

ХИМИЯ

УДК 678

DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_4_5

А. Ф. Яруллин, К. Б. Вернигоров, С. В. Тутов, И. А. Старостина,
В. И. Машуков, Х. С. Абзальдинов, Ю. М. Казаков, О. В. Стоянов

ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНО СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АДГЕЗИИ В ПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМАХ (ОБЗОР)

Ключевые слова: адгезия, атомно силовая микроскопия, силы Ван-дер-Ваальса, наноматериалы, нанотрубки полиэфирэфиркетон, полиэтилен высокой плотности, полиэтилен низкой плотности.

Понимание межмолекулярных взаимодействий является ключом к достижению контроля над материалами на молекулярном уровне, что имеет важное значение для различных областей физики и нанотехнологий. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) считается передовым инструментом микроскопического изучения материалов благодаря своим возможностям для их наномасштабной пространственной характеристики. За последние два десятилетия метод наномеханической характеристики на основе АСМ широко использовался для исследования механических свойств и механизмов деформации полимерных материалов. Этот метод позволяет напрямую визуализировать микромеханические свойства поверхностей материалов и называется методом наномеханики АСМ. Атомно-силовая микроскопия позволила наблюдать и манипулировать характеристиками молекулярного уровня (т. е. измерение и манипулирование силами Ван-дер-Ваальса) благодаря наличию четко определенной геометрии зонд-образец с более высоким разрешением по силе. Другим важным применением АСМ является силовая спектроскопия, где игла АСМ выдвигается к поверхности и отводится от нее, а отклонение кантилевера отслеживается как функция пьезоэлектрического смещения. В настоящем обзоре обсуждается применение метода АСМ в адгезионных исследованиях полимерных систем с особым акцентом на возможности отслеживания микроскопического поведения, касающегося деформации и визуализации распределения внутренних напряжений в материалах на межфазных границах. Представлены результаты исследований адгезионных свойств различных полимеров методом АСМ. Показано, что атомно-силовой микроскоп является современным прецизионным устройством, которое способно исследовать и характеризовать силу адгезии в нанометровом масштабе, его можно применять к широкому спектру композиционных материалов, которые важны в современных отраслях промышленности, занимающихся медицинскими, полимерными, полупроводниковыми и нанотехнологиями.

A. F. Yarullin, K. B. Vernigorov, S. V. Tutov, I. A. Starostina,
V. I. Mashukov, Kh. S. Abzaldinov, Yu. M. Kazakov, O. V. Stoyanov

APPLICATION OF ATOMIC FORCE MICROSCOPY IN THE STUDY OF ADHESION IN POLYMER SYSTEMS (REVIEW)

Key words: adhesion, atomic force microscopy, van der Waals forces, nanomaterials, polyetheretherketone nanotubes, high-density polyethylene, low-density polyethylene.

Understanding of intermolecular interactions is the key to achieving control over materials at the molecular level, which is of great importance for various fields of physics and for nanotechnology. Atomic force microscopy (AFM) is considered as a cutting-edge tool for the microscopic study of materials due to its capabilities for nanoscale spatial characterization. Over the past two decades the AFM-based nanomechanical characterization method has been widely used to investigate the mechanical properties and deformation mechanisms of polymeric materials. This method allows direct visualization of the micromechanical properties of material surfaces and is called the AFM nanomechanics method. Atomic force microscopy has enabled the observation and manipulation of molecular and atomic level characteristics (i.e., measurement and manipulation of van der Waals forces), in addition to having a well-defined tip-sample geometry with higher force resolution. Another important application of AFM is force spectroscopy, where the AFM tip is advanced towards and retracted from the surface and the cantilever deflection is monitored as a function of piezoelectric displacement. This review discusses the application of AFM in the study of polymer composites with a special emphasis on the significant advances in tracking the microscopic deformation behavior and visualizing the stress distribution of materials. AFM studies of the adhesion properties of various polymers are presented. It is shown that the atomic force microscope is a modern precision device that is capable of investigating and accurately controlling the adhesion force at the nanometer scale and can be applied to a wide range of materials that are important in modern industries, such as pharmaceutical compounds, polymers, nanomaterials and semiconductors.

Введение

Понимание межмолекулярных взаимодействий является ключом к достижению контроля над материалами на молекулярном уровне, что имеет важное значение для различных областей физики и для нано-

технологий [1]. В то время как свойства широко используемых материалов, таких как металлы и неорганические полупроводники, регулируются ковалентной или металлической связью, в полимерах Ван-дер-Ваальсовы (VdW) силы играют важную роль в межмолекулярных взаимодействиях, хотя их энергия связи намного меньше, чем у ковалентных связей.

