

УДК 666.9.019:678

Ю.В. Холодников<sup>1</sup>, И.А. Волежанин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО СКБ «Мысль» (Екатеринбург, Россия).

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (Екатеринбург, Россия).

## КОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

В статье приведены основные способы защиты технологического оборудования от воздействия агрессивной рабочей среды композиционными материалами с полимерной матрицей. Приведена классификация, описаны новые способы защиты и даны рекомендации по их применению.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, защита технологического оборудования, агрессивная рабочая среда, опасные производственные факторы, футеровка.

Коррозионные процессы отличаются широкой распространенностью и разнообразием условий и сред, в которых они протекают. Поэтому пока нет единой и всеобъемлющей классификации встречающихся случаев коррозии. Коррозию классифицируют по типу агрессивных сред, по условиям протекания коррозионного процесса, по характеру разрушения и т.п., однако главным классификационным признаком коррозии служит механизм ее протекания. По этому признаку классически различают два вида коррозии: химическую и электрохимическую коррозию. Следует иметь в виду, что вследствие высоких диэлектрических свойств полимерных композитов электрохимическая коррозия для них не является приоритетным видом разрушения и в данном случае большее значение в прогнозировании долгосрочных эксплуатационных параметров имеет анализ химического или физико-химического взаимодействия композита с агрессивной рабочей средой.

Анализируя физико-химическую составляющую коррозионных процессов, протекающих между изделием из полимерных компо-

зиционных материалов и рабочей средой, рассмотрим также проблемы защиты изделий от абразивного износа, теплового, радиационного, биологического воздействия, вибрации, шума и других опасных производственных факторов. В конце концов, каждый из перечисленных производственных факторов или их совокупность оказывают существенное влияние на эксплуатационные качества изделий, выполненных из полимерных композиционных материалов (ПКМ). И еще одно замечание: класс ПКМ очень широк и многообразен, и охватить все его возможные виды и исполнения, а также проанализировать с точки зрения коррозионной стойкости в различных рабочих средах – не компетенция одной журнальной статьи, поэтому мы остановимся на полимерных композитах с терморезистивной матрицей как на одном из перспективных (с точки зрения применения в качестве изделий промышленно-технического назначения) классов ПКМ.

На рисунке 1 представлена схема, отражающая основные способы защиты полимерными композиционными материалами оборудования

и изделий от воздействия опасных производственных факторов.

Известно, что основные способы защиты технологического оборудования, машин, механизмов и изделий промышленного назначения делятся условно на три основных вида:

- 1) конструктивные способы, связанные с применением конструктивных материалов, стойких в данной агрессивной рабочей среде;
- 2) активные способы, предусматривающие применение средств снижения агрессивности рабочей среды на конкретном участке защищаемой поверхности;
- 3) пассивные способы, предполагающие создание защитного непроницаемого барьера на защищаемой поверхности оборудования от воздействия агрессивной рабочей среды.

Конструктивные способы защиты от опасных производственных факторов применительно к рассматриваемому в данной статье предмету деятельности предполагают изготовление оборудования из коррозионно-стойких композиционных материалов. Критерием выбора композиционных материалов может служить фактор оптимизации

