

ХИМИЯ

УДК 621

DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_12_5

**К. Б. Вернигоров, Т. П. Султанов, Р. А. Перельгина,
И. А Старостина, В. И. Машуков, Ю. М. Казаков, О. В. Стоянов**

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ГРАНИЦЕ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ И МЕТАЛЛА. ОБЗОР

Ключевые слова: межфазные взаимодействия, адгезия, адгезионная прочность, работа адгезии, адгезионное соединение.

Межфазные взаимодействия играют огромную роль в подавляющем большинстве окружающих нас явлений и встречаются практически во всех областях науки и производства. Особое место занимают данные взаимодействия в различных адгезионных технологиях. В предstawляемом обзоре рассмотрены существующие к настоящему времени способы и подходы к определению взаимодействия на границе различных фаз. Абсолютно точная оценка межфазного взаимодействия невозможна в силу его «скрытой» природы, однако многочисленные приблизительные способы данной оценки широко применяются на практике. В обзоре проведено различие между понятиями межфазного взаимодействия, адгезионного взаимодействия и адгезионной прочности, а также рассмотрены исторические предпосылки возникновения методов оценки межфазного (адгезионного) взаимодействия и их развитие. Проверка прочности адгезионных соединений особенно бурное развитие получила в связи с расширяющимся использованием соединений полимерных материалов с различными субстратами. Одновременно с этим стали развиваться и совершенствоваться методы оценки качества получаемого соединения. Совокупность данных методов называется адгезиометрией, каждая группа методов подробно рассмотрена. Вначале проведен обзор традиционно используемых методов измерения межфазного взаимодействия, отмечено, что в последние годы особое внимание в научных сообщениях уделяется совершенствованию самих устройств для испытаний и определению прочностных характеристик современных адгезионных соединений. Также показана возможность исследования межфазного взаимодействия с использованием термодинамических свойств поверхности. Далее проведен обзор современных методов оценки межфазного взаимодействия, среди которых одним из главных инструментов исследования межфазной адгезии является атомная силовая микроскопия. Широкое распространение данный метод получил при оценке адгезионного взаимодействия в композиционных материалах. Завершают обзор методы проверки качества адгезионных соединений, которые становятся в последнее время все более востребованными, т.е. методы неразрушающего контроля. Подобные испытания не нарушают целостности системы и при этом могут давать подробную информацию о наличии, размерах и даже визуализации дефекта.

**K. B. Vernigorov, T. P. Sultanov, R. A. Perelygina,
I. A. Starostina, V. I. Mashukov, Yu. M. Kazakov, O. V. Stoyanov**

METHODS FOR ASSESSING INTERPHASE INTERACTION AT THE BOUNDARY OF A POLYMER COATING AND A METAL. REVIEW

Keywords: interphase interactions, adhesion, adhesive strength, work of adhesion, adhesive bond.

Interphase interactions play a vital role in the vast majority of phenomena around us and are encountered in virtually all fields of science and industry. These interactions occupy a special place in various adhesive technologies. This review examines currently available methods and approaches for determining interactions at the interface of different phases. An absolutely accurate assessment of interphase interaction is impossible due to its "latent" nature; however, numerous approximate methods for this assessment are widely used in practice. This review distinguishes between the concepts of interfacial interaction, adhesive interaction, and adhesive strength, and examines the historical background to the emergence of methods for assessing interfacial (adhesive) interactions and their development. Testing the strength of adhesive bonds has experienced particularly rapid development due to the expanding use of polymeric materials with various substrates. Simultaneously, methods for assessing the quality of the resulting bond have been developed and refined. These methods are collectively known as adhesiometry, and each group is examined in detail. First, a review of traditionally used methods for measuring interfacial interactions is provided. It is noted that in recent years, particular attention has been paid in scientific publications to improving the testing devices themselves and determining the strength characteristics of modern adhesive bonds. The possibility of studying interfacial interactions using surface thermodynamic properties is also demonstrated. Next, a review of modern methods for assessing interfacial interactions is presented, among which atomic force microscopy is one of the main tools for studying interfacial adhesion. This method has become widely used in assessing adhesive interactions in composite materials. The review concludes with methods for testing the quality of adhesive joints, which have become increasingly popular recently—non-destructive testing methods. Such tests do not compromise the integrity of the system and can provide detailed information on the presence, size, and even visualization of defects.

Введение

Согласно философской терминологии, межфазные взаимодействия являются, безусловно, «вещью

в себе» хотя бы потому, что они недоступны непосредственному наблюдению. Между тем, данные

взаимодействия играют огромную роль в подавляющем большинстве окружающих нас явлений и встречаются практически во всех областях науки и производства. Особое место и определяющую роль играют данные взаимодействия в различных адгезионных технологиях – начиная от декоративных лакокрасочных покрытий и заканчивая антисорбционной защитой. Сугубо научный термин «межфазное взаимодействие» на практике заменяется термином «адгезионное взаимодействие» и, далее, термином «адгезионная прочность». Такая замена упрощает смысл рассматриваемого понятия и делает его более доступным для оценки, т. е. «вещью для нас».

В представляемом обзоре будут рассмотрены существующие к настоящему времени способы и подходы к определению взаимодействия на границе различных фаз. Взаимодействие между фазами, приведенными в контакт, может иметь различную природу и очевидно, что оценить данное взаимодействие можно только путем отделения фаз друг от друга. Однако хорошо известно, что подобное действие носит необратимый характер (бездефектное разделение фаз невозможно) и поэтому получаемый результат в различной степени маскируется разнообразными деформационными факторами [1-4]. Таким образом, абсолютно точная оценка межфазного взаимодействия невозможна в силу его «скрытой» природы, однако многочисленные приблизительные способы данной оценки широко применяются на практике.

Межфазное взаимодействие, адгезионное взаимодействие и адгезионная прочность

Межфазное взаимодействие – это межмолекулярное взаимодействие между различными фазами. Согласно классическим представлениям, данное взаимодействие включает в себя наличие сил притяжения между гетерогенными молекулами (дисперсионных, ориентационных и индукционных) и сил отталкивания [5,6]. С развитием квантово-химических методов расчета энергии связей стало известно, что при межфазных взаимодействиях может происходить перенос заряда между молекулами. Частными случаями образующихся связей являются водородные и донорно-акцепторные.

У любой гетерогенной системы существуют межмолекулярные взаимодействия внутри одной и той же фазы, которые описываются термином «Когезия» и между различными фазами, последние описываются термином «Адгезия». Поэтому «межфазное взаимодействие» и «адгезионное взаимодействие», по сути, одно и то же. Причиной адгезии является молекулярное притяжение контактирующих веществ или их химическое взаимодействие. Термодинамической характеристикой адгезии служит работа адгезии [7].