Прямая информация о силе VdW стала доступной в 1970-х годах с помощью аппарата поверхностных сил (SFA) [1], позволяющего изучать их величину и зависимости от расстояния. Однако этот метод ограничен, поскольку для его применения требуются гладкие, полупрозрачные макроскопические поверхности, что ограничивает выбор исследуемых материалов. Значительный прогресс был достигнут с развитием атомно-силовой микроскопии (АСМ) [2-35], которая позволила наблюдать и манипулировать характеристиками на молекулярном и атомном уровне (т. е. позволила измерять и моделировать Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия). Кроме этого, с помощью зонда появилась возможность получения геометрии образца с высоким разрешением. Другим важным применением АСМ является силовая спектроскопия [36], где игла АСМ выдвигается к поверхности и отводится от нее, а отклонение кантилевера отслеживается как функция пьезоэлектрического смещения. Кроме измерения сил Ван-дер-Ваальса и Казимира, АСМ используется также для измерения наномасштабных контактов, сил растворения в жидкостях, сил растяжения и разрыва отдельных макромолекул. Он идеально подходит для ближних и дальних взаимодействий, а также для изучения адгезии между твердыми поверхностями, включая те, которые содержат осажденные полиэлектролиты [37-39]. Силы, определяемые АСМ, в конечном счете имеют электромагнитное происхождение, но различные межмолекулярные, поверхностные и макроскопические эффекты приводят к взаимодействиям с различными зависимостями. В отсутствие внешних полей доминирующими силами являются взаимодействия VdW, силы притяжения и отталкивания и силы адгезии. После Батта и Дакера и др. [1] силы ван-дер-ваальсовых взаимодействий были рассчитаны и измерены многими исследователями на основе взаимодействия сферического или конического кантилевера с различными видами образцов [1].

Применение метода атомно силовой микроскопии в изучении адгезионных свойств

Атомно-силовая микроскопия считается передовым инструментом для микроскопического изучения материалов благодаря своим возможностям для их наномасштабной пространственной характеристики. За последние два десятилетия метод «наномеханической» характеристики на основе АСМ широко использовался для исследования механических свойств и механизмов деформации полимерных материалов. Этот метод позволяет напрямую визуализировать микромеханические свойства поверхностей материалов и называется методом наномеханики АСМ [40].

В данном обзоре обсуждается применение этого метода в исследовании полимерных композитов с особым акцентом на значительные достижения в отслеживании микроскопического поведения деформации и визуализации микроскопического распределения напряжений материалов.

В работе [41] были изучены двумерные (2D) материалы, которые являются потенциальными материалами для электронных устройств из-за их уникальных структур и исключительных физических свойств, что делает их центром внимания в исследованиях нанотехнологий. Точная оценка механических и трибологических свойств 2D-материалов необходима для полного использования их потенциала в различных приложениях. Однако их наномасштабная толщина и планарная природа создают значительные проблемы при тестировании и описании их механических свойств. Среди экспериментальных методов АСМ получила широкое применение при исследовании механического поведения наноматериалов из-за возможности легкого измерения силы и смещения от наконечников АСМ. В частности, силовая спектроскопия на основе АСМ является распространенным подходом для изучения механических и трибологических свойств 2D-материалов.

Подробно описаны методы [41], основанные на спектроскопии нормальной силы, которые используются для тестирования и описания упруго-прочностных свойств, стойкости к растрескиванию, адгезии между различными 2D-материалами и усталости 2D-материалов. Кроме того, методы, использующие спектроскопию латеральных сил, могут характеризовать межфазные свойства 2D-материалов, включая поверхностное трение и сдвиговое поведение промежуточных слоев. Также рассматривается влияние различных факторов, таких как методы испытаний, внешняя среда и свойства тестовых образцов на измеряемые механические свойства.

Исследование [42] адгезионных свойств асфальта может помочь в обеспечении более прочного асфальтового покрытия. Исследователи попытались разработать различные модели адгезионных свойств полимеров и углеродных нанотрубок (УНТ) при модифицировании асфальтовых связующих. Асфальт, модифицированный полимером и УНТ, обрабатывается для подготовки различных типов образцов путем моделирования повреждения, вызванного влагой и окислением, следуя соответствующему стандартному методу. Атомно-силовая микроскопия использовалась для оценки наномасштабной силы адгезии между компонентами исследуемых материалов (матрицей, модификатором, УНТ). Наконец, исследователи разработали нейронную сеть с радиальной базисной функцией (RBFNN) как функцию различных параметров, включая: химические характеристики асфальта, тип и объемное содержание полимеров и УНТ, различные воздействия окружающей среды для прогнозирования наноадгезионных характеристик системы. Показано, что для обеспечения межфазной адгезии модификация бутадиен-стирольным каучуком предпочтительнее по сравнению с модифицированием СБС-каучуком, в то же время присутствие одностенных нанотрубок (ОНТ) существеннее влияет на адгезионное взаимодействие в системе по сравнению с многостенными нанотрубками (МНТ). Высокий уровень адекватности модели RBFNN указывает на то, что введение функциональных групп в сочетании с количественным содержанием и типом поли-

меров и УНТ позволяет регулировать межфазные адгезионные харптеристики в асфальте как композиционном материале [42].