Таблица. Способы нанесения футеровки

№	Способ нанесения футеровки	Назначение	Недостатки	Преимущества
1.	Мокрое ламинирование	<ul style="list-style-type: none"> <li>• поверхности любой пространственной конфигурации (плоские, сферические, цилиндрические и пр.);</li> <li>• работа «по месту»</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• опасная работа как по пожарным, так и санитарным требованиям</li> <li>• высокое влияние человеческого фактора</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• минимум специального инструмента и оснастки;</li> <li>• возможность нанесения любого вида защитного покрытия на месте (химстойкое, износостойкое, теплостойкое и пр.);</li> <li>• любая поверхность</li> </ul>
2.	Футеровка листовым композитом	<ul style="list-style-type: none"> <li>• плоские поверхности</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• только плоские поверхности</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• хорошие производственные условия ведения работ;</li> <li>• гарантированное качество защиты;</li> <li>• производительный (по сравнению с 1-м способом работ)</li> </ul>
3.	Комбинированный способ футеровки («мокрое» ламинирование + листовый композит)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• для крупного, объемного оборудования</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• отсутствие производственного опыта по данному способу</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• достоинства 1-го и 2-го способов</li> </ul>
4.	Способ объемной футеровки емкостного оборудования и труб	<ul style="list-style-type: none"> <li>• футеровка труб (внутренняя);</li> <li>• футеровка емкостного оборудования (баки, цистерны, мешалки и пр.);</li> <li>• футеровка воздухопроводов, газоходов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• не выявлено</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• получение надежного, эффективного и качественного покрытия труб любого диаметра, сечения (в том числе профильного)</li> </ul>
5.	Центрбежное литье	<ul style="list-style-type: none"> <li>• для футеровки износостойким полимербетоном труб и газоходов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• только цеховое производство ограниченных по длине отрезков труб</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• износ- (тепло-, огне- и пр.) стойкое покрытие по толщине меньше, чем футеровка каменным литьем, кирпичом или керамикой</li> </ul>
6.	Футеровка полимербетоном «по месту» (торкретирование)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• износостойкие (термостойкие) покрытия</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• человеческий фактор;</li> <li>• узкая область применения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• создание износостойких покрытий «по месту» набрызгом или наливом</li> </ul>
7.	Ремонтные технологии футеровки	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ремонтные работы</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• нет регламентов, нормативов, кадров</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• возможность качественного ремонта и модернизации технологического оборудования</li> </ul>
8.	Футеровка «стакан в стакане»	<ul style="list-style-type: none"> <li>• быстрое восстановление работоспособности аварийного оборудования</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• необходимо иметь запас изделий, обеспечив их хранение;</li> <li>• применимо для ограниченного числа изделий</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• быстрое решение проблем ремонта</li> </ul>

соотношения «цена/качество», где под параметром цены следует подразумевать стоимость основных составляющих композита (связующее, армирующие материалы, наполнители), затраты на изготовление, эксплуатацию, обслуживание и ремонт. А под параметром качества прежде всего следует понимать совокупность основных эксплуатационных характеристик оборудования (надежность, срок службы, безопасность работы, производительность и другие параметры, важные для каждого конкретного вида изделия).

Изделия из коррозионно-стойких композитов с термореактивной матрицей из органических смол любого технического назначения

можно изготавливать либо из стекло- (базальто-, угле-, органические и пр.) пластиков различными технологическими способами, либо из дисперсно- (зернисто-, нано-) наполненных материалов типа полимербетонов, либо из премиксов по технологии прямого прессования (ВМС). Премиксы, состоящие из связующего, армирующих материалов и наполнителей, служат промежуточным звеном между чистыми стеклопластиковыми и дисперсно-наполненными композитами, поэтому мы их выделили в самостоятельную группу коррозионно-стойких деталей.

Важнейшим компонентом коррозионно-стойкого композита, определяющим такие его свой-

ства, как химстойкость, влагонепроницаемость, термостойкость, биостойкость и др., является матрица композита (связующее), представляющая собой различные виды органических смол. Наиболее распространенными типами смол, ранжированными по функции повышения химической стойкости и физико-механических характеристик, являются:

- 1) полиэфирные смолы (ортофталевые, изофталевые, терефталевые, винилэфирные);
- 2) фенол-формальдегидные смолы;
- 3) кремнийорганические смолы;
- 4) эпоксидные (модифицированные эпоксидные) смолы.

