ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, 2023, том 42, № 2, с. 78–82

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 579.6:544.4:519.25

ВЛИЯНИЕ ВИДОВОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ И ШЕРОХОВАТОСТИ ЛАКОТКАНИ НА ИХ АДГЕЗИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

© 2023 г. И. Г. Калинина[1]*, В. Б. Иванов[1], С. А. Семенов[1], В. В. Казарин[1], О. А. Жданова[1]

[1]*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: i_kalinina1950@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.06.2022;
после доработки 16.09.2022;
принята в печать 20.09.2022

Исследовано влияние видовой принадлежности спор плесневых грибов и шероховатости поверхности лакоткани на процесс их адгезионного взаимодействия. Показана возможность проведения оценки с использованием количественного параметра процесса – максимального числа адгезии спор к полимерным материалам. Полученные величины параметров адгезии сопоставлены с радиусами спор и шероховатостью поверхности, характеризуемой расстоянием между вершинами ее неровностей. Установлено, что на гладкой поверхности параметр адгезии возрастает с ростом радиуса. На шероховатой – может как уменьшаться, так и увеличиваться. Результаты целесообразно учитывать при разработке методов ускоренной оценки и прогнозирования стойкости материалов к заражению спорами грибов-биодеструкторов.

Ключевые слова: адгезия, микроскопические грибы, полимерные материалы.

DOI: 10.31857/S0207401X23020085, **EDN:** IWQVSG

ВВЕДЕНИЕ

В условиях эксплуатации электрооборудования нередко имеют место случаи воздействия плесневых грибов на лакотканевую изоляцию электропроводов (лакоткань), приводящие к снижению диэлектрических характеристик лакоткани и даже ее разрушению. Наиболее часто микроорганизмы заселяют участки материала, уже имеющие признаки изменений (деградации) структуры поверхности (растрескивание, набухание, травление, повышение шероховатости др.). В повреждающих процессах участвуют, как правило, сообщества микроорганизмов, среди которых основную роль большинство исследователей отводят некоторым видам плесневых грибов. В очагах повреждения часто обнаруживаются культуры, принадлежащие двум-четырем видам этих микроорганизмов [1, 2]. Необходимым условием протекания вызываемого ими процесса биоповреждения является начальное адгезионное взаимодействие спор грибов с материалом [3–5]. Оно обуславливает такое состояние пары “споры гриба – поверхность”, когда требуется сила для ее разделения. Чем больше эта сила, тем меньше имеется возможностей удаления микроорганизмов с поверхности материала в результате различных внешних воздействий и, следовательно, тем менее стоек материал к заражению грибами (биозаражению).

В работах [6–9] нами исследованы кинетические закономерности адгезии спор гриба *Aspergillus niger* (*A. niger*) к лакоткани и некоторым другим полимерным материалам при различных температурно-влажностых условиях внешней среды. Процесс характеризовали предельной (максимальной), достигаемой при завершении формирования адгезионного взаимодействия величиной числа адгезии γ_∞ (далее – γ_{max}), представляющего собой отношение количества спор, оставшихся на образце после воздействия определенной по величине силы отрыва, к числу спор, находившихся на нем первоначально.

Результаты исследований [6–10] показали, что параметр γ_{max} чувствителен к природе полимерного материала, температуре и относительной влажности воздуха. Это дает основание предположить зависимость этого параметра адгезии от видовой принадлежности гриба-биодеструктора и состояния поверхности поражаемого им материала, в частности ее шероховатости. Проверка этой гипотезы была целью настоящей работы. Обнаружение таких зависимостей позволит расширить возможности использования показателя адгезии для оценки и прогнозирования практически важ-

Таблица 1. **Значения показателей адгезии (γ_{max}) спор грибов к лакоткани и радиусов спор (r)**

Вид гриба	γ_{max}, %	r, мкм
A. niger	81.23 ± 6.57	3.92 ± 1.06
P. brevicompactum	52.51 ± 3.23	2.34 ± 0.52
P. chrysogenum	47.84 ± 3.31	2.12 ± 0.54
A. terreus	11.73 ± 1.17	1.14 ± 0.31

ной характеристики деталей и изделий – их заражаемости микроорганизмами-биодеструкторами материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследовали лакоткань, представляющую собой хлопчатобумажную нитяную основу, пропитанную этилцеллюлозным лаком ЭЦ-959 (ТУ-6-10-691-74). Этот материал способен поддерживать интенсивный рост плесневых грибов [1]. Образцы для испытаний размером 50 × 20 мм вырубали специальным штампом-ножом из предварительно удаленной с провода марки БПВЛ (ТУ 16.505.911-76) лакотканевой оплетки и наклеивали на подложки из алюминиевого сплава с целью придания им жесткости. Образцы с различной шероховатостью поверхности получали, обрабатывая лакотканевую оплетку наждачной бумагой, отличающейся зернистостью абразива. Шероховатость лакоткани определяли профилометром “Talysurf-10” компании Taulor Hobson (Great Britain) по неровности профиля сечения реальной поверхности воображаемой плоскостью и характеризовали в соответствии с ГОСТ 2789-73 [11] средним шагом неровностей профиля по вершинам (S).

