

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 683.531.19 : 544.77.022.823

А.С. Антонов¹, Н.Р. Прокопчук², П.В. Клочко¹, Д.В. Нахват¹¹УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь²УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, БеларусьНАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОМУ СТАРЕНИЮ

Аннотация. Рассмотрены механизмы повышения стойкости полимерных термопластичных матриц к воздействию термоокислительных сред. Исследованы структурные характеристики алифатических полиамидов, модифицированных наноразмерными частицами металлов, образующихся в процессе термоллиза металлосодержащих соединений типа солей органических кислот, в полимерной матрице. Показано, что образование наночастицами физических связей адсорбционного типа с полимерными макромолекулами способствует увеличению стойкости к воздействию термоокислительных сред при повышенных температурах. Эффект антиокислительного действия наноразмерных частиц металлов реализуется на стадии первичной деградации соли-прекурсора с образованием связей адсорбционного типа и последующей стадии образования высокомолекулярных металлосодержащих соединений вследствие вторичных физико-химических реакций, связанных с процессами окисления и взаимодействия оксидных соединений металлов и матричного полимера. Разработаны составы нанокomпозиционных материалов с повышенными параметрами деформационно-прочностных характеристик и стойкостью к термоокислительному старению на основе промышленного полиамида ПА6. Показано, что введение в состав полимерной матрицы наноразмерных частиц металла обеспечивает эффект структурного модифицирования, способствуя повышению параметров эксплуатационных характеристик изделий в металлополимерных системах различного назначения. Разработана конструкция крепежных элементов для фиксации силовых кабелей для изготовления из нанокomпозита на основе полиамида.

Ключевые слова: нанокomпозиционный материал, термопласт, термоллиз прекурсора, структурное модифицирование, термоокислительное старение.

A.S. Antonov¹, N.R. Prokopchuk², P.V. Klochko¹, D.V. Nakhvat¹¹Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus²Belarusian State Technological University, Minsk, BelarusNANOCOMPOSITE THERMOPLASTIC MATERIALS
WITH HIGH RESISTANCE TO THERMAL OXIDATIVE AGING

Abstract. The mechanisms of increasing the resistance of polymeric thermoplastic matrices to the effects of thermo-oxidative media are considered. The structural characteristics of aliphatic polyamides modified with nanosized metal particles formed during the thermolysis of metal-containing compounds such as salts of organic acids in a polymer matrix have been studied. It has been shown that the formation of physical bonds of the adsorption type with polymeric macromolecules by nanoparticles contributes to an increase in resistance to the action of thermal-oxidative media at high temperatures. The effect of the antioxidant action of nanosized metal particles is realized at the stage of primary degradation of the salt-precursor with the formation of adsorption-type bonds and the subse-

quent stage of the formation of high-molecular-weight metal-containing compounds due to secondary physical and chemical reactions associated with the processes of oxidation and interaction of oxide compounds of metals and the matrix polymer. Nanocomposite materials with high parameters of stress-strain characteristics and resistance to thermal-oxidative aging based on industrial polyamide PA6 have been developed. It is shown that the introduction of nanosized metal particles into the polymer matrix provides the effect of structural modification, contributing to an increase in the parameters of the performance characteristics of products in metal-polymer systems for various purposes. The design of fasteners for fixing power cables for manufacturing from a nanocomposite based on polyamide has been developed.

Keywords: nanocomposite material, thermoplastic, precursor thermolysis, structural modification, thermal oxidative aging.

Введение

Одним из перспективных направлений повышения стойкости к термоокислительному старению термопластичных полимерных материалов является их диффузионная обработка в жидкофазных металлосодержащих средах – формиатах (солей муравьиной кислоты) и оксалатах (солей щавелевой кислоты) [1] – [3], приводящая к формированию так называемых металлополимерных систем [1]. Проблема стабилизации, с одной стороны, преследует цель изучить основные химические и физические явления, вызывающие изменение свойств полимеров, прежде всего, под действием процессов старения. С другой стороны, ищутся эффективные пути и средства, замедляющие или предотвращающие эти изменения.