Исторические предпосылки возникновения методов оценки межфазного (адгезионного) взаимодействия

В данном разделе не будут излагаться теоретические основы адгезии, они широко освещены в научной литературе и представлены в многочисленных учебниках. Латинское слово *«adhaesio»* возникло

очень давно, однако применяться к процессам склеивания разнородных материалов данный термин стал сравнительно недавно – чуть более 100 лет назад, он был введен по предложению Бехольда и Неймана для обозначения специфического молекулярного сцепления. в дополнение к господствовавшим тогда представлениям о механическом характере природы склеивания [8,9]. И, поскольку термин применим к двум различным фазам (материалам), в этот же период появилось понятие «адгезионное соединение». Разумеется, 20-е годы XX столетия – это время появления термина, по сути адгезионные соединения человечество стало использовать очень давно. Сама же технология склеивания применялась издавна, например, были найдены стрелы, произведенные приблизительно 3200 лет до н.э., у которых наконечник и перья были приклеены к стержню бересовой смолой [10,11]. В России слово «клей» появилось в обиходе приблизительно в XII веке [12]. В средние века в Европе были разработаны клей на основе животных или растительных тканей, которые применяются в некоторых случаях до настоящего времени [13-15].

Научная история адгезионных соединений и проверки их прочности начинается ближе к середине XX века, особенно бурно развитие было связано с расширяющимся использованием соединений полимерных материалов с различными субстратами – в самолетостроении [16], автомобилестроении и множестве других технологий [17].

Параллельно с развитием техники склеивания и с возрастающим количеством областей использования адгезионных соединений стали развиваться и совершенствоваться методы оценки качества получаемого соединения. Совокупность данных методов называется адгезиометрией, а применяемые для этих целей приборы – адгезиметры, или адгезиметры. О появлении первого адгезиметра история умалчивает, однако изначально это были примитивные действия и приспособления типа механического отрыва с использованием ножа или весов. Возрастающие потребности промышленных технологий в адгезионных соединениях высокой стойкости и долговечности потребовали разработки точных приборных методов для оценки данных эксплуатационных качеств. От простых и быстрых методов визуальной, а, следовательно, субъективной оценки прочности, постепенно произошел переход к объективным количественным методам, которые, как правило, давали конкретную информацию об усилии, затрачиваемом на разделение адгезива и субстрата. Эти методы с успехом применяются и в настоящее время, однако в последние десятилетия предлагаются новые способы исследования межфазного взаимодействия, обусловленные возникновением многообразных электронных приборов, работающих на нестандартных принципах измерения. Каждую группу методов рассмотрим более подробно.

Традиционные методы измерения межфазного взаимодействия

Как уже отмечалось выше, термин «межфазное взаимодействие» можно заменить на «адгезионное взаимодействие» для систем полимерных покрытий

на неорганических субстратах. С развитием измерительной техники появилось большое число методов, позволяющих определить силовые или энергетические характеристики прочности связи, существует большая группа методов, в которых с адгезионной прочностью связывают время испытания, число циклов нагружения до разрушения, площадь или диаметр отслаивания и т.д. Эти ставшие традиционными методы испытания подробно описаны в монографиях и учебных пособиях [1-4]. Несмотря на то, что практически при всех данных испытаниях собственно межфазное взаимодействие оценивается весьма опосредовано, они активно применяются до настоящего времени и предоставляют корректную информацию о прочности соединения.

В последние годы особое внимание в научных сообщениях уделяется совершенствованию самих устройств для испытаний и определению прочностных характеристик современных адгезионных соединений. Так, в частности, в работе [18] предлагается саморегулирующееся устройство, позволяющее поддерживать угол отслаивания при измерении усилия отслаивания покрытия от подложки в пределах 3°. Современная оценка адгезионной прочности с применением методов нормального отрыва рассмотрена в работе [15], где детально описан прибор «Аналитатор Адгезии LUMIFrac® 200», производитель LUM GmbH, (Берлин). Прибор оборудован компьютером, позволяющим запись и анализ действующих сил и сил разрушения [19]. К сожалению, описываемый анализатор не позволяет определить относительное удлинение, пригоден только для склеенных конструкций и требует строгого соблюдения дозировки клея. К достоинствам тестирования можно отнести большой рабочий диапазон значений разрушающих сил и возможность оценки прочности образцов малых размеров.

Проведение подобных испытаний типа метода грибка встречается в настоящее время довольно часто. Например, использование данного метода оценки рассмотрено в работах В.Б. Злобина с соавторами [20], В.Н Протасова с соавторами [21]. Как отмечается авторами последней работы, разрушение покрытия при принудительном отрыве обусловливает во многих случаях необъективную оценку адгезионного взаимодействия при использовании только лишь значения усилия отрыва [21]. Сказанное относится не только к методам равномерного отрыва, а также ко всему многообразию количественных методов оценки межфазного взаимодействия.

В частности, широко применяемые испытания с использованием многообразных разрывных машин, которые предоставляют данные об усилии отслаивания, усилии расслаивания, разрывного напряжения при растяжении и т.п. также вносят существенную погрешность в измеряемое значение адгезионной прочности, которая происходит вследствие деформации как адгезива, так и субстрата. При этом результат зависит от множества факторов, как-то шероховатость поверхности, толщина полимерного слоя, время полимеризации и температура эксплуатации [22]. Авторами было установлено, что для склеенных

металлополимерных материалов с возрастанием параметра шероховатости поверхности повышается напряжение отрыва, а увеличение толщины полимерного слоя приводит к снижению адгезионной прочности. Также отмечается снижение прочности металлополимерных материалов при росте температуры эксплуатации, а увеличение времени полимеризации не приводит к возрастанию внутренних напряжений [22].

Разрывное напряжение при растяжении для тонких пленочных антифрикционных покрытий оценивалось также в работе Родичева А.Ю. с коллегами [23]. В данном исследовании полученные результаты представляют собой зависимости нормальных напряжений от относительного удлинения пленочных покрытий.

Остановимся также на оценке адгезионной прочности с применением инденторов – это более современная модификация одним из первых методов определения качества покрытий адгезива на субстрате – методов решетчатого надреза. Как правило, инденторы служат для измерения твердости материалов, однако в недавнее время появилась методика скретч-тестирования, суть которой заключается в создании на поверхности образца продольной царапины при равномерном движении индентора под действием силы нагрузки. При вдавливании индентора в образце возникает деформация и происходит разрушение адгезионных связей. Характеристикой адгезионной прочности системы служит сила нагрузки в момент начала разрушения [24]. Исследование адгезионной прочности аналогичным методом проводилось также Р.К.Салаховой с соавторами для никелевых покрытий на углепластиковой подложке [25]. Момент разрушения покрытия в исследовании регистрировался по изменению силы сопротивления царапанию. Дальнейшая модификация данного подхода описана в работе С.В.Смирнова с коллегами [26], где рассматривалось эпоксидное покрытие на стали. При внедрении индентора (конуса Роквелла) перпендикулярно поверхности полизэпоксида исследовалась кольцевидная зона отслоившегося покрытия, которая образуется за счет радиального сдвига при вытеснении материала покрытия из-под индентора. Экспериментальное значение ширины зоны отслоения покрытия при фиксированной глубине внедрения индентора, провоцирующей отслоение, выбрано в качестве контролируемого параметра при конечно-элементном моделировании. В качестве критерия для количественной оценки адгезионной прочности использована предельная величина удельной поверхностной энергии адгезионного разрушения [26].