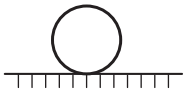
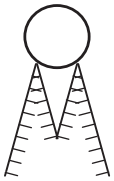
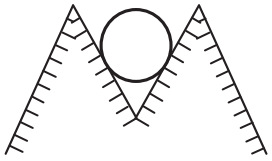
В исследованиях использовали следующие грибы: *A. niger*, штамм ВКМ F–2039; *Penicillium brevicompactum* (*P. brevicompactum*) ВКМF–234, *Penicillium chrysogenum* (*P. chrysogenum*), штамм ВКМF–3067; *Aspergillus terreus* (*A. terreu*), штамм ВКМF–1025. Каждая из культур индивидуально и их сообщество способны повреждать полимерные материалы, в том числе и лакоткань [1, 6–10, 12, 13]. Все работы с микроскопическими грибами (пересев, выращивание, хранение культур, приготовление суспензии спор, определение ее концентрации, заражение, инкубирование образцов и др.) проводили, используя стандартизованные приемы, методы и режимы [14, 15]. Грибы выращивали на агаризованной среде Чапека–Докса при температуре (29 ± 2)°C в течение 12 сут. Выросшие споры каждого вида гриба с помощью бактериологической петли переносили в колбу с дистиллированной водой. Методом электронной микроскопии с использованием микроскопа “Полам” Р-111 производства ООО “Западприбор” (Россия) измеряли концентрацию спор в суспензии и их геометрические размеры. Предварительные исследования показали, что споры всех исследуемых видов грибов имеют форму, близкую к шаровидной. Их геометрические размеры характеризовали величиной среднего радиуса (r). Концентрации суспензий, определяемые с помощью счетной камеры Горяева, составляли ~10^6 спор в 1 мл воды. Значения радиусов спор, измеренные окулярным микрометром, приведены в табл. 1.

Суспензию каждого вида гриба капельным методом наносили на предварительно очищенные от внешних загрязнений образцы. Количество спор гриба на их поверхности (N_0) составляло $(1\div2)\cdot10^5$. После заражения образцы выдерживали до испарения воды с поверхности в течение 20–40 мин и помещали в камеру тепла и влаги КТВ-0.15 (150 л), где поддерживали режим с наиболее благоприятными для развития используемых грибов температурой (29 ± 2)°C и относительной влажностью воздуха 98% [12–15].

Определение величины максимального достигаемого в эксперименте числа адгезии γ_{max} спор грибов к лакоткани проводили методом центрифугирования, подробно изложенным в работе [8]. Часть образцов извлекали из камеры, размещали в центрифужных стаканах и центрифугировали в воздушной среде с использованием центрифуги марки K-24 Janezki производства компании Heinz Janetzki (Germany). Режимы центрифугирования экспериментально обоснованы в работе [8]. Скорость вращения центрифуги составляла 7000 об/мин, время вращения – 15 мин. Возникающая при вращении центробежная сила, обеспечивающая отрыв спор, равна (но противоположна по знаку) силе их адгезионного взаимодействия с материалом. После окончания воздействия силового поля определяли количество отделившихся от материала спор ($N_{отд}$). Для этого образец извлекали из центрифужного стакана и фиксированным объемом дистиллированной воды (4 мл) смывали со дна и стенок отделившиеся от лакоткани споры гриба. В полученной суспензии определяли количество спор путем ее разведений и высевов на твердую питательную среду Чапека–Докса. Затем рассчитывали величину числа адгезии $\gamma = [(N_0 - N_{отд})/N_0]\cdot100\%$. Определение проводили периодически, раз в сутки, и прекращали, если полученные в трех последовательных отборах значения γ не увеличивались. Это значение принимали равным γ_{max}. В экспериментах испытывали семь образцов для одного определения величины γ.

