрицы и полированного гранита, известняка, песчаника. Это объясняется неправильной формой частиц, неровностью, шероховатостью поверхности и разветвленной волокнистой структурой частиц дробленого сшитого полиэтилена. Также, вероятно, вклад в уплотнение контактов на границе фаз может вносить наличие в составе сшитого полиэтилена технического углерода, который приводит к структурированию матрицы, увеличению плотности упаковки зерен цементной матрицы, уплотнению контактных слоев на границе матрицы и наполнителя, что требует дополнительных исследований.



Рисунок 12 - Измерение адгезии частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице с помощью прибора PCS-MG4: а) приклеенная отрывная пластина, б) испытание, в) место отрыва, г)оторванная пластина с частицами полиэтилена, д) измеренное значение

Таблица 5 – сравнение сцепления цементной матрицы с поверхностью заполнителя в виде отходов сшитого полиэтилена и поверхностью традиционных заполнителей бетонов

<i>Вид поверхности заполнителя</i>	<i>Показатель сцепления цементного камня с поверхностью, МПа</i>
Дробленые отходы сшитого полиэтилена (измеренное значение)	0,98
Полированная поверхность гранита, известняка, песчаника	0,6-0,9 [15,16]
Шероховатая поверхность гранита, известняка, песчаника	1-1,8 [15,16]

Выводы

Основные результаты исследований, проведенных в данной работе:

1. Неправильная форма, шероховатая и неровная поверхность частиц сшитого полиэтилена положительно влияют на механическую адгезию такого заполнителя и цементной матрицы. Помимо шероховатости поверхности влиять на сцепление сшитого полиэтилена и цементной матрицы может наличие в составе заполнителя технического углерода. Измеренное значение адгезии поверхности частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице составило 0,98 МПа, что сопоставимо с адгезией цементной матрицы к полированной поверхности каменных заполнителей.

2. Согласно результатам исследования свойств синтезированных образцов прочность материала на основе отходов сшитого полиэтилена и кирпичного боя уменьшается с увеличением доли содержания сшитого полиэтилена, при этом уменьшается плотность образцов. Прочность образцов при этом варьируется в пределах 20-40 МПа, плотность составляет от 1750 до 1950 кг/м³.

3. При сравнении характера разрушения синтезированных образцов с традиционным бетоном и костробетоном можно сделать вывод о том, что характер разрушения образцов синтезированного материала больше схож с поведением традиционного бетона. По значению модуля упругости синтезированный композиционный материал находится между костробетоном и традиционным бетоном, приближаясь по значению модуля упругости к последнему. Снижение модуля упругости по сравнению с традиционным бетоном происходит в связи с применением более деформативного заполнителя.

4. Результаты данной работы могут быть использованы как основание для дальнейшего исследования механических характеристик композитов на неорганических вяжущих и полимерных заполнителях, а также адгезии полимерных заполнителей к цементной матрице. Образцы синтезированных материалов могут быть рекомендованы в качестве кладочного материала для внутренних и наружных работ, а также в качестве материала для изготовления элементов мощения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение №075-03-2024-112 от 17.01.2024г.).

Acknowledgments

The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2024-0004, state assignment of VISU). The study was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary center for the collective usage of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (Agreement No. 075-03-2024-112 of January 17, 2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин Р.Г., Степанов В.В., Хайруллина Э.Р., Гайнуллина А.А., Степанова Т.О. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. С.123-128.
2. Бакатович А.А., Давыденко Н.В., Долгонок А.В. Стеновые материалы на основе соломы и костры льна с высокими теплоизоляционными свойствами. // Вестник Полоцкого государственного университета. 2016. №8. С.28-32.
3. Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H. Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass // ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity. 2019. pP. 170-176.
4. Сигов Н.Е., Серёгин А.И., Юркин Ю.В. Использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона. // Инженерный вестник Дона. № 8. 2022.
5. M.J. Islam, I.A. Dipta, Md. Rahat. Investigation of recycled poly-ethylene terephthalate (PET) as partial replacement of coarse aggregate in concrete // Journal of Civil Engineering (IEB). 2018. No. 46. Pp. 11-20.
6. KouS.C., LeeG., PoonC.S., Lai W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes // Waste management. 2009. No.29. Pp. 621–629.
7. Chernouti Y., Rabehi B. Strength and durability of mortar made with plastic bag waste (MPBW) // International Journal of Concrete Structures and materials. Vol.6. No.3.
8. Чалов К.В., Луговой Ю.В., Косивцов Ю.Ю., Сульман Э.М. Исследование кинетики термодеструкции сшитого полиэтилена. // Бюллетень науки и практики. 2019. Т.5. №12. С.37-46.
9. Zéhila G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 226. Pp. 1-10.