В работе [43] представлено влияние наполнителей, таких как гидроксид алюминия или монтмориллонит, на структуру и свойства полимеров, таких как полиэтилен высокой плотности (ПВП) и полибутилентерефталат (ПБТФ). Оба типа образцов были получены методом литья под давлением. Проведены рентгеновские дифракционные исследования полученных материалов для определения влияния используемых наполнителей на степень кристалличности композитов. Были оценены плотность и твердость композитов, а также проведены статические испытания на растяжение и анализ параметров структуры с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ). Было показано, что добавка дисперсных наполнителей к полимерам, таким как ПВП и ПБТФ, влияет, в том числе, на адгезию макромолекул и частиц наполнителя [43].

Исследование [44] посвящено полиэфирэфиркетону (ПЭЭК), суперконструкционному термопластичному полимеру, известному своим уникальным сочетанием свойств, которые делают его пригодным для широкого спектра применений. Несмотря на значительные достижения в характеристике ПЭЭК, его высокая температура плавления (343°C) создает проблемы при его переработке. Из-за высокой температуры плавления ПЭЭК во время нанесения каждого слоя при 3D-печати происходит большое изменение температуры, что приводит к отсутствию прочной адгезии между слоями в формируемом образце. Поэтому отжиг становится необходимым этапом последующей обработки для обеспечения прочного соединения слоев внутри детали. Следовательно, необходимо установить точные параметры последующей обработки для повышения структурной целостности и производительности материала. Характеристика ПЭЭК использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) применялась для объяснения результатов механических испытаний, таких как испытания на растяжение и трехточечный изгиб. Визуализация АСМ, которая обеспечивает анализ поверхности с высоким разрешением, использовалась для оценки морфологии поверхности ПЭЭК до и после отжига, что дает представление о шероховатости, механических свойствах и структурной целостности в наномасштабе [44]. Испытания на растяжение и изгиб характеризовали механические свойства ПЭЭК на макроуровне. Анализ АСМ-результатов показал, что отжиг при более высоких температурах и в течение более длительного времени повышает межслоевую адгезию за счет роста подвижности полимерных цепей. Это способствует и структурной реорганизации, рекристаллизации и снижению шероховатости поверхности. Эти результаты коррелируют со свойствами на макроуровне, где прочность при растяжении образца с самой большой продолжительностью отжига и самой высокой температурой существенно увеличилась по сравнению с образцом, который не был отожжен. Испытания на трехточечный изгиб также показали значительное увеличение прочности по сравнению с не отожженным образцом. Полученные

результаты [44] помогут оптимизировать параметры постобработки для ПЭЭК. Цитируемая работа представляет ценные данные для будущих исследований, связанных с использованием конструкционных пластики в области медицинской инженерии.

В работе [45] исследованы эластомерные наноструктуры, чьи механические свойства имеют решающее значение для влияния на эксплуатационные характеристики термоластичного материала, такого как полиэтилен. Используя современное количественное наномеханическое картирование «PeakForс» с использованием АСМ, модули упругости образцов полиэтилена низкой плотности были оценены в зависимости от времени воздействия. В частности, частота сбора данных дискретно изменялась на четыре порядка от 0,1 до 2 кГц. Данные о силе были сопоставлены с линеаризованной моделью механики контакта DMT, учитывающей силу поверхностного сцепления [45]. Было обнаружено увеличение модуля Юнга с увеличением частоты сбора данных. Он был оценен в пределах $11,7 \pm 5,2$ МПа при 0,1 Гц и увеличился до $89,6 \pm 17,3$ МПа при 2 кГц. Было показано, что многопараметрическое, многофункциональное локальное зондирование механических измерений вместе с исключительно высоким пространственным разрешением визуализации открывают новые возможности для количественного наномеханического картирования мягких полимеров и потенциально могут быть распространены на биологические системы с целью оценки адгезионных взаимодействий в них.