Обработку экспериментальных данных проводили по алгоритмам программы STATISTICA 6.1. Разброс результатов характеризовали величиной отношения среднего квадратичного отклонения

Таблица 2. **Влияние шероховатости поверхности лакоткани на адгезию спор гриба *A. niger* (радиус спор – r = = (3.92 ± 1.06) мкм)**

Средний шаг неровностей профиля поверхности по вершинам, мкм	γ_{max}, %	Схемы контакта спор с поверхностью лакоткани
0	81.22 ± 6.57	
3.21 ± 0.85	59.32 ± 5.91	
22.77 ± 2.72	93.48 ± 5.67	

к математическому ожиданию. Он не превышал 10% при определении γ_{max}, 27% при определении r и 15% при определении S.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены значения показателя адгезии спор различных видов грибов к образцам лакоткани, не обработанной абразивом. Как следует из полученных данных, каждому виду присуще свое значение максимального числа адгезии, причем этот показатель изменяется в очень широких пределах (табл. 1).

В работе [16] с помощью электронной микроскопии показано, что в процессе адгезии происходит деформирование спор, сопровождающееся увеличением площади их контакта с материалом, что, в свою очередь, приводит к возрастанию силы адгезии. В этом случае, исходя из шаровидной формы спор, можно предположить, что площадь контакта должна быть пропорциональна величине их радиуса. Значит споры, имеющие большие радиусы, будут иметь, соответственно, и большие площади адгезионного контакта, а следовательно, и более высокую силу адгезии к поверхности. Это подтверждается данными табл. 1, в которой наряду с γ_{max} приведены значения размеров радиусов r спор исследуемых видов грибов. Видно, что значения r и γ_{max} симбатно возрастают в изученном ряду грибов. Таким образом, размер спор во многом определяет силу их адгезии к поверхности лакоткани.

Этот вывод позволяет объяснить результаты исследования адгезии грибов *A. niger* на различающихся шероховатостью образцах лакоткани. Результаты экспериментов приведены в табл. 2. Видно, что соотношение размеров спор и неровностей (шероховатости) поверхности оказывает существенное влияние на адгезионное взаимодействие. Аналогичный эффект наблюдается для частиц небиологической природы и объясняется изменением площади контакта вступающих в адгезионное взаимодействие объектов [17].

Полученные данные позволяют выделить три возможных случая влияния шероховатости подложки на адгезию. Первый характеризует взаимодействие спор с гладкой (не обработанной абразивом) поверхностью. Второй случай реализуется, когда средний шаг неровностей профиля поверхности по вершинам меньше радиуса спор. При этом, как показывают данные табл. 2, площадь контакта взаимодействующих объектов (спор и лакоткани) уменьшается. Это, вероятно, приводит к наблюдаемому снижению величины γ_{max} по сравнению с ее значением, полученным при использовании не обработанных абразивом образцов. В третьем случае шероховатость поверхности приводит к возрастанию силы адгезии. Средний шаг неровностей при этом соизмерим с радиусом спор, что, по-видимому, обеспечивает увеличение площади их контакта. Это дает основание заключить, что, так же как и для частиц небиологической природы, шероховатость поверхности влияет на площадь ее контакта со спорами, и может как уменьшать, так и увеличивать силу их адгезии.

Таким образом, полученные данные показывают существование зависимости максимального числа адгезии спор гриба к лакоткани от видовой

принадлежности гриба и шероховатости поверхности материала.

В работе [9] на основе результатов изучения влияния температурно-влажностных условий на адгезию спор грибов *A. niger* к лакоткани предложена гипотеза о физико-химической природе процесса. Авторы [9] предположили, что при высокой относительной влажности (более 65%) адгезия связана прежде всего с протеканием физических процессов молекулярного взаимодействия. В условиях высокой влажности образуется фазовая пленка воды, которая обеспечивает "активацию" поверхностей спор и материала за счет увеличения молекулярной подвижности. Кроме того, вода обуславливает возникновение способствующих адгезии капиллярных сил на границе раздела трех конденсированных фаз: полимер – спора гриба – жидкость (вода или водный раствор ответственного за адгезию вещества внешней поверхности клеточной стенки).