Выбор типа связующего является важной научно-практической за-

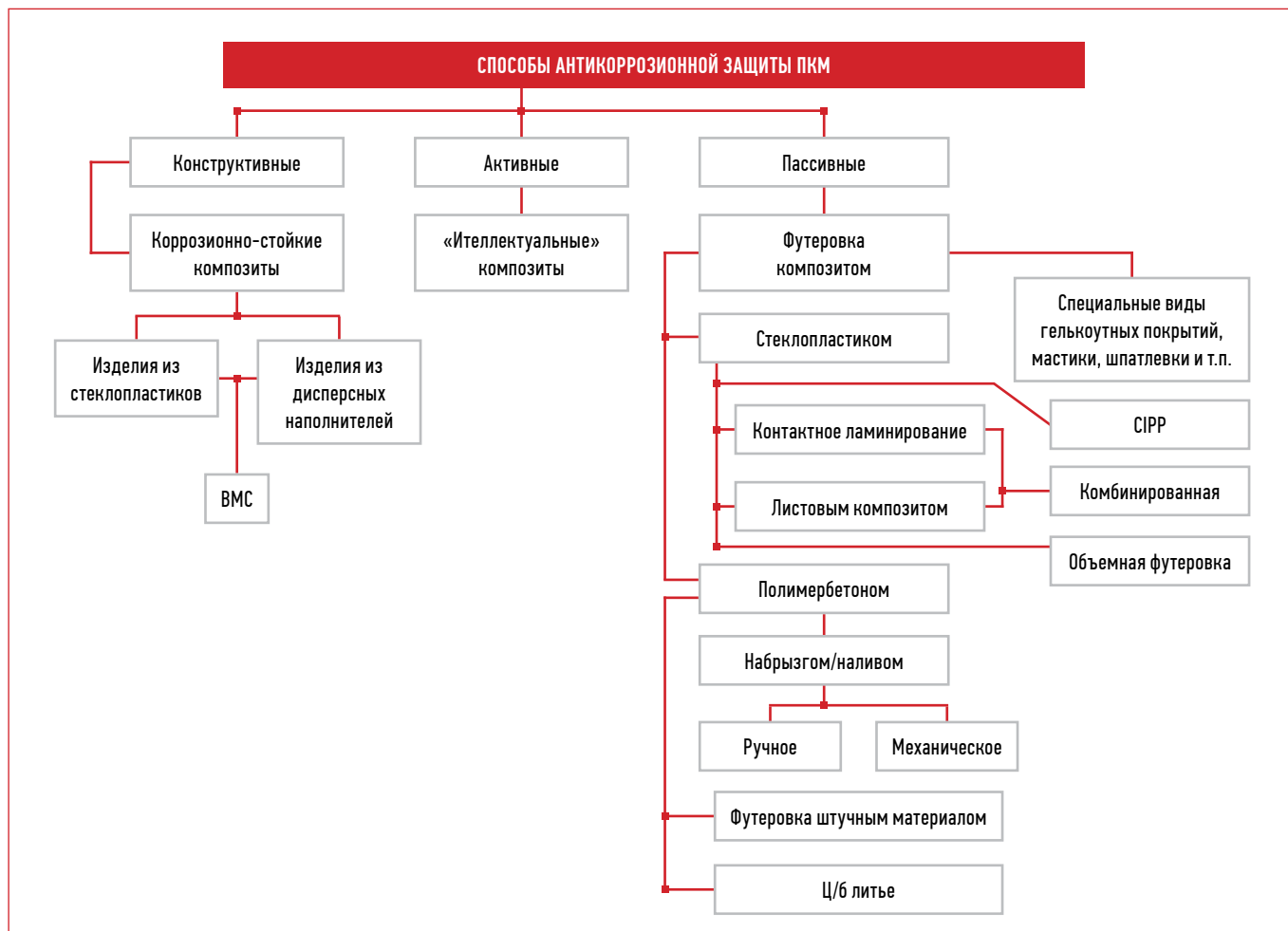


Рис. 1. Способы антикоррозионной защиты ПКМ

дачей, во многом определяющей долговременные свойства композиционного изделия, и осуществляется на основании рекомендаций фирм – изготовителей смол, опыта производителя коррозионно-стойкого оборудования, лабораторных исследований и анализа опыта эксплуатации оборудования в схожих производственных средах.

Вид армирующего материала главным образом определяет физико-механические свойства композита (прочность, вибростойкость, стойкость к действию ударных нагрузок и т.п.). Многообразие видов армирующих материалов открывает перед изготовителем широкие возможности по моделированию конструкции изготавливаемого изделия с различными прочностными характеристиками, не уступающими

ми и превосходящими аналогичные показатели металлов.