В работе [46] были изучены силы межфазного взаимодействия и свойства композита основе ПНП и древесины (ДПК) в присутствии различных компатибилизаторов и использовании древесины различных пород. Подробно обсуждались свойства ДПК, а также данные атомно-силовой микроскопии и то, как последняя может быть использована для характеристики взаимодействия отдельных компонентов композита, чтобы выяснить, что обеспечивает нужную межфазную адгезию и как ее можно максимизировать. Изучены силы взаимодействия наконечника кантилевера с поверхностью между двумя различными породами древесины. Также изучали воздействие наконечника кантилевера модифицированного нанесением трех различными компатибилизаторов, чтобы показать различие в совместимости между компонентами ДПК. Полученные результаты использовали для объяснения закономерностей, связанных с макроскопическими свойствами ДПК, в попытке определить возможность использования малоприспособных пород древесины для производства ДПК путем введения подходящего компатибилизатора [46]. В частности, изучены физические и механические свойства ДПК, изготовленных из ПНП, шести инвазивных пород древесины и трех различных компатибилизаторов. Проанализированы влажность, плотность, модуль упругости при растяжении, прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, ударная вязкость, а результаты сравнены с таковыми для коммерческих ДПК для выяснения технической осуществимости требуемых физических и механических свойств ДПК, изготовленных с использованием инвазивных видов древесины.

Включение некоторых компатибилизаторов улучшило межфазную адгезию и, таким образом, улучшило физико-механические свойства композитов до уровня коммерческих ДПК. Кроме того, термически разложенный ПНП предложен как новый и недорогой компатибилизатор, который может заменить традиционно используемые дорогие аналоги [46].

С использованием атомно-силовой микроскопии [47] изучены наномеханические характеристики ряда полимеров, таких как поли(3-гидроксibuтират) [(P3HB)], поли(3-гидроксibuтират-ко-валерат) [(P3HBV)] и поли(3-гидроксibuтират-ко-4-гидроксibuтират) [(P3HB4HB)]. Кроме того, были проанализированы три различные пленки P3HBV с толщиной 10 мкм, 30 мкм и 60 мкм, обозначенные как 10-P3HBV, 30-P3HBV и 60-P3HBV соответственно. Кривые сила-расстояние, основанные на АСМ, позволили точно измерить свойства поверхности. Исследуемый материал был проанализирован с целью определения поверхностного модуля Юнга (методом Дерягина–Мюллера–Топорова (ДМТ)), адгезии, жесткости и высоты доменов. Результаты показывают, что состав и толщина полимерных пленок существенно влияют на поверхностные наномеханические характеристики, размер пор, смачиваемость и кристалличность материала. Более толстые пленки демонстрируют различные профили механических и поверхностных свойств, подчеркивая роль взаимодействий полимерных цепей и структурной организации. Эти результаты подчеркивают важность адаптации состава и структурных параметров полимеров для оптимизации их механических свойств для целевых применений, особенно в биомедицинской области. Эта всесторонняя наномасштабная характеристика дает ценную информацию о проектировании и разработке материалов на основе РНА для различных технологических и биомедицинских применений.

Адгезионные системы [48] с эпоксидной смолой (адгезионные соединения и композиты) играют решающую роль в объемных механических свойствах (например, передача нагрузки) различных изделий, и важно выяснить механизм реализации прочности вблизи межфазных границ. Известно, что механические свойства эпоксидных смол в адгезионных слоях отличаются от свойств в объеме полимера из-за разницы в концентрации поперечных связей в отвержденном эпоксидном полимере. Важно установить методы наномеханических испытаний и моделирования, которые могут выявить особенности механических свойств и молекулярную структуру именно в адгезионных слоях системы. В исследовании [48] были проведены исследования с использованием метода атомно-силовой микроскопии в сочетании с моделированием методом молекулярной динамики для объяснения результатов и выявления закономерностей механических свойств вблизи межфазной границы и механизма формирования адгезионной прочности. Кроме того, механические свойства адгезионной системы были исследованы с точки зрения деформации макромолекулярных цепей в зависимости от частоты химической сетки в объеме и у межфазной границы [48].

Заключение

В обзоре представлены результаты исследований адгезионных свойств различных полимеров методом АСМ. Показано, что с помощью атомно-силового микроскопа, который является современным прецизионным устройством для изучения микро- и нано-объектов и процессов, возможно изучать и оценивать силы адгезии в наноразмерных объектах, объясняя полученными результатами закономерности изменения свойств материалов на макроуровне. Метод АСМ применим к широкому спектру материалов, которые востребованы в нанотехнологиях, медицинской инженерии, технологиях полимерных композиционных материалов, полупроводниковой технике и т.д..