Отметим, что все упомянутые способы определения адгезионной прочности весьма далеки от установления величины собственно адгезионного взаимодействия. Скорее, они дают информацию о качестве адгезионного взаимодействия адгезива и субстрата с помощью некоего выбранного параметра (разрывное напряжение при растяжении, сила нагрузки в момент начала разрушения, удельная поверхностная энергия адгезионного разрушения и т.п.). Этот факт хорошо известен и обусловлен, как

уже отмечалось, невозможностью обратимого разделения адгезива и субстрата [1-4], поскольку в данном процессе неизбежно происходит деформация того и другого компонента адгезионного соединения.

Существуют способы измерения межфазного взаимодействия, позволяющие минимизировать деформационную составляющую, среди которых ведущую роль играет катодное отслаивание. Это электрохимический процесс, при котором металлический субстрат в адгезионном соединении играет роль катода. Главным преимуществом катодного отслаивания является факт отделения адгезива от субстрата именно вдоль межфазной границы. Процесс отделения сопровождается микродеформацией адгезива и субстрата, поскольку осуществляется за счет мельчайших пузырьков газообразного водорода и образования двойного электрического слоя на межфазной границе [2]. Метод стандартизирован и соответствует государственным стандартам [27]. Он особенно актуален для тестирования антикоррозионных полимерных покрытий подземных коммуникаций. Дело в том, что в жидкой среде (это могут быть грунтовые воды или другие агрессивные среды) межфазная область может характеризоваться отрицательным значением работы адгезии и вследствие этого становится нестабильной.

В настоящее время метод катодного отслаивания активно используется для исследования межфазного взаимодействия полимерных адгезионных покрытий и металлических субстратов [28,29,30]. Однако, несмотря на отмеченные достоинства, метод не лишен недостатков. Согласно [27], процедура тестирования длительная и занимает 30 суток. Поскольку не каждое полимерное покрытие может выдержать такое время в условиях катодной поляризации, часто пользуются ускоренными испытаниями [28,29,30], что вносит погрешность в измеряемые значения.

Таким образом, все рассмотренные нами методы в различной степени «искажают» получаемое значение адгезионного взаимодействия и этот факт постоянно упоминается в научной литературе. Закономерно встает вопрос о возможности существования «идеального» метода, дающего экспериментальное значение, максимально приближенного к собственно адгезионному взаимодействию.

Коротко остановимся на попытках минимизировать недостатки традиционных методов измерения адгезионного взаимодействия.

Возможность исследования межфазного взаимодействия с использованием термодинамических свойств поверхности

Итак, межфазное взаимодействие определяется энергией, которая называется работой адгезии и которую, к сожалению, не представляется возможным измерить экспериментально. Работу адгезии в системах полимер-металл в последние годы стало возможным оценить посредством квантово-химических расчетов и молекулярной динамики, при этом в ряде случаев было получено качественное согласие расчетных и экспериментальных данных [31]. В качестве

модельных систем чаще всего выбираются эпоксидные покрытия и алюминиевые подложки [32,33]. Теория функционала плотности позволяет установить межфазное взаимодействие в указанных соединениях и, далее, усилие отслаивания покрытия от металла по максимуму кривой дифференциала потенциальной энергии [33]. Важным результатом проведенных исследований явился факт установления природы адгезионного взаимодействия - образования водородных связей между гидроксильными группами адгезива и аналогичными группами на поверхности металла. Работа адгезии для эпоксидных покрытий на стали была оценена авторами работы [34] также посредством квантово-химических расчетов, которые были подтверждены экспериментально, оценкой адгезионной стойкости образцов в условиях катодной поляризации. Описанный квантово-химический подход применим в настоящее время к узкому классу соединений и поэтому носит частный характер.

Между тем, существует ряд теорий и формул, позволяющих рассчитать термодинамическую работу адгезии W_a , на основе экспериментальных данных по смачиванию, данные формулы подробно рассмотрены в монографии [35]. Формулы предложены в 70-х-80-х годах XX века для двух и даже для трех взаимодействующих материалов, но главная сложность заключается в том, что, по крайней мере, один из этих материалов является жидкостью и поэтому при таком подходе возможно получить лишь работу адгезии жидкости на исследуемой поверхности. Тем не менее, посредством набора тестовых жидкостей и смачивания ими исследуемых поверхностей, можно получить такие значимые характеристики для последних, как свободная поверхностная энергия, ее компоненты и параметры [36,37]. На основе этих данных совсем недавно был предложен способ теоретического расчета работы адгезии полимерного материала на металлическом субстрате с использованием вышеупомянутых формул [38,39,40]. Разумеется, полимерный материал, даже находясь в расплаве, не может сформировать на металле равновесную каплю, однако он может смачивать субстрат при формировании, находясь в расплавленном состоянии. Поэтому авторы посчитали возможным теоретические формулы, предложенные для системы «жидкость – твердое тело» использовать для системы «полимерный адгезив – субстрат». В основе способа лежит корректное определение всех компонентов и параметров свободной поверхностной энергии, как для полимерных материалов, так и для субстратов любой, в том числе металлической природы. Далее проводится расчет W_a , только в теоретических формулах роль жидкости теперь играет адгезив.

При предложенном подходе трудность заключается в верификации получаемых данных, так как рассчитанные значения работы адгезии приходится сравнивать с данными по адгезионной прочности, получаемыми различными способами, описанными выше. И, как уже отмечалось выше, эти данные *a priori* не могут быть равны работе адгезии. Подобное сравнение проводилось нами неоднократно, и было получено удовлетворительное соответствие между

рассчитанными значениями W_a и результатами адгезионного взаимодействия полимерных материалов и металлов, оцененного методом катодного отслаивания [2,30].

Современные методы оценки межфазного взаимодействия

Одним из главных инструментов исследования межфазной адгезии в настоящее время является атомная силовая микроскопия (АСМ). Завоевав неоспоримую популярность в последние десятилетия XX века, АСМ обладает огромными возможностями (еще до конца не изученными) в изучении поверхностной структуры и свойств самых различных материалов. Широкое распространение метод АСМ получил при оценке адгезионного взаимодействия в композиционных материалах. Исследованию различных проявлений адгезии в полимерных системах посвящен недавно опубликованный обзор [41]. Так, посредством данного метода исследовались адгезионные силы между углеродными нанотрубками и асфальтом, модифицированным бутадиен-стирольным каучуком [42]. В работе [43], наряду со многими характеристиками композиционных материалов на основе полиэтилена высокой плотности и полибутилентерефталата, исследовалась адгезия полимерных макромолекул и наполнителей - гидроксида алюминия и монтмориллонита. Также методом АСМ была проанализирована межслоевая адгезия в изделиях из полизифирэфиркетона, получаемых при 3D печати [44]. Именно АСМ-результаты доказали необходимость увеличения длительности отжига в целях повышения межслоевой адгезии, что объясняется ростом подвижности макромолекулярных цепей.

Кроме этого, АСМ оказалась перспективным методом в исследовании эпоксидных адгезионных систем, особенно в области межфазной границы, что вызвано различающейся концентрацией образующейся при отверждении химической сетки [45].

Сила адгезии, определяемая в результате сканирования, затем может быть интерпретирована в рамках выбранной теоретической модели. При контактных и полуконтактных способах анализа в последние годы стало доступно оценивать силу взаимодействия поверхностных групп образца и тестовых соединений, закрепленных в виде монослоя вещества на типе кантителера. В подобных измерениях большое практическое и практическое значение приобретает среда, в которой проходит эксперимент [46].