Наполнители, вводимые в матрицу композита до ее отверждения, предназначены для придания изделию дополнительных свойств, например таких, как: абразивостойкость, триботехнические параметры, электропроводность, биостойкость, огнестойкость и др. Целесообразность применения изделий с полимерной матрицей и наполнителями в виде фракционированных дисперсных наполнителей органического и неорганического происхождения (так называемых полимербетонов) в виде элементов строительных конструкций, фундаментов технологического оборудования, переливных лотков, желобов, отстойников, бассейнов и т.п. определяется их более высокими физико-механическими

характеристиками и химической стойкостью, чем аналогичные изделия из обычного бетона.

Способы производства изделий из композиционных материалов производственно-технического назначения перечислены в [1].

Под понятием «интеллектуального» композита мы понимаем класс конструкционных материалов, способных к самодиагностированию, самоадаптации и самовосстановлению. Эти композиты должны уметь распознавать возникающие эксплуатационные угрозы (сенсорная функция), анализировать их и принимать самостоятельные или командные решения (процессорная функция), а также возбуждать и осуществлять необходимое противодействие внешней негативной реакции (исполнительная функция).

К сожалению, в настоящее время не существует композитов, которые бы отвечали всем перечисленным требованиям. Однако поэтапно могут быть решены, например, задачи по созданию материалов, информирующих о своем состоянии, о приближении эксплуатационных нагрузок к предельно допустимым, о трещинообразовании, химической коррозии, повышенном водопоглощении и т.д. Важно, чтобы «интеллектуальная» составляющая композита органически входила в его структуру и не ухудшала потребительские качества изделия.

### ИЗ ПАССИВНЫХ СПОСОБОВ АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ МЫ ВЫДЕЛИЛИ ДВА ОСНОВНЫХ:

- специальные виды защитных покрытий (гелькоаты, мастики, шпатлевки и т.п.);
- футеровка композиционными материалами.

Гелькоатные, мастичные, шпатлевочные и другие аналогичные виды защитных покрытий на основе коротковолокнистых, дисперсно- (нано-) наполненных композиционных материалов создают на поверхности объекта защиты достаточно тонкую защитную пленку, способную обеспечить химическую, абразивную, огнестойкую, биологическую стойкость изделия в ограниченном промежутке времени. Достоинствами этой группы материалов являются минимальные трудозатраты и экономическая выгода, недостатки же характерны для всех видов пленочных покрытий.

На рисунке 2 представлена обобщенная схема применимости различных видов защитных покрытий в зависимости от условий эксплуатации и среднего срока службы покрытий.

«Мягкие» условия эксплуатации – это промышленная атмосфера, технические среды с температурой эксплуатации от  $-40$  до  $+40$  °С, pH 4÷7.



Рис. 2. Применение различных видов защитных покрытий в зависимости от условий эксплуатации и среднего срока службы покрытий

«Средние» – температура рабочей среды до  $+100$  °С, pH 3÷8.

«Жесткие» – температура более  $+100$  °С, pH 1÷14, наличие абразивного износа, кавитационные явления, нестабильный рабочий режим. Границы применимости, конечно, условные, поскольку понятно, что футерованный плиткой объект в «мягких» условиях простоит и 30, и 50 лет. Однако этот метод защиты предназначен для «жестких» условий, в которых, как правило, более 10 лет защита не стоит.

### ФУТЕРОВКА СПЕЦИАЛЬНЫМИ КОМПОЗИТАМИ ПРЕДНАЗНАЧЕНА:

- для повышения эксплуатационных параметров производственного оборудования (надежность, долговечность, эффективность, производительность и т.д.) путем создания стойкого многофункционального барьера на поверхности изделий, защищающего от воздействия агрессивных рабочих сред;
- для снижения стоимости оборудования за счет замены химстойких марок стали и дорогостоящих металлов (титан, медь, алюминий и др.) на обычные стали, футерованные специальным композитом;
- для оперативного решения вопросов технического обслуживания и ремонтов технологического

оборудования, а также безопасного ведения ремонтно-восстановительных работ;

• для придания новых эксплуатационных свойств действующему оборудованию при его модернизации или перепрофилировании. В настоящее время защита оборудования, эксплуатируемого в агрессивной рабочей среде (а это практически все промышленное оборудование и различные технологические системы), осуществляется следующими способами:

- изготовление оборудования из специальных марок стали;
- защита ЛКМ;
- футеровка листовым пластиком (полиэтилен, фторопласт, винилпласт и др.);
- гуммирование резиной;
- футеровка штучными изделиями (каменное литье, кирпич, плитка и т.п.).