Сформировавшаяся парадигма стабилизации композиционных материалов на основе полимерных матриц с использованием функциональных модификаторов (антиоксидантов, стабилизаторов), введенных в объем изделия или его поверхностный слой [3], [4], не учитывает в полной мере влияние эффекта наносостояния поверхностного слоя дисперсной частицы на параметры структуры на различных уровнях организации. В связи с этим в большинстве публикаций отечественных и зарубежных исследователей, занимающихся вопросами стабилизации полимерных композитов, преимущественное внимание уделяется химическому строению ингибитора термоокислительной деструкции, которое определяет механизмы и кинетику взаимодействия с кислородом и радикальными продуктами цепного процесса.

Анализ литературных источников свидетельствуют о существенной роли энергетического состояния дисперсной частицы в процессах межфазного взаимодействия [5], [6]. Поэтому направленное формирование в структуре полимерного материала дисперсных частиц, находящихся в наносостоянии, на различных стадиях технологического процесса не только увеличит интенсивность антиокислительного действия традиционных антиоксидантов (стабилизаторов), но и позволит применять в качестве антиоксидантов наноразмерные частицы или частицы микронного диапазона с морфологией поверхностного слоя, обеспечивающей проявление наносостояния. Кроме того, оптимизация структуры на различных уровнях организации будет способствовать повышению параметров прочности, гидрофобности, износостойкости, стойкости к многоцикловым воздействиям.

Цель настоящего исследования состояла в анализе механизмов влияния дисперсных металлических частиц на кинетику изменения структуры и параметров характеристик композиционных материалов на основе алифатических полиамидов.

Материалы и методы исследований

Анализ параметров структурных, кристаллохимических и энергетических характеристик наноразмерных частиц, полученных путем кристаллизации жидкофазных сред

в полимерных матрицах, проводили на экспериментальных образцах порошкообразного полиамида 6 (ПА6) и его композитах.

Исследование структурных характеристик разработанных составов композитов на основе ПА6, диффузионно обработанного в 10 %-ом водном растворе формиата меди, проводили на спектрофотометре РВ 2201 путем измерения величины коэффициента пропускания (T , %) образца. Данный прибор является компактным универсальным одноканальным спектрофотометром со спектральным диапазоном работы 190 – 1100 нм и длиной измеряемого оптического пути до 100 мм.

Исследование энергетических характеристик наноразмерных частиц, полученных путем кристаллизации жидкофазных сред в полимерных матрицах, осуществляли методом ТСТ-анализа (термостимулированных токов) с помощью прибора ST-1 на примере диффузионно модифицированных порошкообразных компонентов на основе ПА6, полученных в 10 %-ом растворе формиата меди. Метод ТСТ относится к одному из наиболее чувствительных методов исследования электрических характеристик материалов, в том числе и наноразмерных.

Исследования параметров деформационно-прочностных характеристик композиционных материалов проводили на образцах, изготовленных литьем под давлением, с соблюдением общих требований [7].

Параметры деформационно-прочностных характеристик композиционных материалов определяли на разрывной машине ИР5047-50-11. Определение ударной вязкости осуществляли с помощью маятникового копра с индикатором часового типа ИЧ-25 с точностью измерения до 0,02 мм, снабженным накопечником шириной от 2 до 3 мм, имеющим профиль, соответствующий форме надреза.

Для определения параметров теплофизических характеристик материалов использовали дифференциально-термический анализ (ДТА) и дифференциально-сканирующую калориметрию (ДСК) с помощью приборов Thermoscan-2 и DSC 214 Polyma.

Определение показателя текучести расплава композитов из термопластов проводили по ГОСТ 11645-73 в экструзионном пластометре ПТР-ЛАБ-02.

Для создания геометрических трехмерных моделей объекта исследований использовали пакет прикладных программ SolidWorks 2019, выпускаемый компанией Dassault Systems [8]. Анализ напряженно-деформированного состояния объекта исследований осуществляли в интегрированном модуле SolidWorks 2019 Simulation методом конечных элементов [9] – [11].

