

УДК 667.6

ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ ОПТИКОВОЛОКОННЫХ СИСТЕМ

д.т.н., профессор О. Э. Бабкин¹, М. Ю. Власов², М. В. Буралкин²,
к.т.н., доцент Л. А. Бабкина³, к.т.н. О. С. Айкашева⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, Санкт-Петербург, РФ
e-mail: obabkin@rambler.ru

² АО «Оптиковолокonné системы», Саранск, РФ

³ ООО «S&H Technology», Санкт-Петербург, РФ

⁴ PPG Industries, Амстердам, Нидерланды

Производство оптического волокна запущено в Саранске на АО «Оптиковолокonné системы». В статье представлены результаты работы в рамках программы импортозамещения отечественных полимерных покрытий ультрафиолетового отверждения. На основе четырех схем защитного покрытия для оптического волокна при скоростях нанесения 1200–1600 м/мин определена оптимальная схема покрытия и рецептуры грунта и лака.

Инфокоммуникационные системы являются неотъемлемой составляющей современного общества. Они постоянно совершенствуются, и на современном этапе включают в себя уже не только тракты приема и передачи радиосигналов, но и тракты оптиковолоконных систем. Волоконная оптика позволяет реализовать потенциально неограниченные возможности высокочастотного оптического излучения и обеспечить максимально высокую скорость передачи информации — современные волоконно-оптические системы сейчас обеспечивают скорость передачи информации до нескольких Гбит/с, что значительно превышает скорость в электрических системах передачи сигналов, а в перспективе скорость передачи может быть доведена до Тбит/с. Такая скорость в первую очередь обеспечивается преимущественными характеристиками оптических волноводов: наличием широкой полосы пропускания (до 10¹² Гц), малыми потерями мощности передаваемого сигнала (для волоконно-оптических линий расстояние между генераторами увеличено до 120 км), нечувствительностью к внешним электромагнитным помехам, низким уровнем шумов. К тому же оптиковолокonné кабели сами не излучают

электромагнитные волны в радиодиапазоне частот и, соответственно, не создают радиопомех, а при отсутствии доступа к кабелю практически невозможен несанкционированный перехват информации, что обеспечивает безопасность связи.

Эти и сопутствующие им преимущества волоконных оптических систем для инфокоммуникации способствовали их быстрому внедрению во всем мире. Пока на мировом рынке производства оптического волокна лидерские позиции занимают США и Китай, прочно внедрившиеся и на российском рынке. Однако политическая ситуация в мире, приведшая к санкционным действиям ряда стран по отношению к российской экономике, вынудила отечественных производителей искать новые пути развития рынка. Принятая в Российской Федерации стратегия импортозамещения в производственном секторе экономики дала все основания для развития отечественного производства оптического кабеля.

Производство отечественного оптического волокна для волоконных кабелей в настоящее время налажено в Саранске (Республика Мордовия), на АО «Оптиковолокonné системы». Завод был запущен в 2015 г., и сейчас это крупное производство (летом 2019 г. выпуск дошел до 4 млн км), статус продукции которого подтвержден Минпромторгом РФ, а сама продукция протестирована ПАО «Ростелеком» и успешно прошла сертификацию.

Стоит отметить, что кажущаяся простота изготовления оптического волновода, состоящая из вытяжки нити стекловолокна и покрытия ее защитной оболочкой, обманчива: существует ряд технологических нюансов, определяющих этот

процесс как высокотехнологичное и наукоемкое производство, требующее серьезного комплексного подхода на всех этапах изготовления [1–4].

В условиях производственного нанесения на нить стекловолокна грунта и лака ОТК предъявляет определенные требования:

1. Экспресс-контроль центричности и округлости оптического волокна, которые инструментально определяются при видимости разницы коэффициентов рефракции грунта и лака не менее чем на 0,030.
2. Полимерное покрытие (непрозрачная оболочка) должно иметь хорошую адгезию к волокну и при этом легко сниматься при монтаже линий, с усилием 1–3 Н, не оставляя на волокне следов покрытия.
3. При испытаниях на разрыв, как показали многочисленные исследования, форма кривой не зависит от скорости приложения нагрузки, зависимости должны быть линейными, в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60793-1-33-2014.
4. Толщина покрытий грунта и лака, нанесенных по технологии «мокрый по мокрому», должна быть одинаковой (60–65 мкм).

