

Физико-химическая механика адгезионного взаимодействия полимер-металл

Д. Г. Лин

Адгезия – связь между приведенными в контакт разнородными поверхностями, объединяет в себе широкий круг явлений и процессов, таких как смачивание, прилипание, склеивание, окрашивание, трение и т. д. В использовании термина "адгезия" существует много неопределенностей. Под адгезией часто понимают либо непосредственно процесс взаимодействия различных по физико-химической природе конденсированных тел, либо прочность соединения разнородных материалов, либо потенциальную способность тел к взаимодействию и т. д. Оставляя в стороне дискуссию по этому поводу, хорошо и давно представленную в литературе, отметим, что для Института механики металлополимерных систем НАН Беларуси (ИММС), поставившего для себя задачу разработки и практического использования различного рода металлополимерных материалов и изделий, вопрос о взаимодействии полимеров с металлами представляет главный научный интерес.

В конце 60-х годов прошлого века исследования свойств адгезионных соединений полимеров с металлами были сосредоточены, главным образом, в лаборатории № 1 ИММС. Возглавлял это направление выпускник БИИЖТа 1962 года Егоренков Николай Иванович. Вместе с ним в лаборатории работал Плескачевский Юрий Михайлович, окончивший Киевский политехнический институт. Так уж получилось, что я стал первым выпускником Гомельского университета имени Ф. Скорины (ГГУ), который после окончания университета пришел на работу в ИММС.

Случилось это так. Владимир Алексеевич Белый, придя в ГГУ на должность ректора ГГУ, обратился к выпускникам физического отделения физико-математического факультета с предложением познакомиться с тематикой работы ИММС и при обоюдной заинтересованности (Института и выпускника) зачислиться в штат ИММС. Я встретился с Н. И. Егоренковым (он, как я отмечал, непосредственно руководил группой исследователей, занимающихся изучением адгезионных свойств полимеров). Николай Иванович рассказал мне о проводимых в лаборатории работах. Меня это заинтересовало, и я выразил желание работать по адгезионной тематике. После этого была краткая встреча с ректором, который дал согласие взять меня на работу в ИММС с испытательным сроком. Я согласовал с облоно замену своего распределения (оно уже было оформлено) и в августе 1969 года приступил к работе в ИММС.

Замечу, что в то время костяк ИММС составляли инженеры-механики – выпускники БИИЖТа. В штате ИММС были немногочисленные представители и других вузов. Из выпускников Гомельского пединститута им. В. П. Чкалова в ИММС тогда работали М. Петраковец и Д. Родченко; в начале 70-х годов они защитили кандидатские диссертации, а позже – докторские. На втором году работы, в 1970 году, мне самому приходилось заниматься подбором выпускников ГГУ для направления их на работу в ИММС. В то время ИММС было выделено бюджетное финансирование по разработке слоистых (фольгированных) металлополимерных материалов. Помнится, что в 1970 году по моей рекомендации в ИММС пришли В. Родненков (талантливый экспериментатор), М. Близнац, О. Кохановский (физики), Т. Горячева, О. Копылов (химики). В 1971 году в ГГУ не было выпуска по специальности «физика», так как происходил переход на другой учебный план. В 1972 году в ИММС пришли выпускники ГГУ А. Рогачев, В. Савицкий, П. Богданович, В. Кончиц. С годами распределение студентов в ИММС становилось более системным и устойчивым. Чтобы закончить эту тему, замечу, что многие из выпускников университета защитили докторские (А. Рогачев, П. Богданович, Д. Лин, В. Миронов,

С. Ермаков, А. Зайцев, И. Елисеева) и кандидатские (М. Близнец, В. Кончиц, В. Родненков, В. Савицкий, Е. Соколов, В. Сергиенко, Е. Воробьева, А. Кузавков, А. Егоренков, Т. Халаисина, В. Резник, Д. Ткачук, С. Короткевич, И. Злотников, А. Попов, Н. Рогачева, Н. Соловей и др.) диссертации в области полимерного и фрикционного материаловедения.