В этом плане заслуживает внимания исследование, проведенное в 2016 г. в университете г.Лихае (США), в котором удалось проанализировать кислотные и основные взаимодействия между полимерными поверхностями, помещенными в водную среду, и тестовыми кислотами и основаниями, находящимися на типе [47]. Кислотно-основные связи через межфазную границу могут давать значительный вклад в адгезионное взаимодействие, поэтому проведенный авторами эксперимент представляет собой перспективное направление дальнейших исследований.

В целом, для оценки межфазной адгезии в настоящее время предлагаются достаточно разнообразные

методы. Например, метод вытягивания волокна из полимерной матрице, в котором регистрируется нагрузка во время вытягивания единичного филамента из полимерной матрицы [48-50]. Разумеется, метод подходит только для волокнистых наполнителей.

Не менее популярен метод спектроскопии комбинированного рассеивания (Рамановская спектроскопия), посредством которой возможно исследовать передачу напряжения между матричным полимером и наполнителем, при условии, что материалы активны для данного метода [51-55]. В частности, спектроскопия комбинированного рассеивания применялась для анализа полидиметилсиликсановых нанокомпозитов, содержащих пластинки графена, которые обнаруживают чувствительный к деформации характерный сдвиг полосы комбинированного рассеяния. Проведенный эксперимент по изучению взаимодействия наполнителя с полимерной матрицей позволил выделить основные химические рычаги для интенсификации ковалентных взаимодействий с полимерными цепями [56-58]. Таким образом, перечисленные методы ограничены по применимости. И вновь авторы обращаются в своем исследовании к АСМ, как самому информативному инструменту в области изучения межфазной адгезии [59]. В данной работе прочность межфазной адгезии определялась посредством абразивного сканирования модельных ламинированных систем на основе полиэтилентерефталата с графеном и со слюдой. Графитовые и слюдяные подложки, покрытые пленками полимера толщиной ~2 нм, подвергались абразивному сдвигу зондом АСМ, и таким образом полиэтилентерефталат сдвигался из сканируемой области в течение нескольких циклов абразивного растрового сканирования. Обнаружено, что система полимер на графите полностью разрушился при данном испытании, в то время как слой полиэтилентерефталата на слюде продемонстрировал лишь легкую степень когезионного разрушения. Механические свойства исследуемых образцов были также оценены с помощью динамического механического анализа и оказались в согласии с различиями в межфазной адгезии, исследованными с помощью АСМ [59].

Наряду с АСМ для анализа процессов межфазного склеивания активно применяются методы ИК-Фурье- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Так, сообщение авторов [60] посвящено процессам анодирования аэрокосмических алюминиевых сплавов, поскольку химия анодного оксида влияет на взаимодействие на границе раздела при адгезионном склеивании. Контролируемое электрохимическое окисление алюминия (анодирование) обычно используется для повышения долговечности металла путем создания защитного оксидного слоя на его поверхности. Одним из основных применений является kleевое соединение в аэрокосмической промышленности, где длительное анодирование в кислотном электролите используется для получения поверхностного оксида алюминия с плотным барьерным слоем внизу и относительно равномерной пористой структурой вверху. Этот дуплексный поверхностный оксид способствует улучшению адгезии к органической смоле и повышению коррозионной стойкости

анодированных компонентов [61]. Полученные в работе ИК- и РФЭС- спектры показали, что взаимодействие между амином и поверхностными оксидами носит преимущественно льюисовский характер. Более выраженная степень взаимодействия для оксидов, полученных с использованием фосфорной кислоты, убедительно свидетельствует о том, что включение кислотных анионов из электролита влияет на взаимодействие с основным аминным отвердителем [60].

Одним из новаторских применений АСМ является электрохимическая силовая микроскопия (ЭСМ), которая открывает уникальную возможность исследовать динамику ионов и электрохимические процессы в жидких средах, а также раскрыть механизмы, лежащие в основе важных процессов на границе раздела твердое тело–жидкость, включая адсорбцию, перенос электронов и электроактивацию [62]. Авторы утверждают, что ЭСМ является силовым методом, позволяющим визуализировать пространственную изменчивость локальных электрохимических свойств, зависящих от образца. Понимание локальных электростатических и электрохимических явлений на границе раздела твердое тело–жидкость имеет решающее значение для различных областей, от коррозии и сенсорики [63–65] до преобразования и хранения энергии [66–67]. Особый интерес представляют локальные электрохимические процессы, управляемые работой устройств преобразования и хранения энергии, таких как литий-ионные аккумуляторы, электрохимические конденсаторы и топливные элементы [68–70].

Методы неразрушающего контроля адгезионных соединений

В завершении остановимся также на методах проверки качества адгезионных соединений, которые становятся в последнее время все более востребованными. Подобные испытания не нарушают целостности системы и при этом могут давать подробную информацию о наличии, размерах и даже визуализации дефекта. Подробно большинство неразрушающих методов контроля рассмотрены в публикации [71], в которой представлены наиболее распространенные методы неразрушающего контроля для обнаружения и оценки развития дефектов/повреждений в композиционных материалах. К ним относятся акустическая эмиссия, ультразвуковой контроль, инфракрасная термография, терагерцевый контроль, ширография, цифровая корреляция изображений, а также рентгеновская и нейтронная визуализация. Для каждого метода неразрушающего контроля дана краткая историческая справка, принципы, стандартные методы, оборудование и установки, используемые для исследования композитов. Обсуждены преимущества и ограничения методов, а также кратко изложены возможности их применения.

В частности, для обнаружения небольших расслоенных областей в многослойном керамическом композите предложен усовершенствованный метод визуализации дефектов склеивания, основанный на статистических характеристиках дисперсии [72]. В ис-

следовании пятислойные образцы, состоящие из керамического композита, прокладочного материала, металлической подложки и двух адгезионных слоев были изучены посредством спектроскопии в терагерцевом диапазоне. Сигналы, отраженные от каждого интерфейса, возвращаются через многослойную структуру к детектору, в то время как начальный сигнал будет продолжать проходить через последующие слои. При наличии дефектов соединения, информация наблюдается на изображении сканирования. По сравнению с другими типами неразрушающего контроля, такими как ультразвук и инфракрасное тепловое излучение, метод терагерцевого неразрушающего контроля может применяться для контроля и оценки размера, толщины и местоположения дефектов, таких как отслоение или нарушение склеивания слоев в многослойных композитных конструкциях [72].

Также среди методов неразрушающего контроля, наряду с ультразвуком, выделяют инфракрасную термографию, включающую в себя оптическую инфракрасную термографию, ультразвуковую инфракрасную термографию и микроволновую термографию [73].

Заключение

Таким образом, нами рассмотрен широкий ряд разнообразных методов и способов получения информации о межфазном взаимодействии в соединениях полимерных материалов и металлических субстратов. Парадигмой через предлагаемый обзор проходит хорошо известное утверждение, что никакими, даже самыми совершенными методами, измерить силу и энергию межфазного взаимодействия в сформированном адгезионном соединении невозможно. Однако приблизительная оценка такого взаимодействия, а именно, величина адгезионной прочности доступна для практики и может быть максимально приближена к искомому значению межфазного взаимодействия.