Литература

1. Fabio L. Leite, Carolina C. Bueno, Alessandra L. da Róz, Ervino C. Ziemath and Osvaldo N. Oliveira Jr. *Int. J. Mol. Sci.*, **3**, 10, 12773-12856 (2012); DOI: 10.3390 /ijms 131012773
2. Drellich, J.; Mittal, K.L Brill *Academic Pub: Leiden, The Netherlands*, 2005.
3. Sun, L.; Li, X.; Hede, T.; Tu, Y.Q.; Leck, C.; Agren, H. *J. Phys. Chem. B*, **116**, 3198–3204 (2012).
4. Leite, F.L.; Borato, C.E.; da Silva, W.T.L.; Herrmann, P.S.P.; Oliveira, O.N., Jr.; Mattoso, L.H. *Microsc. Microanal.*, **13**, 304–312 (2007).
5. Bruch, L.W. *Phys. Rev.* **72**, (2005). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.033410.
6. Nicolosi, V.; Nellist, P.D.; Sanvito, S.; Cosgriff, E.C.; Krishnamurthy, S.; Blau, W.J.; Green, M.L.H.; Vengust, D.; Dvorsek, D.; Mihailovic, D.; et al. *Adv. Mater.*, **19**, 543–547, (2007).
7. French, R.H.; Parsegian, V.A.; Podgornik, R.; Rajter, R.F.; Jagota, A.; Luo, J.; Asthagiri, D.; Chaudhury, M.K.; Chiang, Y.M.; Granick, S.; et al. *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1887–1944 (2010).
8. Leite, F.L.; Neto Mde, O.; Paterno, L.G.; Ballesterio, M.R.M.; Polikarpov, I.; Mascarenhas, Y.P.; Herrmann, P.S.P.; Mattoso, L.H.C.; Oliveira, O.N., Jr. *J. Colloid Interface Sci.*, **316**, 376–387 (2007).
9. Lubarsky, G.V.; Mitchell, S.A.; Davidson, M.R.; Bradley, R.H. *Physicochem. Eng. Asp.*, **279**, 188–195(2006).
10. Wang, C.X.; Chang, S.; Gong, X.Q.; Yang, F.; Li, C.H.; Chen, W.Z. *Acta Phys.Chim. Sin.*, **28**, 751–758 (2012).
11. Старостина И. А., Стоянов О. В.: Монография. Казань: КГТУ, 195, (2010).
12. Старостина И. А., Стоянов О. В., Махрова Н. В. и др. *Клеи. Герметики. Технологии.* **11**, 19-21 (2011).
13. Старостина И. А., Сокурова Н. В., Стоянов О. В., Хакимуллин Ю. Н. *Клеи. Герметики. Технологии*, **9**, 22-25 (2012).
14. Starostina I. A., Makhrova N. V., Stoyanov O. V., Aristov I. V. *J. Adhes.*, **88**, 9, 751-765 (2012).
15. Старостина И. А., Махрова Н. В., Аристов И. В., Стоянов О. В. *Вестник Казанского технологического университета.*, **9**, 61-65 (2011).
16. Chen, J.Z.; Zhang, D.L.; Zhang, Y.X.; Li, G.H. *J. Mol. Sci.* **13**, 2176–2195 (2012).
17. Т. А. Кузнецова, Н. В. Чижик *Приборы и методы измерений.*, **1**, 6, 41-45 (2013).
18. W. Zhanga, A. G. Stackb, Y. Chena, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. **82**, 316-324 (2011).
19. Chih-Wen Yang, Ching-Hsiu Chen, Ren-Feng Ding, Hsien-Shun Liao, Ing-Shouh Hwang, *Surface Science*, **522**, 146423 (2020), DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146423.