Возвращаясь к лаборатории, в которой я начал свою работу, отмечу, что оснащена она была слабо и в ней в основном проводились исследования механических свойств различного рода адгезионных соединений полимеров с металлами. Там были освоены методы нормального отрыва (методы "грибков", "штифтов") и отслаивания (пленки полимера от подложки и металлической фольги от слоя полимера). Изучалось влияние различного рода модифицирующих добавок, природы полимера и металла на прочность адгезионных соединений. Главный научный интерес был сосредоточен в выявлении роли окислительных превращений полимера на стадии формирования адгезионного контакта в обеспечении того или иного уровня прочности сцепления полимера с металлом. С этой целью проводились сопоставительные исследования свойств адгезионных соединений, сформированных в кислородсодержащей и инертной средах. Изучалось также влияние антиокислительных добавок, вводимых в полимеры, на их адгезионные свойства. Вместе с тем молодые исследователи, работающие в лаборатории, ясно понимали, что без привлечения новых методов физико-химического анализа полимеров они многого не добьются. Необходимо было приобретать современное оборудование и осваивать уникальные методики исследований. В этом нам много помогал В. А. Белый, который часто и совсем неформально, обычно по вечерам, встречался с сотрудниками ИММС. В один из визитов в г. Гомель Н. А. Борисевич (в то время президент АН БССР) пообещал передать ИММС используемый в Институте физики инфракрасный спектрометр UR-10. Ю. М. Плескачевский быстро организовал доставку прибора в г. Гомель и смонтировал его в одном из помещений лаборатории. Добавлю, что осенью 1969 года впервые в истории г. Гомеля был записан инфракрасный спектр полиэтилена.

Для проведения дифференциально-термического анализа (ДТА) полимеров и композиций на их основе в лаборатории имелось изготовленное для этой цели самодельное устройство (разработал Ю. М. Плескачевский). Вместе с тем хотелось приобрести прибор ДТА с программируемым режимом задания температуры и автоматической записью кривой ДТА. Мне было поручено достать такой прибор. После нескольких лет переписки (с одним из ленинградских объединений, клубом "Факел" из Воронежа, отделом снабжения АН БССР и др.) в начале 70-х годов в лаборатории был установлен дериватограф венгерского производства, осуществляющий одновременно дифференциально-термический и термогравиметрический анализы материалов. Многие годы "джентльменский" набор из инфракрасного спектрометра и дериватографа являлся визитной карточкой ряда лабораторий ИММС.

В конце 1969 года Н. И. Егоренков обратил внимание на то, что оксидная пленка на стали после контакта с расплавом полиэтилена исчезает. Этот яркий эффект, названный как явление восстановления оксидных пленок расплавами полимеров, впоследствии был дополнен другими наблюдениями. Оказалось, что слой свинца на стеклянной подложке после контакта с расплавом поливинилбутирала исчезает. Были проведены эксперименты с многими полимерами и металлами. По результатам исследований была оформлена заявка на открытие «Явление растворения металлов расплавами полимеров». В то время в ряде социалистических стран существовала правовая охрана открытий как самостоятельного объекта патентного права. Среди лабораторий ИММС шло негласное соревнование на тему, какая из лабораторий первой получит диплом на открытие. К сожалению, в период существования государственной научной экспертизы открытия этого не произошло. Результаты первых исследований по переносу металла в полимеры были представлены в работах [1-9].

Несмотря на то, что приоритетные интересы ученых в части получения диплома на открытие не были удовлетворены, проведенные исследования контактного взаимодействия полимер-металл позволили выделить новое научное направление, которое может быть названо как физико-химическая механика адгезионных соединений. При этом под адгезионным соединением понимается не только статический контакт полимер-металл, но и подвижный — фрикционный контакт. Нужно сказать, что период ректорства В. А. Белого в ГГУ ознамено-