Показано, что с течением времени методы измерения адгезионной прочности совершенствуются. Несмотря на прогресс в их развитии и совершенствовании, большинство адгезионистов на практике используют традиционные, хорошо зарекомендовавшие себя методы тестирования – методы отрыва, отслаивания и расслаивания. Совершенствование измерительной аппаратуры дает возможность развиваться более прогрессивным методам оценки адгезионной прочности, основанным на применении АСМ, ИК-, РФЭС спектроскопии. Невозможность «заглянуть» в межфазную область, не разрушая ее, стимулирует поиски теоретических методов определения межфазного взаимодействия, используя неразрушающие методы анализа, в частности метод смачивания.

Наконец, для снижения проблем безопасности и затрат на техническое обслуживание, в последнее время активно развиваются неразрушающие методы контроля различных адгезионных соединений, основанные на различных принципах обеспечения качества на протяжении всего жизненного цикла изделия. Последняя группа методов не предоставляет при тестировании значение адгезионной прочности, однако

дает наглядную информацию о наличии и местоположении дефекта и, как следствие, о качестве адгезионного соединения.

Литература

1. Э. Кинлок, *Адгезия и адгезивы. Наука и технология*. Мир, Москва, 1991. 484 с.
2. Старостина И.А., Вернигоров К.Б., Казаков Ю.М., Стоянов О.В. *Работа адгезии и адгезионная прочность* КНИТУ, Казань, 2025. 144 с.
3. Старостина И.А., Вернигоров К.Б., Казаков Ю.М., Стоянов О.В. *Термодинамика межфазного взаимодействия и прочность адгезионного соединения* КНИТУ, Казань 2025. 182 с.
4. Бутовецкая В.И., Старостина И.А., Зиганшина А.С., Янова О.Ю., Стоянов О.В. *Теоретические основы адгезии полимеров: учебное пособие* КНИТУ, Казань 2022. 108 с.
5. А.М. Прохоров, *Физический энциклопедический словарь*. Советская энциклопедия, Москва, 1983. 928 с.
6. И.Л. Куянц, *Краткая химическая энциклопедия. Т.3*. Советская энциклопедия, Москва, 1964. 1112 с.
7. Е.В. Михеева, Н.П. Пикула, А.П. Асташкина, *Коллоидная химия: учебное пособие*. Изд-во Томского политехнического университета, Томск, 2013. 184 с.
8. С.А. Ненахов, *Клеи. Герметики. Технологии*, **4**, 2-6 (2007).
9. Bechold H., Neumann S. // *Angew. Chem.* 1924. Bd. 37. S. 225, 534, 569.. H. Bechold, S. Neumann, *Angew. Chem.*, **37**, 30, 234–540 (1924), DOI: 10.1002/ange.19240373004.
10. P.G. Bahn, K. Everett, *Nature*, **362**, 6415, 11–12 (1993).
11. K. Spindler, *Eclologia Geol. Helv.*, **88**, 3, 699–709 (1995),
12. П.Я. Черных, *Историко-этимологический словарь современного русского языка. Т.1. Русский язык*, Москва, 1994. 400 с.
13. A. Pawlik, J. Thissen, *J. Archaeol. Sci.*, **38**, 7, 1699–1708 (2011).
14. J. Thissen, A. Pawlik, *Archäol. Deutschl.*, **26**, 3, 4 (2010)
15. Э. Краус. Дис. канд. тех. Наук, КНИТУ, Казань, 2017. 181 с.
16. A. Higgins, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **20**, 5, 367–376 (2000).
17. Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers *Plastics – the Facts 2015, An analysis of European plastics production, demand and waste data*. (2015).
18. М.Г. Киселев, П.С. Богдан, С.Г. Монич, Я.В. Янкина, *Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та*, **1**, 38, 40–51 (2020), DOI: 10.24411/2079-7958-2020-13804.
19. Инструкция по эксплуатации *LumiFrac 200, LUM*, Берлин, (2016).
20. В.Б. Злобин, Ф.Н. Бахов, П.Г. Шеленков, *Газовая промышленность*, **1**, 779, 94–98 (2019).
21. В.Н. Протасов, А.В. Мурадов, *Территория Нефтегаз*, **2**, 42–51 (2008).
22. С.И. Корягин, О.В. Шарков, Н.Л. Великанов, *Изв. высш. учеб. завед. Машиностроение*, **771**, 6, 12–21 (2024).
23. А.Ю. Родичев, А.В. Горин, М.А. Токмакова, А.А. Киречек, *Трансп. машиностроение*, **83**, 10, 4–10 (2019).
24. А.С. Борисова, Л.Г. Варепо, *Омский науч. вестн.*, **97**, 1, 227–230 (2011).
25. Р.К. Салахова, С.Г. Кирилин, А.Б. Тихообразов, Т.Б. Смирнова, *Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосм. техн., мехнол. и машин.*, **20**, 4, 100–114 (2021).
26. С.В. Смирнов, М.В. Мясникова, А.В. Пестов, Д.А. Коновалов, Е.О. Смирнова, *Физ. мезомех.*, **26**, 3, 39–49 (2023), DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_3_39.
27. ГОСТ 9.602-2016 Приложение М. Определение площади отслаивания защитного покрытия при катодной поляризации : дата введения 2017-06-01. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 87 с.
28. И.А. Старостина, О.В. Стоянов, Н.В. Махрова, Д.А. Нгуен, М.С. Перова, Р.Ю. Галимзянова, Е.В. Бурдова, Ю.Н. Хакимуллин, *Клеи. Герметики. Технологии*, **11**, 19–21 (2011).
29. И.А. Старостина, О.В. Стоянов, Р.М. Гарипов, А.И. Загидуллин, В.Я. Кустовский, Н.И. Кольцов, М.В. Кузьмин, Д.М. Трофимов, В.Г. Петров, *Лакокрас. материалы и их применение*, **5**, 2–7 (2007).
30. И.А. Старостина, К.Б. Вернигоров, Н.А. Кузина, Р.А. Перельгина, Ю.М. Казаков, О.В. Стоянов, *Клеи. Герметики. Технологии*, **3**, 15–20 (2025), DOI: 10.31044/1813-7008-2025-0-3-15-20.
31. S. Kisic, J. Božović Vukić, P.G.Th. van der Varst, G. de With, C.E. Koning, *Chem. Mater.*, **19**, 903–907 (2007).
32. K. Anand, T. Duguet, J. Esvan, C. Lacaze-Dufaure, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 51, 57649–57665 (2020).
33. T. Semoto, Y. Tsuji, K. Yoshizawa, *J. Phys. Chem. C*, **115**, 23, 11701–11708 (2011).
34. G. Bahlakeh, B. Ramezanadeh, M.R. Saeb, H. Terryn, M. Ghaffari, *Appl. Surf. Sci.*, **419**, 650–669 (2017).
35. И.А. Старостина, О.В. Стоянов, Э. Краус, *Развитие методов смачивания для оценки состояния поверхности: монография*. КНИТУ, Казань, 2019. 140 с.
36. Р.А. Перельгина, И.А. Старостина, А.С. Зиганшина, А.Р. Ефимова, О.В. Стоянов *Клеи. Герметики. Технологии*, **4**, 37–41 (2019).
37. Р.А. Перельгина, И.А. Старостина, К.Б. Вернигоров, В.В. Бушков, С.В. Тутов, А.В. Вертепа, Ю.М. Казаков, О.В. Стоянов *Вестн. технол. ун-та*, **27**, 6, 35–40 (2024).
38. И.А. Старостина, М.В. Колпакова, О.В. Стоянов, *Клеи. Герметики. Технологии*, **6**, 10–15 (2020).
39. И.А. Старостина, М.В. Колпакова, О.В. Стоянов, *Вестн. технол. ун-та*, **22**, 5, 25–28 (2019).
40. И.А. Старостина, Н.В. Улитин, О.В. Стоянов, *Клеи. Герметики. Технологии*, **1**, 8–14 (2022).
41. А.Ф. Яруллин, К.Б. Вернигоров, С.В. Тутов, И.А. Старостина, В.И. Машуков, Х.С. Абзальдинов, Ю.М. Казаков, О.В. Стоянов, *Вестн. технол. ун-та*, **28**, 4, 5–10, (2025).
42. M. Arifuzzaman, U. Gazder, M.S. Islam, A.A. Mamun, *J. Adhes. Sci. Technol.*, **34**, 1100–1114 (2019), DOI: 10.1080/01694243.2019.1698201.
43. Z. Bałaga, A. Gnatowski, S. Kulesza, M. Bramowicz, M. Gwoździk, *Materials*, **15**, 24, 8738 (2022), DOI: 10.3390/ma15248738.
44. M. Adamson, B. Eslami, *Polymers*, **17**, 6, 744 (2025), DOI: 10.3390/polym17060744.
45. M. Ogawa, A. Morimura, I. Haba, A. Yonezu, *Polymer*, **320**, 128071 (2025), DOI: 10.1016/j.polymer.2025.128071.
46. A. Noy *Handbook of Molecular Force Spectroscopy*. Springer, New York, 2008. 291 с.
47. И.А. Старостина, Н.В. Саутина, Д.А. Нгуен, Ю.Г. Галимзядинов, О.В. Стоянов, Д.В. Везенов, *Клеи. Герметики. Технологии*, **11**, 24–29 (2016).
48. M.J. Pitkethly, J.P. Favre, U. Gaur, J. Jakubowski, S.F. Mudrich, D.L. Caldwell, L.T. Drzal, M. Nardin, H.D. Wagner, L.D. Landro, A. Hampe, J.P. Armistead, M. Desaeger, I. Verpoest, *Compos. Sci. Technol.*, **48**, 205–214 (1993).
49. C.Y. Yue, W.L. Cheung, *J. Mater. Sci.*, **27**, 3843–3855 (1992).
50. P.J. Herrera-Franco, L.T. Drzal, *Composites*, **23**, 2–27 (1992).
51. L. Gong, I.A. Kinloch, R.J. Young, I. Riaz, R. Jalil, K.S. Novoselov, *Adv. Mater.*, **22**, 2694–2697 (2010).
52. Z. Li, R.J. Young, I.A. Kinloch, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 456–463 (2013).
53. I.M. Robinson, M. Zakikhani, R.J. Day, R.J. Young, C. Galiotis, *J. Mater. Sci. Lett.*, **6**, 1212–1214 (1987).
54. C.A. Cooper, R.J. Young, M. Halsall, *Composites, Part A*, **32**, 401–411 (2001), DOI: [указать DOI, если есть].