Результаты исследований

Для обеспечения высоких показателей стойкости к термоокислительному старению полимерных материалов применяли метод диффузионного насыщения поверхностных слоев термопластичного полуфабриката (порошков, гранул) наноразмерными частицами металла, формируемыми из водных растворов солей металлов – формиатов и оксалатов. Для модифицирования полиамидных матриц методом диффузионного насыщения поверхностных слоев использовали водные растворы формиата меди и полиамидной смолы.

В качестве базового материала использовали ПА6, производимый филиалом «Завод Химволокно» ОАО «Гродно Азот» по технической документации ТУ РБ 500048054.009-2001.

Для модифицирования использовали водные растворы формиата меди (меди муравьинокислой) при содержании модификатора 0,5 – 3,0 мас. % в дистиллированной воде, а также водные растворы водорастворимой полиамидной смолы (товарный продукт «ПроХим DUO») на основе аминоамидов смоляных кислот канифоли, полученной по технологии синтеза, разработанной на кафедре химической переработки древесины уч-

реждения образования «Белорусский государственный технологический университет», и промышленно выпускаемой на ООО «Промхимтехнологии» согласно технической документации ТУ ВУ 1526670.005-2018. Содержание высокомолекулярного модификатора составляло 0,5 – 3,0 мас. %.

Анализ особенностей энергетических характеристик промышленно выпускаемого ПА6 свидетельствует об относительно простой зависимости параметра ТСТ от температуры (рисунок 1). С увеличением температуры обработки кривая ТСТ монотонно увеличивается (при повышении температуры в диапазоне 323 – 393 К), что свидетельствует об образовании оксидных носителей заряда.

При модифицировании полиамидной матрицы формиатом меди в количестве 0,5 – 3,0 мас. % наблюдаются характерные изменения в спектре ТСТ. При этом заметный

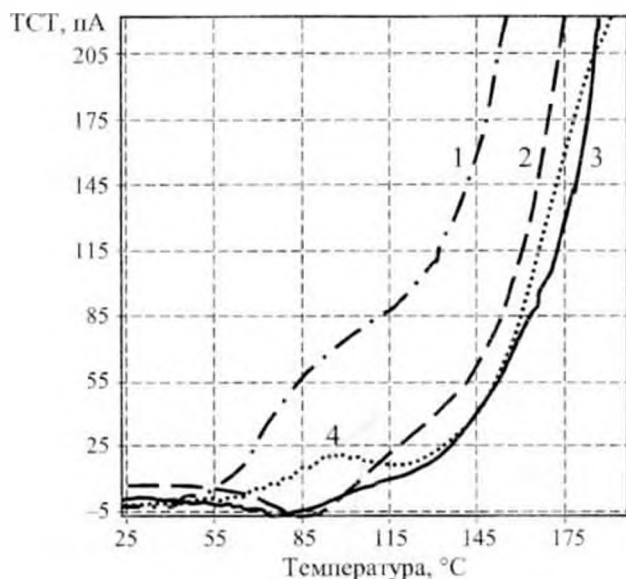
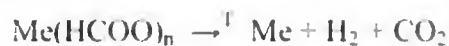


Рисунок 1 – ТСТ-спектры ПА6 (1) и композитов на его основе с добавлением 0,5 мас. % (2), 1,0 мас. % (3) и 3,0 мас. % (4) формиата меди

рост значения токов ТСТ наблюдается уже при температурах примерно 353 – 354 К. Это свидетельствует о том, что вероятность образования носителей заряда в полиамидной матрице увеличивается, и такие носители заряда способны образовывать физические связи с частицами модификатора.

С увеличением температуры обработки свыше 423 К формиат меди подвержен термолизу по схеме:



с образованием наноразмерных частиц металла, находящихся в наносостоянии. Подобные частицы способны вступать во взаимодействие с активными центрами макромолекул ПА6 (–NHCO–), которые

определяют параметры деформационно-прочностных характеристик экспериментальных образцов благодаря межмолекулярному взаимодействию с образованием водородных связей. Диффузионная обработка образцов водными растворами солей меди, подвергающихся термолизу, способствует увеличению их стойкости к окислительному старению.