вался активизацией исследований в области трения и износа. На работу в университет были приглашены доктор технических наук, профессор Д. Н. Гаркунов, к. т. н. В. А. Балакин. К исследованиям по тематике подключились кандидаты наук Г. П. Шпеньков и В. В. Харитонов. Была образована группа исследователей и аспирантов: В. Матюшенко, Б. Хархасов, В. Москалев, В. Копылов, И. Мельниченко и другие. В. А. Белый мне говорил не один раз, что он собирается открыть инженерно-физический факультет. В его планы входило также создание совета по защите кандидатских диссертаций по специальности «физика и механика полимеров». Стремясь активизировать научные исследования в ГГУ, В. А. Белый перевел в университет некоторых своих аспирантов. К сожалению, не всем планам ректора было суждено сбыться, в начале 1973 года он переехал на работу в Минск.

В последующем научное направление по трению и износу было свернуто. В разное время ГГУ покинули Д. А. Гаркунов, В. В. Харитонов, Г. П. Шпеньков, В. Я. Матюшенко и другие. И. М. Мельниченко, руководивший некоторое время проблемной лабораторией по трению и износу, перепрофилировал тематику лаборатории. В настоящее время в ГГУ исследованиями механизма износа при трении металлов системно занимается только профессор В. Г. Пинчук. В 1994 году им была защищена докторская диссертация по дислокационному механизму изнашивания твердых тел.

Вернемся в лабораторию № 1 ИММС. Там в 70-х годах были развернуты детальные исследования механизма контактного взаимодействия расплавов полимеров с металлами. Были определены технологические и рецептурные условия реализации ряда эффектов: растворение расплавами полимеров поверхностных слоев металлов, восстановление и, наоборот, катализ окисления металлов в контакте с полимерами, избирательное растворение компонентов сплава металлов; реализация этих эффектов при фрикционном контакте полимеров с металлами. Было выявлено влияние металла-подложки на физико-химический и структурно-механические свойства граничных слоев полимеров, находящихся в адгезионном контакте. Это проявляется в ускорении или подавлении кристаллизационных процессов, образовании транскристаллической структуры и инициировании сферолитообразования в полимерах, изменении кинетики окисления полимера, в частности, переход от катализа к ингибированию окисления.

Был установлен перенос ряда металлов в расплавах полимеров, выявлена взаимосвязь процесса переноса металлов и катализа окисления полимера, определена структура переносимых соединений металлов, для ряда полимеров оценена роль их окисления и окислительного структурирования в адгезии к металлам (прочности единения). Результаты исследований были опубликованы в ведущих научно-технических журналах и сборниках [4-19], а также представлены и защищены в диссертационных работах Н. И. Егоренкова (1970), Ю. М. Плескачевского (1972), Д. Г. Лина (1974 г.). За цикл работ по исследованию контактных явлений в процессах формирования и разрушения металлополимерных систем названный коллектив был удостоен Премии Ленинского комсомола в области науки и техники (1973 г.).

Наряду с выполнением научных исследований одной из задач коллектива лабораторий было внедрение результатов в производство. Занятие прикладными разработками для ИММС было таким же непреложным и обязательным, как, скажем, в природе смена дня ночью или смена времен года. Основные научно-технические разработки того времени относятся к методам получения новых композиционных материалов и покрытий на металлах, а также к созданию оборудования, обеспечивающего технологический процесс. На предприятиях химической промышленности, с которыми выполнялись хозяйственные работы, создавались участки по нанесению антикоррозионных покрытий из полимеров (Светлогорский завод искусственного волокна, Ленинградское КБ арматуростроения, Балаковский химический комбинат и другие), разрабатывался и апробировался в производственных условиях технологический регламент процессов нанесения и формирования покрытий, осуществлялся выпуск изделий с защитными покрытиями. Многие из разработок были выполнены на уровне изобретений; в 70-х годах мною было получено более 30 авторских свидетельств на изобретения, относящихся к созданию методов исследования и получения металлополимерных материалов.