55. R.J. Young, L. Gong, I.A. Kinloch, I. Riaz, R. Jalil, K.S. Novoselov. *ACS Nano*, **5**, 3079–3084 (2011), DOI: [указать DOI, если есть].
56. I. Srivastava, R.J. Mehta, Z.-Z. Yu, L. Schadler, N. Koratkar, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 063102 (2011), DOI: 10.1063/1.3552685.
57. M. Rafiee, J. Rafiee, Z.-Z. Yu, N. Koratkar, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 223103 (2009), DOI: 10.1063/1.3269637.
58. J. Rafiee, M.A. Rafiee, Z.-Z. Yu, N. Koratkar, *Adv. Mater.*, **22**, 2151–2154 (2010).
59. S. Aoyama, Y.T. Park, C.W. Macosko, T. Ougizawa, G. Haugstad, *Langmuir*, **30**, 12950–12959 (2014), DOI: 10.1021/la502553q.
60. S.T. Abrahami, T. Hauffman, J.M.M. de Kok, J.M.C. Mol, H. Terryn, *J. Phys. Chem. C*, **119**(34), 19967–19975 (2015).
61. G.W. Critchlow, D.M. Brewis, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **16**, 255–275 (1996).
62. L. Collins, S. Jesse, J.I. Kilpatrick, A. Tselev, O. Varenyk, M.B. Okatan, S.A.L. Weber, A. Kumar, N. Balke, S.V. Kalinin, B.J. Rodriguez, *Nat. Commun.*, **5**, 3871 (2014), DOI: 10.1038/ncomms4871.
63. F. Mansfeld, *J. Appl. Electrochem.*, **25**, 187–202 (1995)
64. H. Böhni, T. Suter, A. Schreyer, *Electrochim. Acta*, **40**, 1361–1368 (1995).
65. T.G. Drummond, M.G. Hill, J.K. Barton, *Nat. Biotechnol.*, **21**, 1192–1199 (2003).
66. A.S. Aricò, P. Bruce, B. Scrosati, J.-M. Tarascon, W. van Schalkwijk, *Nat. Mater.*, **4**, 366–377 (2005).
67. M. Pumera, *Energy Environ. Sci.*, **4**, 668–674 (2010).
68. P. Poizot, S. Laruelle, S. Grignon, L. Dupont, J.-M. Tarascon, *Nature*, **407**, 496–499 (2000).
69. R. Kötz, M. Carlen, *Electrochim. Acta*, **45**, 2483–2498 (2000).
70. L. Carrette, K.A. Friedrich, U. Stimming, *Fuel Cells*, **1**, 5–39 (2001).
71. B. Wang, S. Zhong, T.-L. Lee, K.S. Fancey, J. Mi, *Adv. Mech. Eng.*, **12**, 4, 1–28 (2014), DOI: 10.1177/1687814020913761.
72. D.-D. Zhang, J.-J. Ren, J. Gu, L.-J. Li, J.-Y. Zhang, W.-H. Xiong, Y.-F. Zhong, T.-Y. Zhou *Compos. Struct.*, **251**, 112624 (2020), DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112624.
73. J. Zhu, Z. Mao, D. Wu, J. Zhou, D. Jiao, W. Shi, W. Zhu, Z. Liu, *J. Nondestruct. Eval.*, **41**, 49 (2022), DOI: 10.1007/s10921-022-00880-3.