К числу таких модификаторов, относящихся к стабилизаторам нецепного механизма действия, относятся частицы металлов, ранее называемые коллоидными. По общепринятой в настоящее время терминологии такие частицы принято называть наноразмерными. Подобные наноразмерные частицы металлов получают из соединений типа карбониллов, формиатов, оксалатов и других соединений, неустойчивых к термолизу [2], [12], [13].

Считают, что стабилизирующее действие коллоидных металлов согласно [4] обусловлено связыванием кислорода воздуха и пассивацией активных центров макромолекул в результате их адсорбции на металлической поверхности. Данный механизм предполагает существование на зависимостях «прочность – время окисления» характерных точек перегиба, связанных с полным окислением и дезактивацией металла. Однако экспериментальные зависимости прочностных характеристик стабилизированных

металлами полимеров от времени термоокисления их не имеют [4]. С другой стороны, учитывая, что большинство металлов интенсивно хемосорбирует кислород при достаточно высоких температурах 473 – 773 К [2], не полностью ясны причины их стабилизирующего действия при сравнительно низких температурах – 373 – 423 К. Ранее было отмечено образование при экспозиции полимерных композиций, содержащих высокодисперсные металлы, на воздухе соединений типа солей жирных кислот [14]. Известны различные механизмы действия таких соединений на кинетику термоокисления полимеров.

Для модифицирования полиамидов методом диффузионной обработки целесообразно использовать различные соединения металлов, которые подвергаются термолизу при относительно невысоких температурах, коррелирующих с температурами термообработки изделий из них: формиаты или оксалаты (ФМ), смешанные комплексы алифатических аминов и солей меди (СК) и хинонный комплекс меди. Общим свойством данных соединений является разложение при воздействии температур 373 – 473 К с образованием высокодисперсных частиц металла. Отличительной особенностью хинонного комплекса металла является обратимость процесса разложения – при понижении температуры возможно взаимодействие частиц металла с хиноном с образованием комплекса.

Важное значение для обеспечения эффекта стабилизации имеет состав продуктов термолиза соли – источника металла. При разложении смешанных комплексов алифатических аминов и солей меди $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, CuSO_4 , $\text{Cu}(\text{HCOO})_2$ образуются продукты термоокисления, которые могут явиться источником зарождения ценных процессов термоокислительной деструкции.

Применение хинонного комплекса меди, образующего при разложении хинон, обладающий свойствами эффективного антиоксиданта, и формиатов (оксалатов) металлов, разлагающихся с образованием газообразных продуктов, обеспечивает необходимый защитный эффект.

Исследование структурных характеристик разработанных составов композитов на основе ПА6, диффузионно обработанного в 10 %-ом водном растворе формиата меди, проводили на спектрофотометре РВ 2201 путем измерения величины коэффициента пропускания (T , %) образца на длинах волн ИК-спектра 700–1250 нм.

Анализ спектров пропускания свидетельствует о существенном влиянии обработки на параметры структуры полиамида. Очевидно, диффузионная обработка пленок ПА6 водным раствором формиата приводит к образованию в объеме образца наноразмерных частиц, которые при последующей термообработке при температурах выше 423 К разлагаются с образованием наночастиц металла.

При экспозиции в окислительной среде в объеме модифицированного наночастицами металла термопласта протекают вторичные процессы взаимодействия продуктов термоокисления полимерных макромолекул и частиц металла. Подобные эффекты описаны в [15], [16]. Возможным механизмом образования металлосодержащих соединений является хемосорбция низкомолекулярных и оксидных высокомолекулярных соединений на оксидах металлов, образовавшихся при взаимодействии частиц металла с кислородом воздуха. Очевидно, что после образования в объеме материала металлосодержащих соединений кинетика процесса термоокисления будет определяться характером влияния и составом этих соединений.