20. T. Nagoshi, Y. Harada, S. Nakasumi, N. Yamazaki, K. Hasegawa, K. Takagi, W. Peng, G. Fujii, M. Ohkubo, *Composites Part B: Engineering*, **242**, 110059 (2022), DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110059.
21. Kohei Kanamori, Yoshikatsu Kimoto, Shuto Toriumi, Akio Yonezu, *International J. of Adhesion and Adhesives*, **107**, 102848 (2021), DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102848.
22. Al-Rekabi Z, Contera S. *Multifrequency. Proc Natl Acad Sci USA* **115**, 11, 2658–2663 (2018)
23. Piao G, Kimura F, Takahashi T, Moritani Y, Awano H, Nimori S, et al. *Polym J.*, **39**, 5, 89–92 (2007).
24. Ramakrishna S, Mayer J, Wintermantel E, Leong KW. *Compos Sci Technol.*; **61**, 1, 189 – 224 (2001)
25. Yang Y, Ogasawara S, Li G, Kato S. *Polym J.*; **47**:340 (2015)
26. Naruke A, Liang X, Nakajima K, Nishi T. *Polym J.*; **54**: 83 – 92(2022).
27. Liang X, Shi X, Ostrovidov S, Wu H, Nakajima K. *Appl Surf Sci.*, **9**, 366:254 (2016).
28. Wang D, Liang XB, Liu YH, Fujinami S, Nishi T, Nakajima K. *Macromolecules.*, **44**, 8693 (2011).
29. Martínez-Tong DE, Najar AS, Soccio M, Nogales A, Bitinis N, López-Manchado MA, et al. *Compos Sci Technol.*; **104**:34 – 9 (2014).
30. Wang Y, Hahn TH.. *Compos Sci Technol.*, **67**, 92 – 101 (2007).
31. Pakzad A, Simonsen J, Yassar RS. *Compos Sci Technol.*, **9**, 72–314 (2012).
32. Zhang S, Liu H, Gou J, Ying J, Wang Y, Liu C, et al. *Polym Test.*, **77**, 105904 (2019).
33. Chlanda A, Rebis J, Kijeńska E, Wozniak MJ, Rozniatowski K, Swieszkowski W, et al. *Micron.*, **72**, 1 – 7, (2015).
34. Qi Y, Jiang D, Ju S, Zhang J, Cui X. *Compos Sci Technol.*, **184**, 107877 (2019).
35. Liang X, Nakajima K. *Macromolecules.*, **55**, 23 – 30, (2022).
36. И.А.Старостина, Н. В. Саутина, Д. А. Нгуен, Ю. Г. Галяметдинов, О. В. Стоянов, Д. В. Везенов; *Клеи. Герметики. Технологии.*, **11**, 24–29 (2015).
37. Borkovec, M.; Papastavrou, G. *Sci.*, **13**, 429–437 (2008).
38. Leite, F.L.; Paterno, L.G.; Borato, C.E.; Herrmann, P.S.P.; Oliveira, O.N.; Mattoso, L.H.C. *Polymer*, **46**, 12503–12510 (2005).
39. Aleksandr Noy, 291 (2008)
40. Xiaobin Liang. *Polymer Journal*, **55**, 913 – 920 (2023), DOI: 10.1038/s41428-023-00790-9
41. Shuai Wu, Jie Gu, Ruiteng Li, Yuening Tang, Lingxiao Gao, Cuihua An, Qibo Deng, Libin Zhao & Ning Hu. *Friction*, **12**, 2627–2656 (2024) DOI:10.1007/s40544-024-0864-9
42. Arifuzzaman, M., Gazder, U., Islam, M. S., & Mamun, A. *J. of Adhesion Sci. and Tech.*, **34**, 1100–1114 (2019), DOI: 10.1080/01694243.2019.1698201
43. Bałaga Z. *Materials.* **15**, 24, 8738 (2022).
44. Adamson, M.; Eslami, B. *Exp. Inv. of Anneal. on Microscale and Macroscale Properties. Polymers*, **17**, 744 (2025), DOI: 10.3390/polym17060744
45. Shuting Zhang, Yihui Weng, Chunhua Ma. *Zhanget al. Nanoscale Res Lett*, **16**, 113 (2021)
46. Effah B. Doctor of Philosophy in Forestry in the Faculty of Agri Sciences at Stellenbosch University, Stellenbosch, , 100 (2017).
47. Fares D.E. Ghorabe, Ashish T.S. Ireddy, Pavel Zun, Mikhail Zhukov, Dmitry A. Kozodaev, Tatiana G. Volova, Ekaterina I. Shishatskaya, Ekaterina V. Skorb, *Progress in Organic Coatings*, **201**, 109092 (2025), DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109092.
48. Masayoshi Ogawa, Ayumu Morimura, Ikko Haba, Akio Yonezu, *Polymer*, **320**, 128071 (2025), DOI: 10.1016/j.polymer. 2025. 128071.