В ноябре месяце 1977 года я, по предложению ректора ГГУ Б. В. Бокутя, подал документы для участия в конкурсе на замещение вакантной должности старшего преподавателя кафедры общей физики и после избрания, с 1. 01. 1978 г. перешел на работу в университет. Через некоторое время, в 1993 году, стал работать в университете Н. И. Егоренков (правда, в ГГУ он работал недолго, до 1996 года). Здесь он возглавил проблемную лабораторию. Можно считать, что с этого времени центр исследований по физико-химической механике адгезионных соединений сосредоточился в ГГУ.

Наряду с сохранением прежней направленности программы исследований акценты в ее реализации несколько сместились. В исследованиях расширился круг полимерных материалов. Кроме термопластов (в основном полиэтилен, поликапроамид, фторопласты, поливинилбутирала) большое внимание теперь уделялось реактопластам (в основном эпоксидные смолы) и эластомерам (диеновые каучуки и вулканизаты на их основе). Помимо научного интереса расширение спектра полимеров было вызвано разнообразной хозяйственной тематикой исследований, выполняемой по заказу предприятий. В то время выполнялись работы по разработке технологии получения защитных покрытий из термопластов (Шосткинский химический комбинат, Ленинградское НПО арматуростроения, ГСКБ по комплексу оборудования для микроклимата предприятий сельхозмашиностроения и другие), по разработке эпоксидных компаундов и конструкций из резин для судостроения (Ленинградский НИИ технологии судостроения), по повышению защитной стойкости резиновых уплотнителей (Пермское агрегатно-конструкторское бюро и другие).

Широкий перечень полимерных материалов позволил детально изучить влияние релаксационного состояния полимеров на прочность адгезионных соединений с металлами и характер их разрушения. Результаты этих исследований представлены в работах [20-28]. В частности, были изучены закономерности изменения адгезионной прочности вулканизатов с металлами в широком интервале температур. Установлено, что при вулканизации каучука происходит последовательное вырождение максимумов адгезионной прочности (сопротивление отслаиванию) в области температур испытаний, соответствующих переходу эластомера из одного релаксационного состояния в другое. В развитие этого установлена обратная температурно-концентрационная аналогия во влиянии основного вулканизирующего агента – серы на адгезионно-механические характеристики эластомера, обусловленные изменением его релаксационного состояния [26, 28].

Результаты исследований контактного окисления полимеров на металлах позволили разработать концепцию определяющего влияния окислительных превращений на адгезионные и другие характеристики полимерных покрытий. Определено влияние на адгезионную прочность модификаторов, вводимых в полимеры, а также оксидных пленок, образующихся на подложке в ходе формирования покрытий [29-32]. По результатам исследований были предложены составы и способы получения покрытий и грунтовочных слоев, в которых с целью увеличения адгезионной прочности использованы окислительные превращения полимера и металлической подложки. В 1993 году мною была представлена и защищена докторская диссертация по специальности «материаловедение в машиностроении (промышленность)» на тему «Научные основы создания слоистых металлополимерных машиностроительных материалов с использованием термопластов и эластомеров».

Как отмечалось выше, в 80-90-е годы в ГГУ были развернуты исследования контактного взаимодействия эластомеров с металлами и другими твердыми материалами. Эти исследования были инициированы рядом хозяйственных работ, выполняемых по заказу НИИ технологии судостроения.

На начальном этапе выполнения этих работ нами изучались кинетические закономерности окисления и ход вулканизации каучуков в контексте с металлами переменной валентности. Был установлен перенос в каучуки каталитически активных металлов, участие их в реакциях окисления и окислительного структурирования макромолекул каучуков, избирательного переноса компонентов сплавов металлов в объеме окисляющегося вулканизата [33-47]. Выполненные исследования позволили И. М. Елисеевой защитить в 1989 году кандидатскую, а в начале 1998 года – докторскую диссертацию на тему «Физико-химическое модифицирование поверхностных слоев эластомеров при формировании композиционных материалов».