Анализ литературных данных и проведенных исследований позволил определить условия реализации стабилизирующего действия наноразмерных частиц металлов, полученных термолизом в среде полимера. Достаточным условием кратковременного защитного действия является хемосорбция кислорода воздуха частицами металла. Необходимым условием длительного защитного действия является сочетание адсорбции активных центров макромолекулы и макрорадикалов на частицах металла с ингиби-

рующим действием продуктов вторичных реакций, протекающих в объеме полимера при воздействии внешних факторов.

Таким образом, для разработки составов для диффузионной обработки полиамидов целесообразно использовать соединения, способные к термолизу при относительно невысоких температурах (423 – 523 К) с образованием высокомолекулярных частиц металла, способных к образованию физических связей с активными центрами макромолекул, преимущественно группами $-\text{NHCO}-$.

Важным обстоятельством выбора состава модифицирующего соединения для стабилизационной обработки изделий из полиамидов является состав вторичных продуктов взаимодействия частиц модификатора, полученных термоллизом, и макромолекул матрицы. Эти процессы достаточно длительные по времени, однако приводят к образованию соединений, оказывающих существенное влияние на кинетику термоокислительных и деструкционных реакций, изменяющих параметры деформационно-прочностных, адгезионных, триботехнических, реологических и др. характеристик полиамидов.

Вероятным механизмом влияния наноразмерных частиц на кинетику термоокисления полиамидов является образование на первой стадии процесса термолиза металлосодержащих комплексов, в которых взаимодействие между макромолекулами и наночастицами протекает по механизмам образования физических связей с последующим трансформированием их в металлосодержащие соединения, образованные в результате взаимодействия наночастиц с активными центрами макромолекул. Образование таких металлосодержащих соединений высокомолекулярного типа является существенным фактором, определяющим процессы термоокислительной стабильности изделий при длительной экспозиции в термоокислительной среде. При этом состав таких металлосодержащих соединений должен оказывать ингибирующее влияние на процессы термоокислительной деструкции макромолекул связующего. Поэтому, в качестве соединений, используемых для диффузионной обработки изделий из полиамидов, целесообразно применение терморазлагающихся соединений меди, которые образуют наночастицы, способные к вторичным превращениям с образованием металлосодержащих высокомолекулярных соединений, ингибирующих процессы термоокислительной деструкции.

Важным обстоятельством разработки состава для диффузионной стабилизации изделий из полиамидов является обеспечение необходимой интенсивности процесса образования высокомолекулярных металлосодержащих соединений в поверхностных слоях изделия путем использования специальных модификаторов.

Нами для осуществления этого процесса выбрана полиамидная смола (ПС), синтезированная в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет». Характерной особенностью данной смолы является ее химическая совместимость с матричным полимером и водорастворимость, что позволяет использовать ее как для диффузионной обработки готовых изделий, так и для функционального модифицирования гранулированных полуфабрикатов, используемых в технологическом процессе изготовления изделий методом литья под давлением. Согласно результатам ДСК-анализа этой смоле присуща область плавления с максимумом при температуре 386,8 К, что позволяет использовать модификаторы с близкой температурой разложения.

Модельные эксперименты по диффузионной стабилизации образцов ПА6 растворами полиамидной смолы (0,5 – 3,0 мас. %) свидетельствуют о высокой эффективности данного модификатора и возможности его использования в практических технологиях изготовления изделий из полимерных материалов методом литья под давлением.

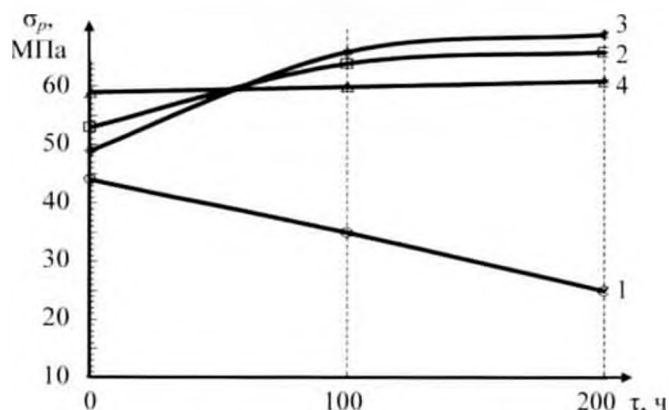
Механизм действия модификатора на структуру базового ПА6 состоит в пластифицирующем действии смолы, имеющей более низкую молекулярную массу по сравнению с промышленным ПА6, что приводит к изменению параметров деформационно-

прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик изделий из модифицированного материала.