References

1. E. Kinloch. *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Mir, Moscow, 1991. 484 p. (In Russ.)
2. I.A. Starostina, K.B. Vernigorov, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov. *Work of Adhesion and Adhesive Strength*. KNITU, Kazan, 2025. 144 p. (In Russ.)
3. I.A. Starostina, K.B. Vernigorov, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov. *Thermodynamics of Interfacial Interaction and Strength of Adhesive Joint*. KNITU, Kazan, 2025. 182 p. (In Russ.)
4. V.I. Butovetskaya, I.A. Starostina, A.S. Ziganzhina, O.Yu. Yanova, O.V. Stoyanov. *Theoretical Foundations of Polymer Adhesion: A Textbook*. KNITU, Kazan, 2022. 108 p. (In Russ.)
5. A.M. Prokhorov (Ed.). *Physical Encyclopedic Dictionary*. Sovetskaya Entsiklopediya, Moscow, 1983. 928 p. (In Russ.)
6. I.L. Kunyants (Ed.). *Concise Chemical Encyclopedia*. Vol. 3. Sovetskaya Entsiklopediya, Moscow, 1964. 1112 p. (In Russ.)
7. E.V. Mikheeva, N.P. Pikula, A.P. Astashkina. *Colloidal Chemistry: A Textbook*. Tomsk Polytechnic University Publishing House, Tomsk, 2013. 184 p. (In Russ.)
8. S.A. Nenakhov. Adhesives. Sealants. *Tekhnologii*, **4**, 2–6 (2007). (In Russ.)
9. H. Bechold, S. Neumann. *Angewandte Chemie*, **37**, 225, 534, 569 (1924). DOI: 10.1002/ange.19240373004
10. P.G. Bahn, K. Everett. *Nature*, **362**(6415), 11–12 (1993).
11. K. Spindler. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, **88**(3), 699–709 (1995).
12. P.Ya. Chernykh. *Historical and Etymological Dictionary of the Modern Russian Language*. Vol. 1. Russkiy Yazyk, Moscow, 1994. 400 p. (In Russ.)
13. A. Pawlik, J. Thissen. *Journal of Archaeological Science*, **38**(7), 1699–1708 (2011).
14. J. Thissen, A. Pawlik. *Archäologie in Deutschland*, **26**(3), 4 (2010).
15. E. Kraus. *Ph.D. Thesis (Candidate of Technical Sciences)*. KNITU, Kazan, 2017. 181 p. (In Russ.)
16. A. Higgins. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **20**(5), 367–376 (2000).
17. Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers. *Plastics – the Facts 2015, An analysis of European plastics production, demand and waste data* (2015).
18. M.G. Kiselev, P.S. Bogdan, S.G. Monich, Ya.V. Yankina. *Bulletin of Vitebsk State Technological University*, **1**(38), 40–51 (2020). DOI: 10.24411/2079-7958-2020-13804 (In Russ.)
19. *Operating Instructions for LumiFrac 200*. LUM, Berlin, (2016). (In Russ.)
20. V.B. Zlobin, F.N. Bakhov, P.G. Shelengov. *Gazovaya Promyshlennost*, **1**(779), 94–98 (2019). (In Russ.)
21. V.N. Protasov, A.V. Muradov. *Territoriya Neftegaz*, **2**, 42–51 (2008). (In Russ.)
22. S.I. Koryagin, O.V. Sharkov, N.L. Velikanov. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Mashinostroenie*, **771**(6), 12–21 (2024). (In Russ.)
23. A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin, M.A. Tokmakova, A.A. Kirichek. *Transportnoye Mashinostroenie*, **83**(10), 4–10 (2019). (In Russ.)
24. A.S. Borisova, L.G. Varepo. *Omskiy Nauchnyy Vestnik*, **97**(1), 227–230 (2011). (In Russ.)
25. R.K. Salakhova, S.G. Kirilin, A.B. Tikhobrazov, T.B. Smirnova. *Bulletin of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, **20**(4), 100–114 (2021). (In Russ.)
26. S.V. Smirnov, M.V. Myasnikova, A.V. Pestov, D.A. Konovalov, E.O. Smirnova. *Physical Mesomechanics*, **26**(3), 39–49 (2023). DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_3_39 (In Russ.)
27. *GOST 9.602-2016 Appendix M. Determining the Area of Protective Coating Delamination under Cathodic Polarization: Date of Introduction 2017-06-01*. Standartinform, Moscow, 2016. 87 p. (In Russ.)
28. I.A. Starostina, O.V. Stoyanov, N.V. Makhrova, D.A. Nguyen, M.S. Perova, R.Yu. Galimyanova, E.V. Burdova, Yu.N. Khakimullin. Adhesives. Sealants. *Tekhnologii*, **11**, 19–21 (2011). (In Russ.)
29. I.A. Starostina, O.V. Stoyanov, R.M. Garipov, A.I. Zagidullin, V.Ya. Kustovsky, N.I. Koltsoy, M.V. Kuzmin, D.M. Trofimov, V.G. Petrov. *Lakokrasochnye Materialy i Ikh Primenenie*, **5**, 2–7 (2007). (In Russ.)
30. I.A. Starostina, K.B. Vernigorov, N.A. Kuzina, R.A. Perelygina, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov. Adhesives. Sealants. *Tekhnologii*, **3**, 15–20 (2025). DOI: 10.31044/1813-7008-2025-0-3-15-20 (In Russ.)
31. S. Kisic, J. Božović Vukić, P.G.Th. van der Varst, G. de With, C.E. Koning. *Chemistry of Materials*, **19**, 903–907 (2007).
32. K. Anand, T. Duguet, J. Esvan, C. Lacaze-Dufaure. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**(51), 57649–57665 (2020).
33. T. Semoto, Y. Tsuji, K. Yoshizawa. *The Journal of Physical Chemistry C*, **115**(23), 11701–11708 (2011).
34. G. Bahlakeh, B. Ramezanzadeh, M.R. Saeb, H. Terryn, M. Ghaffari. *Applied Surface Science*, **419**, 650–669 (2017).
35. I.A. Starostina, O.V. Stoyanov, E. Kraus. *Development of Wetting Methods for Surface State Assessment: A Monograph*. KNITU, Kazan, 2019. 140 p. (In Russ.)