Распад Советского Союза и переход Беларуси в режим суверенного государства отрицательно сказался на научных контактах с Россией и, самое главное, на возможности финансирования научных исследований. В 90-е годы хоздоговорная основа финансирования научных исследований практически меняется на госбюджетную, когда в конкурсном режиме финансируются отдельные проекты. В эти годы выполняется целый ряд исследований по заданиям Министерства образования, Государственных программ Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Сложившаяся обстановка в части финансирования научных исследований позволяла вернуться к начатым ранее исследованиям по контактному окислению полимеров на металлах. В методическом плане главное внимание было уделено применению метода полярографического анализа для оценки содержания перенесенного в полимер металла. Эти работы проводились совместно с доцентом В. Г. Свириденко, а затем к ним подключилась выпускница биологического факультета Е. В. Воробьева. Елена Валерьевна выполнила ряд оригинальных исследований по переносу меди в полиэтилен. Ею был исследован двухстадийный механизм переноса меди в полиэтилен, установлено распределение переносимого металла в гель- и золь-фракциях полимера, изучен ход окислительного структурирования. Результаты исследований были опубликованы в ведущих научных журналах [48-58]. В 2002 году Е. В. Воробьева защитила в Совете при Институте физико-органической химии НАН Беларуси кандидатскую диссертацию по специальности «высокомолекулярные соединения». Она думает работать над докторской диссертацией, и ГГУ отправил заявку на место для нее в докторантуре. Вместе с В. Е. Воробьевой работает аспирантка Н. В. Марченко. В ее задачу входит оценить влияние металлов на эффективность антиоксидантов, вводимых в полимеры. Ею обнаружено и объяснено противоположное влияние меди на ингибирующую способность аминного и фенольного антиоксидантов. Завершена экспериментальная работа по подготовке кандидатской диссертации С. Н. Седяровой [56, 59-65]. Работает над диссертацией аспирант А. П. Тимошенко.

Коллектив, работающий по адгезионной тематике, переполнен идеями и проектами.

Abstract. The author represents a history of the development of the researches dedicated to adhesive interaction of polymer-metal in Gomel University.

Литература

1. В. А. Белый, Н. И. Егоренков, Ю. М. Плескачевский, *Явление растворения металлов расплавами полимерных покрытий*, Высокомолекулярные соединения, **12**, № 9 (1970), 643-644.
2. В. А. Белый, Н. И. Егоренков, Ю. М. Плескачевский, *Исследование процессов взаимодействия расплава полимеров с металлами*, Доклады АН БССР, **14**, № 3 (1970), 716-718.
3. Н. И. Егоренков, В. А. Белый, Ю. М. Плескачевский, в сб. «Клеи и соединения на их основе», № 1 (1970), 58-60.
4. Н. И. Егоренков, В. А. Белый, Д. Г. Лин, *Автоингибирование при каталитическом термоокислении полиэтилена медью*, Доклады АН БССР, № 8 (1971).
5. Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, В. А. Белый, *Влияние контактных реакций расплава полиэтилена с металлом на окисление полиэтилена*, Доклады АН СССР, **207**, № 2 (1972), 397-400.
6. В. А. Белый, Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, *Особенности термоокисления полиэтилена, контактирующего с поверхностью меди*, Высокомолекулярные соединения, **14Б**, № 10 (1972), 787-789.
7. Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, В. А. Белый, *О причинах катализа и ингибирования при термоокислении полиэтилена в присутствии меди*, Доклады АН БССР, **16**, № 11 (1972), 1012-1014.
8. Егоренков Н. И., Лин Д. Г., Белый А. В., *Автоингибирование при каталитическом термоокислении полиэтилена медью*, Доклады АН БССР, **15**, № 8 (1972), 710-712.
9. В. А. Белый, Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, *Влияние металлов на термоокисление полиэтиленовых пленок*, Пластические массы, № 1 (1973), 44-46.

10. Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, В. А. Белый, *Контактное окисление расплава полиэтилена на сплавах металлов*, Доклады АН СССР, **214**, № 6 (1974), 1376–1379.
11. Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, В. Н. Цыганок и др., *Влияние контактного окисления свинца и полиэтилена на прочность адгезионного соединения*, Известия АН БССР, Серия физ.-техн. наук, № 2 (1974), 105–109.
12. Д. Г. Лин, Н. И. Тишков, Н. И. Егоренков, *О природе экзотермических пиков при 425–475 °К на термограммах поликапромида*, Известия АН БССР, Серия физико-технических наук, № 4 (1974).
13. N. I. Egorenkov, D. G. Lin, V. A. Bely, *Effect of Metals on Melt Oxidation of Polyethylene*, Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition, **13** (1975), 1493–1498.
14. Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, В. А. Белый, *Исследование ингибированного окисления расплава полиэтилена в неизотермических условиях*, Доклады АН СССР, **223**, № 1 (1975), 154–157.
15. Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, А. И. Кузавков, *Исследование окисления и адгезии наполненного полиэтилена*, Высокомолекулярные соединения, **17A**, № 8 (1975), 1858–1861.
16. Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, Е. Н. Соколов, *Влияние металлов на термоокисление пентапласта*, Известия АН БССР, Серия физ.-техн. наук, № 3 (1975), 113–116.
17. N. I. Egorenkov, D. G. Lin, V. A. Belyi, *DTA investigation of inhibited and catalyzed oxidation of Polyethylene*, Journal of Thermal Analysis, **10** (1976), 357–362.
18. N. I. Egorenkov, D. G. Lin, V. A. Belyi, *Study of oxidation and adhesion of filled stabilized polyethylene*, Journal of Adhesion, **7** (1976), 269–277.
19. Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, А. И. Кузавков, *Влияние толщины на окисление и адгезию полиэтиленовых покрытий*, Доклады АН БССР, **20**, № 5 (1976), 417–420.
20. Д. Г. Лин, И. К. Рудинский, Н. И. Егоренков, *Влияние температуры на адгезионные свойства смесей термопластичных полимеров*, Аннотации докладов IV Всесоюзной конференции по механике полимерных и композитных материалов. – Рига: Институт механики полимеров АН Латвийской ССР, 1980, с. 54.
21. Д. Г. Лин, И. К. Рудинский, Н. И. Егоренков, *Влияние температуры на адгезионные свойства смесей термопластичных полимеров*, Коллоидный журнал, № 1 (1982), 132–135.
22. Н. И. Егоренков, И. К. Рудинский, Д. Г. Лин, *Влияние температуры испытаний на адгезию к алюминию полиэтиленовых покрытий, окисленных в расплавленном состоянии*, Коллоидный журнал, **47**, № 1 (1985), 150–152.
23. Д. Г. Лин, И. М. Елисеева, Н. И. Егоренков, *Высокотемпературное контактное окисление и адгезия к металлам бутадиен-нитрильного каучука*, Каучук и резина, № 1 (1986), 13–16.
24. D. G. Lin and I. M. Eliseeva, *Untersuchung der Thermooxidation von Kautschuken im Kontakt mit Metallunterlagen*, Plast und Kautschuk, № 7 (1988), 267–269.
25. И. М. Елисеева, Л. А. Кампо, Д. Г. Лин, *Влияние вулканизации каучука на адгезию соединений резин со стеклотканью*, Технология судостроения, № 11 (1989), 52–54.
26. D. G. Lin and I. M. Eliseeva, *Einfluss der Zusammensetzung des Vulkanisationssystems von Kautschuk-mischungen auf die Adhäsion des Elastomers zum Metall*, Plaste und Kautschuk, № 6 (1989), 197–200.
27. Д. Г. Лин, И. М. Елисеева, *Влияние вулканизации эластомеров на адгезионную прочность соединения их с металлами в композиционных материалах*, Тезисы докладов Московской международной конференции по композитам, М., 1990, с. 70.
28. Д. Г. Лин, И. М. Елисеева, *Влияние условий вулканизации на адгезию бутадиен-нитрильного каучука к стали*, Весці Акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук, № 3-4 (1992), 116–119.
29. Н. И. Егоренков, А. И. Кузавков, Д. Г. Лин, *О влиянии низкомолекулярных продуктов окисления на адгезию полиэтиленовых покрытий*, Известия АН БССР. Серия хим. наук, № 2 (1980), 118–123.
30. Н. И. Егоренков, А. И. Кузавков, Д. Г. Лин и др., *Влияние кремнийорганических пероксидов ацетиленового ряда на адгезию полиэтилена к металлам*, Известия АН БССР. Серия хим. наук, № 6 (1981), 97–102.