Сравнительную оценку эффективности действия наноразмерных модификаторов, полученных термолизом металлосодержащих прекурсоров, в полиамидных матрицах осуществляли по параметрам деформационно-прочностных характеристик стандартных образцов, подвергнутых термоокислительному старению при температуре 423 ± 5 К в среде воздуха в течение 200 ч. В качестве критерия был выбран параметр прочности при разрушении σ_p . Экспериментальные данные приведены на рисунке 2.

Параметр исходной прочности образцов из ПА6 снижается от значения 44,67 МПа до 26,66 МПа после 200 ч термоокисления в среде воздуха (рисунок 2, кривая 1). При этом модифицированные наноразмерными частицами меди образцы не только не снижают исходный параметр σ_p , но и заметно его увеличивают до значений 61,95 – 67,22 МПа после термоокисления в течение 100 – 200 ч (рисунок 2, кривые 2, 3, 4). При этом наблюдается стабилизация значений параметров ударной вязкости образцов и нанокомпозитов.

Исследования параметров реологических характеристик (параметра текучести расплава (ПТР)) модифицированного полиамида свидетельствует о справедливости предложенного механизма действия наноразмерных частиц в матрице (таблица 1).



1 – ПА6; 2 – ПА6 + 1,0 мас. % ФМ;
3 – ПА6 + 0,5 мас. % ФМ; 4 – ПА6 + 3,0 мас. % ФМ
Рисунок 2 – Зависимость прочности при разрушении σ_p от времени термообработки при 423 К

Таблица 1 – Значения ПТР рассматриваемых полимеров

Материал	ПТР, г/(10 мин)
ПА6	11,32
ПА6 + 0,5 мас. % ФМ	8,75
ПА6 + 1,0 мас. % ФМ	7,82
ПА6 + 3,0 мас. % ФМ	7,47
ПА6 + 0,5 мас. % ПС	14,77
ПА6 + 1,0 мас. % ПС	16,11
ПА6 + 3,0 мас. % ПС	16,84

Как следует из данных, представленных на рисунке 2, диффузионная обработка гранулированного полиамида ПА6 водным раствором формиата меди в концентрационном диапазоне 0,5 – 3,0 мас. % приводит к существенному изменению стойкости стандартных образцов к термоокислительному старению.

Значительное повышение вязкости нанокомпозита, модифицированного 0,5 – 3,0 мас. % ФМ (с 8,75 до 7,47 г/(10 мин)) указывает на возможность формирования адсорбционных связей между частицами металла и активными центрами макромолекулы. Модифицирование ПА6 полиамидной смолой (0,5 – 3,0 мас. %) вызывает эффект пластифицирования и увеличения параметра ПТР с 11,32 до 16,84 г/(10 мин). Эффект пластифицирования повышает интенсивность структурообразования при формировании изделий методом литья под давлением.

Оценку эффективности разработанных составов нанокомпозиционных материалов на основе полиамидов и технологии их изготовления осуществляли на конструкции

крепежных элементов для силовых кабелей повышенной мощности. Данные элементы используют в технологии монтажа силовых кабелей с целью предотвращения их деформирования и спонтанного перемещения при бросках мощности и аварийных ситуациях.

Моделирование конструкции универсального крепежного элемента в интегрированной среде трехмерного проектирования и анализа SolidWorks 2019 Simulation позволило предложить вариант с минимальным уровнем эквивалентных деформаций крепежного элемента (рисунок 3), изготовленного из нанокompозиционного материала на основе полиамида, модифицированного армирующим наполнителем (формиадом меди) и полиамидной смолой.