В работе рассмотрены схемы полимерных покрытий УФ-отверждения с учетом этих требований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приготовление фотополимеризующихся композиций (ФПК) для грунтовых и лаковых покрытий осуществляли в диссоolverе смешением активного разбавителя, пленкообразователя и фотоинициаторов. Отверждение покрытий проводили на установке ОРК-21М1 с ртутной лампой высокого давления ДРТ-400 (интенсивность излучения: НА = 43–62 мВт/см², НВ = 40–52 мВт/см², НС = 6–9,2 мВт/см², НV = 33–45 мВт/см²). Реакционную способность композиций оценивали по результатам измерения твердости покрытий толщиной 30 мкм на маятниковом приборе ТМЛ-2124 (по ГОСТ 5233-89). Динамическую вязкость композиций определяли на ротационном вискозиметре Brookfield-DVE (по ГОСТ 25271-93). Коэффициент рефракции определяли для жидких и отвержденных композиций на установке «РК 2400 (Fiber Geometry Systems)» по ГОСТ 19927-74 и ГОСТ 18995-73. Предел прочности при растяжении и относительное удлинение определяли по ГОСТ 18299-72, адгезию — по ГОСТ 32299-13.

В табл. 1 представлены исходные компоненты, отобранные в рецептуры ФПК грунтов и лаков с учетом предыдущих исследований [5–10], сами рецептуры композиций представлены в табл. 2.

Таблица 1. Рецептура прозрачного бесцветного ЛКМ на основе акрилата

№	Наименование сырьевых компонентов	Молекулярная масса, г/моль	Функциональность	Динамическая вязкость, мПа·с, 25 °С	Коэффициент преломления
<i>Олигомеры</i>					
1	Ненасыщенный алифатический уретанакрилат		2	90 000	
2	Алифатический уретанакрилат		2	2500–4000	
3	Модифицированный эпоксиакрилат		2	400–1300	
4	Ненасыщенный алифатический уретанакрилат		2	60 000	
5	Алифатический уретанакрилат		2	15 000–25 000	
6	Алифатический уретанакрилат		2	115 000	
7	Дифункциональная кислота метакрилат		1	1000–1300	
<i>Мономеры</i>					
8	4-бутилциклогексилакрилат	204	1		1,470
9	Изоборнилметакрилат	222	1	8,5	1,477
10	О-фенилфеноксипропилакрилат	268	1	135	1,575
11	2-феноксипропилакрилат	192	1	10	1,517
<i>Фотоинициаторы</i>					
12	2,4,6-триметилбензоилфенилпропионилфосфиноксид				
13	2-гидрокси-2-метилпропионилфенилпропанон				

Таблица 2. Состав композиций грунтов и лаков

Компоненты композиций (см. табл. 1)	Первичное покрытие — грунт				Вторичное покрытие — лак	
	грунт 1	грунт 2	грунт 3	грунт 4	лак 1	лак 2
1	65	—	65	32,5	—	—
2	—	—	—	—	—	53
3	—	—	—	—	10	10
4	—	—	—	—	53	—
5	—	—	—	—	5	—
6	—	62	—	31	—	—
7	—	3	—	1,5	—	—
8	—	30	—	15	—	—
9	—	—	10	5	—	—
10	—	—	—	—	22	27
11	30	—	20	10	—	—
12	5	5	5	5	7	7
13	—	—	—	—	3	3

Технические характеристики грунтовых и лаковых покрытий существенно различаются. Грунт — эластичное покрытие с отрицательной температурой стеклования [5, 6], а лак — твердое и прочное покрытие с температурой стеклования +50...+60 °С [7].

В таблице 3 приведены технические характеристики полученных грунтов и лаков. Наглядно видна разница покрытий по твердости, пределу прочности и относительному удлинению при растяжении.