References

1. Fabio L. Leite, Carolina C. Bueno, Alessandra L. da Róz, Ervino C. Ziemath and Osvaldo N. Oliveira Jr. *Int. J. Mol. Sci.*, **3**, 10, 12773–12856 (2012); DOI: 10.3390 /ijms 131012773
2. Drelich, J.; Mittal, K.L. *Brill Academic Pub: Leiden, The Netherlands*, 2005.
3. Sun, L.; Li, X.; Hede, T.; Tu, Y.Q.; Leck, C.; Agren, H. *J. Phys. Chem. B*, **116**, 3198–3204 (2012).
4. Leite, F.L.; Borato, C.E.; da Silva, W.T.L.; Herrmann, P.S.P.; Oliveira, O.N., Jr.; Mattoso, L.H. *Microsc. Microanal.*, **13**, 304–312 (2007).
5. Bruch, L.W. *Phys. Rev.* **72**, (2005). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.033410.
6. Nicolosi, V.; Nellist, P.D.; Sanvito, S.; Cosgriff, E.C.; Krishnamurthy, S.; Blau, W.J.; Green, M.L.H.; Vengust, D.; Dvorsek, D.; Mihailovic, D.; et al. *Adv. Mater.*, **19**, 543–547, (2007).
7. French, R.H.; Parsegian, V.A.; Podgornik, R.; Rajter, R.F.; Jagota, A.; Luo, J.; Asthagiri, D.; Chaudhury, M.K.; Chiang, Y.M.; Granick, S.; et al. *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1887–1944 (2010).
8. Leite, F.L.; Neto Mde, O.; Paterno, L.G.; Ballesterio, M.R.M.; Polikarpov, I.; Mascarenhas, Y.P.; Herrmann, P.S.P.; Mattoso, L.H.C.; Oliveira, O.N., Jr. *J. Colloid Interface Sci.*, **316**, 376–387 (2007).
9. Lubarsky, G.V.; Mitchell, S.A.; Davidson, M.R.; Bradley, R.H. *Physicochem. Eng. Asp.*, **279**, 188–195(2006).
10. Wang, C.X.; Chang, S.; Gong, X.Q.; Yang, F.; Li, C.H.; Chen, W.Z. *Acta Phys.Chim. Sin.*, **28**, 751–758 (2012).
11. Starostina I. A., Stoyanov O.V.: Monograph. Kazan: KSTU, 195, (2010).
12. Starostina I. A., Stoyanov O. V., Makhrova N. V., et al. *Adhesives. Sealants. Technologies.* **11**, 19–21 (2011).
13. Starostina I. A., Sokorova N. V., Stoyanov O. V., Khamimullin Y. N. *Adhesives. Sealants. Technologies*, **9**, 22–25 (2012).
14. Starostina I. A., Makhrova N. V., Stoyanov O. V., Aristov I. V. *J. Adhes.*, **88**, 9, 751–765 (2012).
15. Starostina I. A., Makhrova N. V., Aristov I. V., Stoyanov O. B. *Herald of Kazan Technological University.* , **9**, 61–65 (2011).
16. Chen, J.Z.; Zhang, D.L.; Zhang, Y.X.; Li, G.H. *J. Mol. Sci.* **13**, 2176–2195 (2012).
17. T. A. Kuznetsova, N. V. Chizhik, *Instruments and Methods of Measurements*, **1**, 6, 41–45 (2013).
18. W. Zhanga, A. G. Stackb, Y. Chena , *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* **82**, 316–324 (2011).
19. Chih-Wen Yang, Ching-Hsiu Chen, Ren-Feng Ding, Hsien-Shun Liao, Ing-Shouh Hwang, *Surface Science*, **522**, 146423 (2020), DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146423.
20. T. Nagoshi, Y. Harada, S. Nakasumi, N. Yamazaki, K. Hasegawa, K. Takagi, W. Peng, G. Fujii, M. Ohkubo, *Composites Part B: Engineering*, **242**, 110059 (2022), DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110059.
21. Kohei Kanamori, Yoshikatsu Kimoto, Shuto Toriumi, Akio Yonezu, *International J. of Adhesion and Adhesives*, **107**, 102848 (2021), DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102848.
22. Al-Rekabi Z, Contera S. *Multifrequency. Proc Natl Acad Sci USA* **115**, 11, 2658–2663 (2018)
23. Piao G, Kimura F, Takahashi T, Moritani Y, Awano H, Nimori S, et al. *Polym J.*, **39**, 5, 89–92 (2007).
24. Ramakrishna S, Mayer J, Wintermantel E, Leong KW. *Compos Sci Technol.*; **61**, 1, 189 – 224 (2001)
25. Yang Y, Ogasawara S, Li G, Kato S. *Polym J.*; **47**:340 (2015)
26. Naruke A, Liang X, Nakajima K, Nishi T. *Polym J.*; **54**: 83 – 92(2022).