Разработанные составы и технология модифицирования нанокompозиционных материалов на основе ПА6 позволяют реализовать синергический эффект повышения параметров деформационно-прочностных характеристик изделий при одновременном увеличении их стойкости к термоокислительному старению [17], [18].

Заключение

Диффузионное модифицирование поверхностных слоев полуфабрикатов (гранул, порошков) или изделий наноразмерными частицами меди в количестве 0,5 – 3,0 мас. %, полученными термолизом металлосодержащих соединений (формиада меди) при экспозиции в течение 1 – 10 часов, способствует достижению синергического эффекта повышения комплекса параметров деформационно-прочностных и теплофизических характеристик нанокompозитов вследствие обеспечения оптимального структурообразования наноразмерными частицами, сформировавшимися в процессе кристаллизации в матрице, и значительному увеличению стойкости стандартных образцов к окислительному действию термоокислительных сред.

Механизм проявления эффекта состоит в образовании наноразмерными частицами пространственной сетки физических связей по месту активных центров макромолекулы полиамида, что приводит к изменению механизма деформирования и кинетики термоокислительного действия кислорода в процессе эксплуатации изделий.

Благодарности

Исследования проводились в рамках выполнения задания «Исследование процессов создания и использования полимерных упаковочных материалов для обеспечения качества и безопасности пищевых продуктов» НИР «Исследование процессов структурообразования термопластичных нанокompозитов для получения пленочных полуфабрикатов с повышенными параметрами характеристик» подпрограммы «Продовольственная безопасность» ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021 – 2025 годы и проекта БРФФИ № T22-075 «Механизмы структурообразования нанокompозитов на основе диффузионно-модифицированных термопластов».

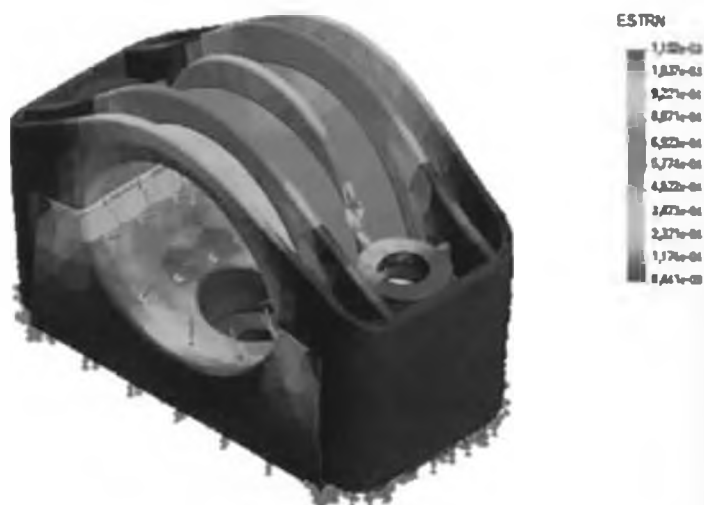


Рисунок 3 – Эпюры эквивалентных деформаций крепежных элементов для фиксации силовых кабелей