Автором монографии [17] и в работах [18, 19] теоретически и экспериментально обосновано, что адгезия частиц небиологической природы, обусловленная молекулярными и капиллярными силами, возрастает с увеличением радиуса частиц. Как показывают приведенные в табл. 1 данные, эта закономерность выполняется и для процесса взаимодействия спор различных видов грибов-биодеструкторов с лакотканью. Следовательно, полученные экспериментальные данные подтверждают предложенную ранее гипотезу о природе исследованных адгезионных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что использование в качестве параметра адгезии спор гриба к лакоткани максимально достигаемого в эксперименте числа адгезии γ_{max} позволяет оценивать способность пары "материал – микроорганизм" к адгезионному взаимодействию в зависимости от видовой принадлежности гриба и шероховатости поверхности материала. Величина этого параметра для различных видов грибов и шероховатых поверхностей во многом определяется площадью их контакта. На гладкой поверхности параметр адгезии возрастает при увеличении радиуса спор грибов. На шероховатой поверхности он может как уменьшаться, так и увеличиваться в зависимости от соотношения радиуса спор и расстояния между вершинами неровностей поверхности лакоткани. Результаты исследований целесообразно учитывать при разработке методов оценки и прогнозирования стойкости материалов к заражению грибами-биодеструкторами.

Выявленная зависимость параметра γ_{max} от величины радиуса спор грибов является дополнительным подтверждением сформулированной ранее [9] гипотезы о ведущей роли молекулярных и капиллярных сил в процессах, обуславливающих адгезию спор грибов к лакоткани в условиях высокой влажности (более 65%). Молекулярное взаимодействие макромолекул материала и спор активируется фазовой пленкой воды, роль которой может усиливаться вследствие ее капиллярной конденсации в зазоре между контактирующими поверхностями.

Следует отметить, что в цикле работ [6–9, 12], так же как и в настоящей статье, нами рассматривалась адгезия к полимерным поверхностям спор грибов из их водной суспензии. Вместе с тем в реальных условиях заражение чаще всего происходит воздушным путем. В целях расширения представлений о процессе адгезии целесообразно провести его исследование в условиях переноса спор на материал из воздушной среды.

Настоящая работа была выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Семенов С.А., Гумаргалиева К.З., Заиков Г.Е.* // Вестн. МИТХТ. 2008. Т. 3. № 2. С. 3.
2. *Spina F., Tummino M.L., Poli A. et al.* // Environ. Pollut. 2021. V. 274. 116548; https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116548
3. *Camesano T.A., Liu Y., Datta M.* // Adv. Water Resources. 2007. V. 30. P. 1470.
4. *Burgers R., Hahnel S., Reichert Torsten E. et al.* // Acta Biomater. 2010. № 6. P. 2307.
5. *Vivi V.K., Martins-Franchetti S.M., Attili-Angelis D.* // Folia Microbiol. 2019. V. 64. P. 1; https://doi.org/10.1007/s12223-018-0621-4
6. *Gumargalieva K.Z., Sevenov S.A., Kalinina I.G. et al.* // RFP (Rubber, Fibres, Plastics) Intern. 2011. V. 6. № 2. P. 114.
7. *Калинина И.Г., Гумаргалиева К.З., Казарин В.В. Семенов С.А.* // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 3. С. 54; https://doi.org/10.7868/S0207401X17030062
8. *Калинина И.Г., Семенов С.А., Гумаргалиева К.З., Казарин В.В.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 2. С. 78; https://doi.org/10.7868/S0207401X18020103
9. *Калинина И.Г., Семенов С.А., Иванов В.Б., Казарин В.В.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 6. С. 71; https://doi.org/10.31857/S0207401X21060054
10. *Whitehead K.A., Deisenroth T., Preuss A., Liauw Ch.M., Verran J.* // Colloids Surf. B. 2011. V. 82. P. 483.
11. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Стандартинформ, 2018.
12. *Калинина И.Г., Иванов В.Б., Семенов С.А., Казарин В.В., Жданова О.А.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 11. С. 48; https://doi.org/10.31857/S0207401X20110060
13. *Калинина И.Г., Иванов В.Б., Семенов С.А., Казарин В.В., Жданова О.А.* // Хим. физика. 2022. Т. 41.

№ 2. С. 57;
https://doi.org/10.31857/S0207401X22020042

14. ГОСТ 9.048-89. ЕСЗКС. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. М.: Изд-во стандартов, 1989.

15. ГОСТ 9.049-91. ЕСЗКС. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. М.: Изд-во стандартов, 1992.

16. *Казначеев И.В., Гумаргалиева К.З., Миронова С.Н., Моисеев Ю.В.* // Микробиол. журн. 1988. Т. 50. № 6. С. 68.

17. *Зимон А.Д.* Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1967. С. 43.

18. *Дохликова Н.В., Озерин С.А., Доронин С.В. и др.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 6. С. 72;
https://doi.org/10.31857/S0207401X22060024

19. *Дохликова Н.В., Гатин А.К., Сарвадий С.Ю. и др.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 7. С. 76;
https://doi.org/10.31857/S0207401X22070044