### ПРЕИМУЩЕСТВА ФУТЕРОВКИ КОМПОЗИТАМИ ЗАКЛЮЧАЮТСЯ В СЛЕДУЮЩЕМ:

- а) высокая удар-, вибропрочность защитной системы;
- б) высокая химстойкость, износостойкость (био-, тепло- и т.д.) футеровочного покрытия;
- в) возможность защиты сложных пространственных конструкций любой формы;

г) возможность ведения защитных работ «по месту»;

д) отсутствие сварных швов и стыков в защитном покрытии.

Кроме того, каждый из существующих способов защиты решает достаточно узкий спектр проблем, связанных с обеспечением надежной работы оборудования в агрессивной среде. На практике же мы имеем дело с комплексом негативных факторов, воздействующих на производственное оборудование: например, с химической агрессивной средой и абразивным износом или абразивным износом и высокой температурой и т.п. Только композиты способны обеспечить комплексную защиту в широком диапазоне агрессивных сред.

Большие возможности эффективной защиты технологического оборудования композитами в том числе объясняются наличием различных адаптированных к конкретным условиям проведения работ способам нанесения футеровочных покрытий. В таблице приведены данные по известным на сегодняшний день способам футеровки, в т.ч. разработанным в ООО СКБ «Мысль».

Теме защитных футеровочных покрытий посвящен большой цикл работ [3, 4, 5, 6 и др.]. Контактное («мокрое») ламинирование – это нанесение непосредственно на защищаемую поверхность пропитанного термореактивной смолой армирующего материала толщиной не менее 2,5–3 мм [7]. Достоинства способа – возможность нанесения надежного и долговременного футеровочного покрытия на поверхности любой пространственной конфигурации (прямолинейные, сферические, криволинейные и др.). Недостатки – человеческий фактор, трудозатраты и необходимость обеспечения безопасных условий работы, особенно в замкнутых объемах.

Футеровка листовым композитом – способ футеровки листовым специальным композиционным

материалом преимущественно прямолинейных поверхностей от воздействия опасных производственных факторов [8]. Достоинства способа заключаются в снижении (по сравнению с вышеописанным способом контактной футеровки) трудозатрат, повышении производительности работ и качества защиты. Недостатки – защита только прямолинейных поверхностей.

Комбинированный способ защиты заключается в сочетании способов контактной футеровки и футеровки листовым композитом.

Технология CIPR предназначена для ремонта и восстановления изношенных трубопроводов методом футеровки внутренней поверхности специальным, пропитанным термореактивным связующим, рукавом из армирующих материалов, протягиваемым в трубу и принимающим ее форму за счет подачи внутрь рукава горячих пара или воды, обеспечивающих полимеризацию связующего.

Объемная футеровка [9] – способ защиты оборудования, к которому по техническим причинам (стесненные либо опасные условия и т.п.) нельзя применить известные способы защиты от воздействия агрессивной рабочей среды. В настоящее время данный способ проходит опытно-промышленные испытания в ООО СКБ «Мысль».

Футеровка полимербетоном целесообразна для защиты технологического оборудования и строительных конструкций от абразивного износа, высоких температур, повышения химстойкости строительных сооружений и т.п. Жидкий полимербетон можно наносить ручным набрызгом или механическим способом (торкретированием) с последующим разглаживанием и уплотнением нанесенного слоя.

Футеровка штучным материалом отличается от общепринятого способа защиты тем, что предусматривает применение штучных изделий (плиток с различными защитными

функциями), выполненных из композиционных материалов [10]. Преимущества предлагаемого способа футеровки заключаются прежде всего в снижении трудоемкости работ и за счет меньшей массы – снижение нагрузок на защищаемое оборудование.

Центробежное литье – классический способ нанесения футеровки, как правило, из дисперсно-наполненного композита на внутреннюю поверхность труб, выполняемую в цеховых условиях на специальном заливочном оборудовании.

