ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/174

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И
РАЗРУШЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ, УПРОЧНЕННЫХ
НАНОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

Смирнов С.В.

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

Органические полимерные композитные материалы (ПКМ) широко используются в различных областях гражданского строительства, автомобильных, космических, оптоэлектронных и полупроводниковых устройствах. Одним из наиболее эффективных методов улучшения тепловых, механических, реологических, электрических и оптических свойств ПКМ является добавление дисперсных частиц наполнителя в вязкую матрицу [1]. Достаточно часто ПКМ применяются в качестве покрытий или основы. В данном случае для используемого материала важно иметь высокие упругие свойства и твердость и низкую восприимчивость к длительным механическим воздействиям, в том числе локальным. Теоретические исследования на макромасштабных уровнях прочностных и упругих свойств полимерных материалов при внесении упрочняющих добавок обычно проводятся с использованием методов механики сплошных сред, позволяющих описывать как поведение микрообъемов, так и элементов конструкций. Свойства модифицированных полимеров разработчиками этих материалов обычно определяются на образцах, подвергаемых стандартным испытаниям на растяжение, сжатие, кручение и изгиб. Известно, что свойства материалов отличаются от свойств поверхностных слоев и это связывается как с воздействием окружающей среды, так и особым энергетическим состоянием материала на поверхности и вблизи нее [2]. Объемные свойства определяют конструкционную прочность изделия, способность воспринимать интегральные эксплуатационные нагрузки. От уровня механических свойств поверхностных слоев зависит сопротивление повреждающему действию локальных нагрузок (вмятины, царапины, сколы и др.). Поэтому как объемные, так и поверхностные механические свойства являются важными характеристиками, определяющими эксплуатационные возможности ПКМ. В случае использования ПКМ в качестве адгезива для склеивания элементов конструкций или нанесения защитных покрытий, большую роль играет прочность его сцепления с поверхностью материала, которая зависит от условий нагружения и качества подготовки поверхности. Большинство современных теорий прочности полимерных материалов рассматривают их когезионное и адгезионное разрушение как одноактное катастрофическое явление, не учитывают, что возникновение разрушающей трещины является результатом закономерной последовательности процессов микроразрушения, происходящих на более низком масштабном уровне, не учитывают влияние напряженного состояния на предельные характеристики разрушения.

Целью исследований, проводимых ИМАШ УрО РАН в сотрудничестве с ИОС УрО РАН и ИТПМ СО РАН, является создание научных основ междисциплинарного подхода к дизайну и получению новых адгезивных органических полимерных материалов с нанодисперсным упрочнением, при котором оценка эффективности их применения для конкретных типов изделий может быть осуществлена уже на ранних стадиях создания адгезивных материалов. Для этого решаются задачи разработки адекватных моделей адгезионного и когезионного разрушения указанных материалов, методик изучения их механических и предельных свойств в широком диапазоне изменения температурно-скоростных параметров и напряженно-деформированного состояния, выявления влияния на них состава упрочняющих частиц.

Материалом для исследований являлись композиции на основе коммерческих эпоксидных смол холодного и горячего отверждения, упрочненных наночастицами оксидов и карбидов металлов. В качестве методов исследования использовали инструментальное индентирование, скретч-тесты, испытания образцов специальной формы («бразильский орех», колокольчик, мембрана, сэндвич и др.). Испытания проводили при нормальных условиях и в

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

термокамерах при температуре от -70 до $+140^{\circ}\text{C}$ в условиях статического и циклического нагружения.

В результате проведенных исследований получены следующие новые научные результаты:

1. Сформулированы новые феноменологические модели разрушения при механическом воздействии на защитные и герметизирующие покрытия на основе эпоксидных смол, позволяющие прогнозировать их запас прочности, адгезионное и когезионное разрушение в условиях сложного напряженно-деформированного состояния и температурного воздействия.

2. Разработан подход к получению адгезивных материалов на основе традиционного состава эпоксидного двухкомпонентного клея и на основе эпоксидного однокомпонентного клея, модифицированных упрочняющими нано- и микрочастицами оксидов кремния, титана, цинка и алюминия. Разработана и апробирована методика получения покрытий с повышенными прочностными и адгезионными свойствами в условиях отрицательных температур с использованием предложенных составов адгезивных материалов. Изготовлены лабораторные партии для проведения комплекса исследований.

3. Разработаны и обоснованы результатами конечно-элементного моделирования новые методики определения влияния напряженного состояния на предельную удельную энергию разрушения:

- при испытаниях на локальную адгезионную прочность тонких и толстых покрытий путем нанесения одного или двух отпечатков индентором Виккерса или Роквелла для идентификации CZM модели адгезионного разрушения;

- при испытаниях на когезионную прочность и сдвиговую адгезионную прочность покрытий путем осуществления трехточечного изгиба многослойного образца, состоящего из пластин, склеенных исследуемым адгезивом.

4. В экспериментах по инструментальному индентированию образцов покрытий из разработанных адгезивных материалов на основе эпоксидных смол (ЭД-20, ЭТП-2), модифицированных упрочняющими частицами оксидов кремния, титана, цинка и алюминия определены механические свойства (нормальный модуль упругости, твердость, коэффициенты пластичности и ползучести). Установлены предельные концентрации наполнителей, которые соответствуют оптимальным по соотношению прочностных и пластических свойств исследованных адгезивов.

5. В экспериментах по инструментальному индентированию определено влияние содержания диоксида кремния на изменение механических свойств и кратковременную ползучесть эпоксидной смолы Праймер-204. Установлено, что в интервале времени выдержки при нагрузке до 100 с значения твердости понижаются, а затем стабилизируются в пределах 5% -го разброса данных. Показано, что исследованный материал наилучшим образом соответствует вязко-упругой модели Алфрея, которая описывает ползучесть под действием двух реологических процессов с разными характеристическими временами.

6. Разработана методика определения зависимости предельной энергии когезионного разрушения от показателя жесткости напряженного состояния в испытаниях на трехточечный изгиб многослойных образцов с прослойками из исследуемого адгезива. Обработка результатов проведенных экспериментов позволила получить диаграммы предельной энергии когезионного разрушения для ряда композиций на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и клея ЭТП-2 с разной степенью полимеризации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00571).

1. Manias E. Nanocomposites: stiffer by design // Nat Mater. 2007. Vol.6. P. 9–11.

2. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / отв. ред. В. Е. Панин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т физики прочности и материаловедения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. 520 с. - (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 8).

3. Исследование методом микроиндентирования образцов эпоксидной смолы, упрочненной наночастицами диоксида кремния / С. В. Смирнов, Е. О. Смирнова, И. А. Веретенникова и др. // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2017. №.1. С. 24-35