31. N. I. Egorenkov, A. I. Kuzavkov, V. V. Evmenov, D. G. Lin, *Thermal Analysis of composites based on crystalline polymers and metals*, Journal of Thermal Analysis, **24** (1982), 9–14.
32. И. М. Елисеева, Д. Г. Лин, *Влияние металлов на термоокисление и структурирование бутадиен-стирольного каучука*, Известия АН БССР, Серия хим. наук, № 4 (1988), 83–86.
33. И. М. Елисеева, В. Г. Свириденко, Д. Г. Лин, *Применение переменного-токовой вольтамперометрии для исследования переноса металлов в изопреновом каучуке, окисляемом на сплавах*, Высокомолекулярные соединения, Серия А, **28**, № 7 (1986), 1551–1553.
34. И. М. Елисеева, Д. Г. Лин, В. Г. Свириденко, *Контактное окисление и структурирование изопренового каучука на металлах*, Известия АН БССР. Серия хим. наук, № 5 (1986), 120–121.
35. И. М. Елисеева, Д. Г. Лин, *Исследование окислительного структурирования бутадиенового каучука на металлах*, Промышленность СК, шин и РТИ, № 8 (1987), 11–14.
36. В. Г. Свириденко, Д. Г. Лин, И. М. Елисеева, *Использование переменного-токовой полярографии для определения металлов в полимерных материалах*, Журнал аналитической химии, **42**, № 8 (1987), 1525–1527.
37. И. М. Елисеева, В. Г. Свириденко, Д. Г. Лин, *Накопление металлов в пленках каучуков, окисляемых на латуни*, Каучук и резина, № 2 (1988), 7–9.
38. I. M. Eliseeva, V. G. Sviridenko, D. G. Lin, *Accumulation of Metals in Rubbers Oxidized on Brass*, International Polymer Science and Technology, № 7 (1988), 8–10.
39. И. М. Елисеева, Д. Г. Лин, Е. В. Глаговская, *Исследование окисления и структурирования бутадиенового каучука на металлах*, Известия АН БССР. Серия химических наук, № 5 (1988), с. 118. Депонирована в ВИНТИ, № деп. 2681-В88.
40. И. М. Елисеева, В. А. Филиппова, Д. Г. Лин и др., *Накопление меди в бутадиеновом и сополимерных каучуках*, Каучук и резина, № 11 (1989), 42–43.
41. Д. Г. Лин, В. Е. Четвериков, И. М. Елисеева, *Особенности влияния активаторов на процесс серной вулканизации бутадиен-нитрильного каучука*, Производство и использование эластомеров, № 2 (1992), 2–5.
42. D. G. Lin and I. M. Eliseeva, *Zur Kontaktoxidation von inhibierten Kautschuken auf Metallen*, Plaste und Kautschuk, **41**, № 5 (1994), 234–236.
43. D. G. Lin and I. M. Eliseeva, *Control of adhesion strength in metal-elastomer joints during elastomer*, Wear, **192** (1996), 46–48.
44. Д. Г. Лин, И. М. Елисеева, *Окисление и вулканизация каучуков и резин в контакте с металлами*, Гомель, Полеспечать, 1996, 180 с.
45. D. G. Lin and I. M. Eliseeva, *Zum Einfluss der Metalle auf die Oxidation und Oxidative Vernetzung der Kautschuke*, Kunststoff Berater, № 5 (1997), 226–229.
46. D. G. Lin and I. M. Eliseeva, *Effect of Test Temperature on Adhesion Strength of Rubber Blends-Metal Joints*, Advances in Materials and Processing Technologies, 1997, 254–257.
47. D. G. Lin and I. M. Eliseeva, *On Vulcanization of Elastomers in Contact with Metals when in Composite Materials*, Fiber Composites in Infrastructure, 1998, 740–747.
48. Д. Г. Лин, Е. В. Воробьева, *Исследование окислительного структурирования полиэтиленовых покрытий на металлах*, Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук, № 3 (2000), 112–115.
49. D. G. Lin, E. V. Vorobieva, *On Oxidation and Adhesion of Copper-Filled PE*, Journal of Applied Polymer Science, **80** (2001), 2047–2052.
50. Д. Г. Лин, Е. В. Воробьева, *Перенос металла в полиэтиленовых пленках, окисляемых на медных подложках*, Журнал прикладной химии, **74**, № 6 (2001), 998–1002.
51. Д. Г. Лин, Е. В. Воробьева, *Влияние аминного антиоксиданта на окисление полиэтилена в контакте с медью*, Пластические массы, № 1 (2002), 9–11.
52. D. G. Lin, E. V. Vorobieva, *Crosslinking in Polyethylene Films by Oxidation on Metals*, Journal of Applied Polymer Science, **84** (14) (2002), 2776–2783.
53. Д. Г. Лин, Е. В. Воробьева, *Перенос соединений металла при контактном окислении полиэтилена на меди*, Журнал прикладной химии, **75**, Вып. 5 (2002), 836–839.
54. D. G. Lin, E. V. Vorobieva, *Relationship Between Thickness of Polymer Films and Their Oxidation on Copper Substrate*, Journal of Applied Polymer Science, **87**, № 4 (2002), 671–675.