#### **ФУТЕРОВКА КОМПОЗИТАМИ ДАЕТ СУЩЕСТВЕННЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕД ДРУГИМИ СПОСОБАМИ ЗАЩИТЫ, ПОСКОЛЬКУ ПОЗВОЛЯЕТ:**

- защищать оборудование в широком диапазоне агрессивных рабочих сред;
- защищать сложные объемные поверхности (шарообразные, с «поднутрениями» и т.п.);
- футеровать присоединенные элементы конструкции (штуцера, каналы, патрубки и т.д.);
- гибкость «мокрого» ламината компенсирует неровности поверхности изделия, что позволяет ликвидировать зазоры между изделием и футеровочным слоем, избегая подпленочной коррозии;
- менять толщину футеровочного слоя в зависимости от нагруженности изделия в том или ином месте конструкции;
- комбинировать слои футеровки, используя различные виды связующего и типы наполнителей.

#### **И, НАКОНЕЦ, СЛЕДУЕТ ОТМЕТИТЬ ТАКИЕ НЕСОМНЕННЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА КОМПОЗИТОВ, КАК:**

- 1) высокая ударо-, вибропрочность, позволяющая воспринимать динамические нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации изделия;
- 2) большой диапазон рабочих температур без потери защитных свойств защитного покрытия;



3) ремонтпригодность стеклопластиков, позволяющая восстанавливать поврежденные участки без демонтажа всего покрытия;

4) достаточно высокая прочность и химстойкость стеклопластиков позволяет во многих случаях отказаться от применения специальных химстойких материалов (нержавеющая сталь, титан и т.д.) и уменьшить массу конструкции за счет уменьшения толщины подложки (каркаса) изделия;

5) органические смолы, являющиеся связующими в стеклопла-

стиках, обладают отличной совместимостью с большинством химстойких лакокрасочных материалов и другими типами защитных материалов, например резинами, что позволяет проводить комплексную защиту технологического оборудования с применением разных видов защитных систем, материалов, технологий и т.п., в зависимости от условий эксплуатации, требуемого уровня защиты, профессиональной подготовки рабочих и других технологических параметров.

Таким образом, рассматривая совокупность признаков, определяющих целесообразность применения того или иного вида защитной системы, для изделий, эксплуатируемых в опасных производственных условиях, следует констатировать, что на данный момент времени футеровка специальными композиционными материалами является наиболее предпочтительным видом футеровки ввиду своей универсальности, отличной химстойкости, технологичности и наличия явных эксплуатационных преимуществ.

#### Литература:

1. Холодников Ю.В. Промышленные композиты // Композитный мир. 2012. № 5. С. 48–54.
2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технологии: учебн. пособие / Под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 560 с., ил.
3. Холодников Ю.В. Новые принципы организации защиты технологического оборудования от воздействия агрессивной рабочей среды // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 1. С. 41–43.
4. Холодников Ю.В., Альшиц Л.И. Футеровка композитами как направление развития отрасли // Композитный мир. 2012. № 1. С. 50–53.
5. Холодников Ю.В. Защита оборудования композиционными материалами // Практика противокоррозионной защиты. 2011. № 1. С. 14–18.
6. Холодников Ю.В. Футеровка оборудования композиционными материалами // Новые промышленные технологии. 2010. № 5. С. 3–5.
7. Патент РФ № 2365678 «Способ получения защитного футеровочного покрытия», опубл. 27.08.2009. Патентообладатель ООО СКБ «Мысль».
8. Патент РФ на полезную модель № 92383 «Лист футеровочный слоистый», опубл. 20.04.2010. Патентообладатель ООО СКБ «Мысль».
9. Патент РФ № 2473424 «Способ изготовления объемных изделий из композитов», опубл. 27.01.2013. Патентообладатель ООО СКБ «Мысль».
10. ТУ 2292-004-2016038-2012 Изделия из полимербетона специального назначения (разр. ООО СКБ «Мысль»).



Антиадгезионная упаковка  
для полимерно-битумных материалов  
отечественного производства

[www.alekspack.ru](http://www.alekspack.ru)

Телефон:

**8 (800) 250-40-76**

152006, Ярославская обл.,  
г. Переславль-Залесский