Список использованных источников

1. Гольдаде В.А., Струк В.А., Песецкий С.С. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем. – М.: Химия, 1993. – 240 с.
2. Мачюлис А.Н., Торнау Э.Э. Диффузионная стабилизация полимеров. – Вильнюс: Минтис, 1974. – 256 с.
3. Каргин В.А. Старение и стабилизация полимеров. – М.: Наука, 1964. – 332 с.
4. Гладышев Г.П., Ершов Ю.А., Шустов О.А. Стабилизация термостойких полимеров. – М.: Химия, 1979. – 272 с.
5. Авдейчик С.В. и др. Введение в физику нанокomпозиционных машиностроительных материалов: под науч. ред. В.А. Люпо, В.А. Струка. – Гродно: ГГАУ, 2009. – 439 с.
6. Авдейчик С.В., Струк В.А., Сорокин В.Г. и др. Особенности реализации наноразмерности в композитах на основе полимерной матрицы // Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 37-44.
7. ГОСТ 12019-66 Пластмассы. Изготовление образцов для испытания из термопластов. Общие требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1967. – 7 с.
8. SolidWorks. Компания SolidWorks Russia Ltd [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.solidworks.ru/products/444/> (дата обращения 15.04.2023).
9. SolidWorks Simulation – динамика механизмов, прочность, устойчивость, резонанс, усталость, динамика деформируемых систем, термоупругость. Компания SolidWorks Russia Ltd [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.solidworks.ru/products/446/> (дата обращения 15.04.2023).
10. Уланов А.М. Основы метода конечных элементов: конспект лекций. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева (Национальный исследовательский университет), 2011. – 19 с.
11. Кондратьева Л.Е. Основы метода конечных элементов. Введение. Расчет стержневых систем: конспект лекций. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2007. – 36 с.
12. Песецкий С.С. и др. Износостойкость диффузионно-стабилизированного полиамида // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 4. – С. 615-621.
13. Химченко Ю.Н., Акулич Н.В. Металлополимеры на основе меди. Глава: Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность. – М., 1972. – С. 185-195.
14. Рыскулов А.А. Разработка машиностроительных материалов на основе смесей металлополимеров: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01; Ин-т механики металлополимер. систем им. В.А. Белого АН Беларуси. – Гомель, 1990. – 202 л.
15. Лиш Д.Г. Влияние контактного окисления полиэтиленовых покрытий на адгезию к металлам: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 02.00.07; Науч.-исслед. физ.-хим. институт им. Л.Я. Карпова. – М., 1973. – 28 с.
16. Плесакачевский Ю.М. Создание машиностроительных металлополимерных материалов и изделий с использованием радиационно-термической обработки: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.01; физ.-техн. институт. – Минск, 1984. – 42 с.
17. Ковалевский Ю.С., Капцевич И.В., Ключко П.В.; науч. рук. Струк В.А. Композиционные материалы на основе термопластов с пониженной горючестью и повышенной стойкостью к термоокислительному старению // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения: сб. материалов VI Междунар. науч. конф. молодых ученых / отв. ред. А.С. Воронцов и др.; учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» / Гродно (2 июня 2022 г.). – Гродно: ГрГУ им. Янки Купалы, 2022. – С. 65-74.
18. ВУ 20220238 Состав композиционного материала. – 2022.

Информация об авторах

Александр Сергеевич Антонов – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь), e-mail: antonov_as@grsu.by.

Николай Романович Прокопчук – член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, доктор химических наук, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, профессор кафедры полимерных композиционных материалов, УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: nrprok@gmail.com.

Павел Валентинович Клочко – магистр педагогических наук, аспирант факультета инновационных технологий машиностроения, начальник цикла тактических дисциплин военного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь), e-mail: klochko_pv@grsu.by.

Денис Викторович Нахват – магистр педагогических наук, аспирант факультета инновационных технологий машиностроения, доцент кафедры тылового обеспечения военного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь), e-mail: naxvat_dv@grsu.by.

Information about the authors

Alexander Sergeevich Antonov – Associate Professor, Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department “Materials Science and Resource-Saving Technology”, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Belarus), e-mail: antonov_as@grsu.by.

Nikolai Romanovich Prokopchuk – Corresponding member of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, D. Sc. (Chemistry), Honored Scientist of the Republic of Belarus, Professor of the Department “Polymer Composite Materials”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: nrprok@gmail.com.

Pavel Valentinovich Klochko – Master of Pedagogical Sciences, Postgraduate Student of the Faculty of Innovative Mechanic Engineering, Head of the Cycle of Tactical Disciplines of the Military Faculty, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Belarus), e-mail: klochko_pv@grsu.by.

Denis Viktorovich Nakhvat – Master of Pedagogical Sciences, Postgraduate Student of the Faculty of Innovative Mechanic Engineering, Associate Professor of Military Logistics Support of the Military Faculty, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Belarus), e-mail: naxvat_dv@grsu.by.

Поступила в редакцию 08.09.2023 г.