10. Яковлев Г.И., Гордина А.Ф., Саидова З.С., Бгунова Е.В. Влияние дисперсий технического углерода на свойства мелкозернистого бетона. // *Строительные материалы*. 2018. С. 89-92.
11. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И., Федорова Г.Д., Александров Г.Н., Плеханова Т.А., Дулесова И.Г. Модификация базальтофибробетона нанодисперсными системами. // *Строительные материалы*. 2015. №10. С.64-69.
12. Frigione M. Recycling of PET Bottles as fine aggregate in concrete // *Waste Management*. 2010. No.30 Pp.1101-1106.
13. Значко-Яворский И.Л. Очерки истории вяжущих веществ от древнейших времен до середины XIX века: Монография – Москва-Ленинград: Издательство академии наук СССР, 1963. 500с.
14. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества: Учеб. – Москва: Издательство литературы по строительству, 1966. 406 с.
15. Каримов И.Ш. Прочность сцепления цементного камня с заполнителями в бетоне и факторы влияющие на нее. // *Технологии бетонов*. 2013. №4. С.28-31.
16. Несветаев Г.В. Ву Л.К. Модель для оценки сцепления цементного камня с заполнителем по величине предела прочности бетона при осевом растяжении // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2017. Том 9. №3.

REFERENCES

1. Safin R.G., Stepanov V.V., Hajrullina E.R., Gajnullina A.A., Stepanova T.O. Sovremennyye stroitel'nye kompozicionnyye materialy na osnove drevesnyh othodov [Modern construction composite materials based on wood waste] *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. Pp.123-128. (rus)
2. Bakatovich A.A., Davydenko N.V., Dolzhonok A.V. Stenovyye materialy na osnove solomy i kostry l'na s vysokimi teploizolyacionnymi svojstvami [Flax straw-based wall materials with high thermal insulation properties] *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016. No.8. Pp.28-32. (rus)
3. Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H. Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass // *ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity*. 2019. Pp. 170-176.
4. Sikov N.E., Seryogin A.I., Yurkin Yu.V. Ispol'zovanie plastikovyh othodov v kachestve zapolnitelya v cementom rastvore i prigotovlenii betona [The use of plastic waste as an aggregate in cement mortar and concrete preparation] *Inzhenernyj vestnik Dona*. No. 8. 2022. (rus)
5. M.J. Islam, I.A. Dipta, Md. Rahat. Investigation of recycled poly-ethylene terephthalate (PET) as partial replacement of coarse aggregate in concrete // *Journal of Civil Engineering (IEB)*. 2018. No. 46. Pp. 11-20.
6. KouS.C., LeeG., PoonC.S., Lai W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes // *Waste management*. 2009. No.29. Pp. 621–629.
7. Chernouti Y., Rabehi B. Strength and durability of mortar made with plastic bag waste (MPBW) // *International Journal of Concrete Structures and materials*. Vol.6. No.3.
8. Chalov K.V., Lugovoj Yu.V., Kosivcov Yu.Yu., Sul'man E.M. Issledovanie kinetiki termodestrukcii sshitogo polietilena [Investigation of the kinetics of thermal degradation of cross-linked polyethylene] *Byulleten' nauki i praktiki*. 2019. Vol.5. No.12. Pp.37-46. (rus)
9. Zéhila G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 226. Pp. 1-10.
10. Yakovlev G.I., Gordina A.F., Saidova Z.S., Bgunova E.V. Vliyanie dispersij tekhnicheskogo ugleroda na svojstva melkozernistogo betona [The effect of carbon black dispersions on the properties of fine-grained concrete] *Stroitel'nye materialy*. 2018. Pp. 89-92. (rus)
11. Sarajkina K.A., Golubev V.A., Yakovlev G.I., Fedorova G.D., Aleksandrov G.N., Plekhanova T.A., Dulesova I.G. Modifikaciya bazal'tofibrobetona nanodispersnymi sistemami [Modification of basalt fiber concrete by nanodisperse systems] *Stroitel'nye materialy*. 2015. No.10. Pp.64-69. (rus)
12. Frigione M. Recycling of PET Bottles as fine aggregate in concrete // *Waste Management*. 2010. No.30 Pp.1101-1106.
13. Znachko-Yavorskij I.L. Ocherki istorii vvyazhushchih veshchestv ot drevnejshih vremen do serediny XIX veka [Essays on the history of building binders from ancient times to the middle of the XIX century] Moscow-Leningrad. USSR. 1963. 500p. (rus)
14. Volzhenskij A.V., Burov Yu.S., Kolokol'nikov V.S. Mineral'nye vyazhushchie veshchestva [Mineral binders] Moscow. 1966. 406 p. (rus)
15. Karimov I.Sh. Prochnost' scepreniya cementnogo kamnya s zapolnitelyami v betone i faktory vliyayushchie na nee [The adhesion strength of cement stone to aggregates in concrete and the factors affecting it] *Tekhnologii betonov*. 2013. No.4. Pp.28-31. (rus)
16. Nesvetaev G.V. Vu L.K. Model' dlya ocenki scepreniya cementnogo kamnya s zapolnitelem po velichine predela prochnosti betona pri osevom rastyazhenii [A model for evaluating the adhesion of cement stone to aggregate by the value of the tensile strength of concrete under axial tension] *Internet journal «NAUKOVEDENIE»*. 2017. Vol. 9. No.3. (rus)

Информация об авторах

Баруздин Александр Андреевич

ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия,
аспирант кафедры строительного производства
E-mail: baruzdin98@bk.ru

Закревская Любовь Владимировна

ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры строительного производства
E-mail: lvzak@mail.ru

Information about authors

Baruzdin Aleksandr A.

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russia,
Postgraduate student of the dep. of construction production
E-mail: baruzdin98@bk.ru

Zakrevskaya Lyubov V.

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russia,
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of construction production
E-mail: lvzak@mail.ru