55. D. G. Lin, E. V. Vorobieva, *The oxidation and adhesion of stabilized polyethylene coatings*, Journal of Adhesions Science and Technology, 17, № 2 (2003), 179–193.
56. D. G. Lin, S. N. Sedliarova, E. V. Vorobieva, *On the role of sulfurization in adhesion of nitrile rubber to brass*, Journal of Adhesions Science and Technology, 17, № 5 (2003), 633–641.
57. Д. Г. Лин, Е. В. Воробьева, *Термоокисление пленок полиэтилена, содержащих дисперсную медь и антиоксидант аминного типа*, Журнал прикладной химии, 76, № 5 (2003), 856–859.
58. Д. Г. Лин, Е. В. Воробьева, Н. В. Марченко, *Влияние стеарата меди на окисление полиэтилена, ингибированного неозоном Д*, Журнал прикладной химии, 77, Вып. 9 (2004), 1539–1542.
59. И. М. Елисеева, Д. Г. Лин, С. Н. Седлярова, *Химическая стойкость резин в углеводородных средах*, Материалы, технологии, инструмент, № 2 (1997), 41–43.
60. Д. Г. Лин, И. М. Елисеева, С. Н. Седлярова, *Защита резиновых уплотнителей полимерными покрытиями*, Материалы, технологии, инструмент, № 2 (1998), 85.
61. Д. Г. Лин, С. Н. Седлярова, *Модификация нитрильных резин для повышения их защитной стойкости*, Производство и использование эластомеров, 2000, Вып. 2, 24–26.
62. S. Sedlyarova, I. Eliseeva, D. Lin, *Effect of the crosslinking agents and lowmolecular substances on characteristics of field performance rubber sealants*, Материалы 7 Интернациональной конференции по трибологии, Будапешт, 2000, с. 283–286.
63. С. Н. Седлярова, И. М. Елисеева, Д. Г. Лин, *Влияние полимерных модификаторов на эксплуатационные свойства резиновых уплотнителей*, Материалы, технологии, инструменты, 5, № 5 (2000), 46–48.
64. С. Н. Седлярова, И. М. Елисеева, Д. Г. Лин, *Влияние сшивающих агентов и низкомолекулярных модификаторов на эксплуатационные свойства резиновых уплотнителей*, Материалы, технологии, инструменты, 6, № 4 (2001), 49–52.
65. Д. Г. Лин, С. Н. Седлярова *Влияние сульфидирования подложки на адгезию нитрильной резины к металлам*, Материалы, технологии, инструменты, 7, № 1 (2002), 81–85.