36. R.A. Perelygina, I.A. Starostina, A.S. Ziganshina, A.R. Efimova, O.V. Stoyanov. Adhesives. Sealants. *Tekhnologii*, **4**, 37–41 (2019). (In Russ.)
37. R.A. Perelygina, I.A. Starostina, K.B. Vernigorov, V.V. Bushkov, S.V. Tutov, A.V. Vertep, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov. *Herald of Technological University*, **27**(6), 35–40 (2024). (In Russ.)
38. I.A. Starostina, M.V. Kolpakova, O.V. Stoyanov. Adhesives. Sealants. *Tekhnologii*, **6**, 10–15 (2020). (In Russ.)
39. I.A. Starostina, M.V. Kolpakova, O.V. Stoyanov. *Herald of Technological University*, **22**(5), 25–28 (2019). (In Russ.)
40. I.A. Starostina, N.V. Ulitin, O.V. Stoyanov. Adhesives. Sealants. *Tekhnologii*, **1**, 8–14 (2022). (In Russ.)
41. A.F. Yarullin, K.B. Vernigorov, S.V. Tutov, I.A. Starostina, V.I. Mashukov, Kh.S. Abzalidinov, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov. *Herald of Technological University*, **28**(4), 5–10 (2025). (In Russ.)
42. M. Arifuzzaman, U. Gazder, M.S. Islam, A.A. Mamun. *The Journal of Adhesion Science and Technology*, **34**, 1100–1114 (2019). DOI: 10.1080/01694243.2019.1698201
43. Z. Bałaga, A. Gnatowski, S. Kulesza, M. Bramowicz, M. Gwoździk. *Materials*, **15**(24), 8738 (2022). DOI: 10.3390/ma15248738
44. M. Adamson, B. Eslami. *Polymers*, **17**(6), 744 (2025). DOI: 10.3390/polym17060744
45. M. Ogawa, A. Morimura, I. Haba, A. Yonezu. *Polymer*, **320**, 128071 (2025). DOI: 10.1016/j.polymer.2025.128071
46. A. Noy. *Handbook of Molecular Force Spectroscopy*. Springer, New York, 2008. 291 p.
47. I.A. Starostina, N.V. Sautina, D.A. Nguyen, Yu.G. Galyametdinov, O.V. Stoyanov, D.V. Vezenov. Adhesives. Sealants. *Tekhnologii*, **11**, 24–29 (2016). (In Russ.)
48. M.J. Pitkethly, J.P. Favre, U. Gaur, J. Jakubowski, S.F. Mudrich, D.L. Caldwell, L.T. Drzal, M. Nardin, H.D. Wagner, L.D. Landro, A. Hampe, J.P. Armistead, M. Desaege, I. Verpoest. *Composites Science and Technology*, **48**, 205–214 (1993).
49. C.Y. Yue, W.L. Cheung. *Journal of Materials Science*, **27**, 3843–3855 (1992).
50. P.J. Herrera-Franco, L.T. Drzal. *Composites*, **23**, 2–27 (1992).
51. L. Gong, I.A. Kinloch, R.J. Young, I. Riaz, R. Jalil, K.S. Novoselov. *Advanced Materials*, **22**, 2694–2697 (2010).
52. Z. Li, R.J. Young, I.A. Kinloch. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **5**, 456–463 (2013).
53. I.M. Robinson, M. Zakikhani, R.J. Day, R.J. Young, C. Galiotis. *Journal of Materials Science Letters*, **6**, 1212–1214 (1987).
54. C.A. Cooper, R.J. Young, M. Halsall. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **32**, 401–411 (2001).
55. R.J. Young, L. Gong, I.A. Kinloch, I. Riaz, R. Jalil, K.S. Novoselov. *ACS Nano*, **5**(4), 3079–3084 (2011).
56. I. Srivastava, R.J. Mehta, Z.-Z. Yu, L. Schadler, N. Koratkar. *Applied Physics Letters*, **98**, 063102 (2011). DOI: 10.1063/1.3552685
57. M. Rafiee, J. Rafiee, Z.-Z. Yu, N. Koratkar. *Applied Physics Letters*, **95**, 223103 (2009). DOI: 10.1063/1.3269637
58. J. Rafiee, M.A. Rafiee, Z.-Z. Yu, N. Koratkar. *Advanced Materials*, **22**, 2151–2154 (2010).
59. S. Aoyama, Y.T. Park, C.W. Macosko, T. Ougizawa, G. Haugstad. *Langmuir*, **30**, 12950–12959 (2014). DOI: 10.1021/la502553q
60. S.T. Abrahami, T. Hauffman, J.M.M. de Kok, J.M.C. Mol, H. Terryn. *The Journal of Physical Chemistry C*, **119**(34), 19967–19975 (2015).
61. G.W. Critchlow, D.M. Brewis. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **16**, 255–275 (1996).
62. L. Collins, S. Jesse, J.I. Kilpatrick, A. Tselev, O. Varenyk, M.B. Okatan, S.A.L. Weber, A. Kumar, N. Balke, S.V. Kalinin, B.J. Rodriguez. *Nature Communications*, **5**, 3871 (2014). DOI: 10.1038/ncomms4871
63. F. Mansfeld. *Journal of Applied Electrochemistry*, **25**, 187–202 (1995).
64. H. Böhni, T. Suter, A. Schreyer. *Electrochimica Acta*, **40**, 1361–1368 (1995).
65. T.G. Drummond, M.G. Hill, J.K. Barton. *Nature Biotechnology*, **21**, 1192–1199 (2003).
66. A.S. Aricò, P. Bruce, B. Scrosati, J.-M. Tarascon, W. van Schalkwijk. *Nature Materials*, **4**, 366–377 (2005).
67. M. Pumera. *Energy & Environmental Science*, **4**, 668–674 (2010).
68. P. Poizot, S. Laruelle, S. Grueon, L. Dupont, J.-M. Tarascon. *Nature*, **407**, 496–499 (2000).
69. R. Kötz, M. Carlen. *Electrochimica Acta*, **45**, 2483–2498 (2000).
70. L. Carrette, K.A. Friedrich, U. Stimming. *Fuel Cells*, **1**, 5–39 (2001).
71. B. Wang, S. Zhong, T.-L. Lee, K.S. Fancey, J. Mi. *Advances in Mechanical Engineering*, **12**(4), 1–28 (2014). DOI: 10.1177/1687814020913761
72. D.-D. Zhang, J.-J. Ren, J. Gu, L.-J. Li, J.-Y. Zhang, W.-H. Xiong, Y.-F. Zhong, T.-Y. Zhou. *Composite Structures*, **251**, 112624 (2020). DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112624
73. J. Zhu, Z. Mao, D. Wu, J. Zhou, D. Jiao, W. Shi, W. Zhu, Z. Liu. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **41**, 49 (2022). DOI: 10.1007/s10921-022-00880-3

© К. Б. Вернигоров – к.х.н., генеральный директор, ООО «СИБУР ПолиЛаб», Москва, Россия, vernigorovkb@sibur.ru; Т. П. Султанов – аспирант кафедры Физики, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, sultanoltp05@mail.ru; Р. А. Перельгина – канд. тех. наук, доцент кафедры Физики, КНИТУ, raperelygina@mail.ru; И. А. Старостина – д-р хим. наук, профессор кафедры Физики, КНИТУ, irinastarostina@mail.ru; В. И. Машуков – к.х.н., директор «Прикладные разработки», ООО «СИБУР ПолиЛаб», mashukovvi@sibur.ru; Ио. М. Казаков – д.т.н., доцент, ректор, профессор кафедры Химии и технологии переработки эластомеров, КНИТУ, kazakov@kstu.ru; О. В. Стоянов – д-р тех. наук, заведующий кафедрой Технологии пластических масс, КНИТУ, ov_stoyanov@mail.ru.

© К. Б. Вернигоров – PhD (Chemical Sci.), Director, General Manager, SIBUR PolyLab LLC, Moscow, Russia, vernigorovkb@sibur.ru; Т. П. Султанов – PhD-student of the Department of Physics, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, sultanoltp05@mail.ru; Р. А. Перельгина – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Physics, KNRTU, raperelygina@mail.ru; И. А. Старостина – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Full Professor, Department of Physics, KNRTU, irinastarostina@mail.ru; В. И. Машуков – PhD (Chemical Sci.), Director of Applied Developments, SIBUR PolyLab LLC, mashukovvi@sibur.ru; Ю. М. Казаков – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Rector, Professor of the Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing, KNRTU, kazakov@kstu.ru; О. В. Стоянов – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the Department of Plastics Technology, KNRTU, ov_stoyanov@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 23.10.25.

Дата принятия рукописи в печать – 23.11.25.