27. Liang X, Shi X, Ostrovidov S, Wu H, Nakajima K. *Appl Surf Sci.*, **9**, 366:254 (2016).
28. Wang D, Liang XB, Liu YH, Fujinami S, Nishi T, Nakajima K. *Macromolecules.*, **44**, 8693 (2011).
29. Martínez-Tong DE, Najar AS, Soccio M, Nogales A, Bitinis N, López-Manchado MA, et al. *Compos Sci Technol.*;104:34 – 9 (2014).
30. Wang Y, Hahn TH.. *Compos Sci Technol.*, **67**, 92 – 101 (2007).
31. Pakzad A, Simonsen J, Yassar RS. *Compos Sci Technol.*, **9**, 72-314 (2012).
32. Zhang S, Liu H, Gou J, Ying J, Wang Y, Liu C, et al. *Polym Test.*, **77**, 105904 (2019).
33. Chlanda A, Rebis J, Kijeńska E, Wozniak MJ, Rozniatowski K, Swieszkowski W, et al. *Micron.*, **72**, 1 – 7, (2015).
34. Qi Y, Jiang D, Ju S, Zhang J, Cui X. *Compos Sci Technol.*, **184**, 107877 (2019).
35. Liang X, Nakajima K. *Macromolecules.*, **55**, 23 – 30, (2022).
36. И.А.Старостина, Н. В. Саутина, Д. А. Нгуен, Ю. Г. Галяметдинов, О. В. Стоянов, Д. В. Везенов; *Клеи. Герметики. Технологии.*, **11**, 24-29 (2016).
37. Borkovec, M.; Papastavrou, G. *Sci.*, **13**, 429–437 (2008).
38. Leite, F.L.; Paterno, L.G.; Borato, C.E.; Herrmann, P.S.P.; Oliveira, O.N.; Mattoso, L.H.C. *Polymer*, **46**, 12503–12510 (2005).
39. Aleksandr Noy, 291 (2008)
40. Xiaobin Liang. *Polymer Journal*, **55**, 913 – 920 (2023), DOI. 10.1038/s41428-023-00790-9
41. Shuai Wu, Jie Gu, Ruiteng Li, Yuening Tang, Lingxiao Gao, Cuihua An, Qibo Deng, Libin Zhao & Ning Hu. *Friction*, **12**, 2627–2656 (2024) DOI.10.1007/s40544-024-0864-9
42. Arifuzzaman, M., Gazder, U., Islam, M. S., & Mamun, A. *A. J. of Adhesion Sci. and Tech.*, **34**, 1100–1114 (2019), DOI 10.1080/01694243.2019.1698201
43. Bałaga Z. *Materials.* **15**. 24. 8738 (2022).
44. Adamson, M.; Eslami, B. *Exp. Inv. of Anneal. on Microscale and Macroscale Properties. Polymers*, **17**, 744 (2025), DOI: 10.3390/polym17060744
45. Shuting Zhang, Yihui Weng, Chunhua Ma. Zhanget al. *Nanoscale Res Lett*, **16**, 113 (2021)
46. Effah B. Doctor of Philosophy in Forestry in the Faculty of Agri Sciences at Stellenbosch University, Stellenbosch, , 100 (2017).
47. Fares D.E. Ghorabe, Ashish T.S. Ireddy, Pavel Zun, Mikhail Zhukov, Dmitry A. Kozodaev, Tatiana G. Volova, Ekaterina I. Shishatskaya, Ekaterina V. Skorb, *Progress in Organic Coatings*, **201**, 109092 (2025), DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109092.
48. Masayoshi Ogawa, Ayumu Morimura, Ikko Haba, Akio Yonezu, *Polymer*, **320**, 128071 (2025), DOI: 10.1016/j.polymer. 2025. 128071.

© **А. Ф. Яруллин** – канд. хим. наук, доцент каф. Технологии пластических масс (ТПМ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, aleksey-yarullin@yandex.ru; **К. Б. Вернигоров** - канд. хим. наук, генеральный директор ООО «Сибур ПолиЛаб», Москва, Россия; **С. В. Тутов** – директор по НИОКР и инновациям ООО «Сибур», Москва; **И. А. Старостина** – доктор химических наук, доцент, профессор кафедры Физики, КНИТУ, Казань, irinastarostina@mail.ru **В. И. Машуков** – канд. хим. наук, директор по прикладным разработкам ООО «Сибур ПолиЛаб», Москва; **Х. С. Абзальдинов** – канд. хим. наук, доцент каф. ТПМ, КНИТУ, abzaldinov@mail.ru; **Ю. М. Казаков** – д-р техн. наук, доцент, ректор, профессор каф. Химической технологии переработки эластомеров, КНИТУ; **О. В. Стоянов** – д-р техн. наук, профессор, директор Института полимеров, заведующий каф. ТПМ, КНИТУ.

© **A. F. Yarullin** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the Plastics Technology (PT) Department, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, aleksey-yarullin@yandex.ru; **K. B. Vernigorov** – PhD (Chemical Sci.), General Director of Sibur PolyLab LLC, Moscow, Russia; **S.V. Tutov** – Director of Director for R&D and Innovations, LLC Sibur, Moscow; **I. A. Starostina** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Associate Professor, Professor of the Department of Physics, KNRTU, Kazan, irinastarostina@mail.ru; **V. I. Mashukov** – PhD (Chemical Sci.), Director of Application Development of Sibur PolyLab LLC, Moscow; **Kh. S. Abzaldinov** - PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the PT department, KNRTU, abzaldinov@mail.ru; **Yu. M. Kazakov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Rector, Professor of the Department of Chemical Technology of Elastomers Processing, KNRTU; **O. V. Stoyanov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Full Professor, Director of Institute of Polymers, Head of the PT department, KNRTU.

Дата поступления рукописи в редакцию – 04.04.25

Дата принятия рукописи в печать – 15.04.25