Таблица 3. Технические характеристики первичного (грунт) и вторичного (лак) покрытия

№	Наименование показателей	Первичное покрытие				Вторичное покрытие	
		грунт 1	грунт 2	грунт 3	грунт 4	лак 1	лак 2
1	Твердость пленки по маятниковому прибору типа ТМЛ-2124 метод А, у.е.	0,04	0,04	0,04	0,04	0,46	0,59
2	Динамическая вязкость, мПа·с по прибору Brookfield RVDV-E, sp. 4/12 rpm при 20 °С	7770	2640	7000	4300	10 880	13 200
3	Динамическая вязкость, мПа·с по прибору Brookfield RVDV-E, sp. 4/20 rpm при 50 °С	1680	—	1360	950	708	870
4	Время отверждения под ртутной лампой высокого давления с интенсивностью излучения мВт/см ² : Н _А = 43–62; Н _В = 40–52; Н _С = 6–9,2; Н _У = 33–45	15	15	15	15	15	15
5	Плотность при 20 °С, г/см ²	1,15	1,04	1,15	1,10	1,15	1,12
6	Коэффициент преломления отвержденного покрытия при 20 °С	1,5010	1,5015	1,5090	1,5050	1,5440	1,5400
7	Коэффициент преломления жидкой композиции при 20 °С	1,4965	1,4870	1,4915	1,4890	1,5205	1,5200
8	Относительное удлинение (эластичность), %	—	—	—	—	6,0	3,5
9	Предел прочности при растяжении, МПа	—	—	—	—	35,9	27,7

Анализ коэффициентов рефракции грунтов и лаков, а также их совместимость при нанесении технологией «мокрый по мокрому» определили 4 схемы покрытия, которые приведены в таблице 4.

Таблица 4. Системы для нанесения покрытий на оптическое волокно

№ схемы	Первичное покрытие — грунт	Вторичное покрытие — лак
1	1	1
2	2	2
3	3	2
4	4	2

Совместимость грунта и лака определяли по внешнему виду двухслойного покрытия: на стеклянную пластину наносили слой грунтовочной композиции толщиной 60 мкм и покрывали слоем лаковой композиции такой же толщины, а затем эту схему отверждали.

На рисунках 1 и 2 приведены зависимости динамической вязкости компонентов схемы двухслойного покрытия от температуры (это необходимая зависимость при промышленном нанесении методом «мокрый по мокрому»). При соотношении вязкостей грунт : лак ~2:1 получены одинаковые толщины отвержденных покрытий грунта и лака, что в итоге определяет защитную функцию полимерного покрытия оптического волокна [5].

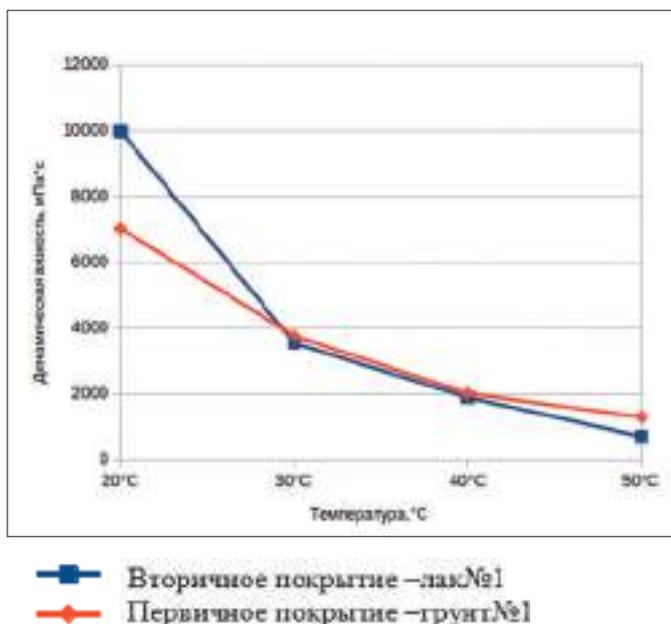


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости от температуры для схемы покрытий №1

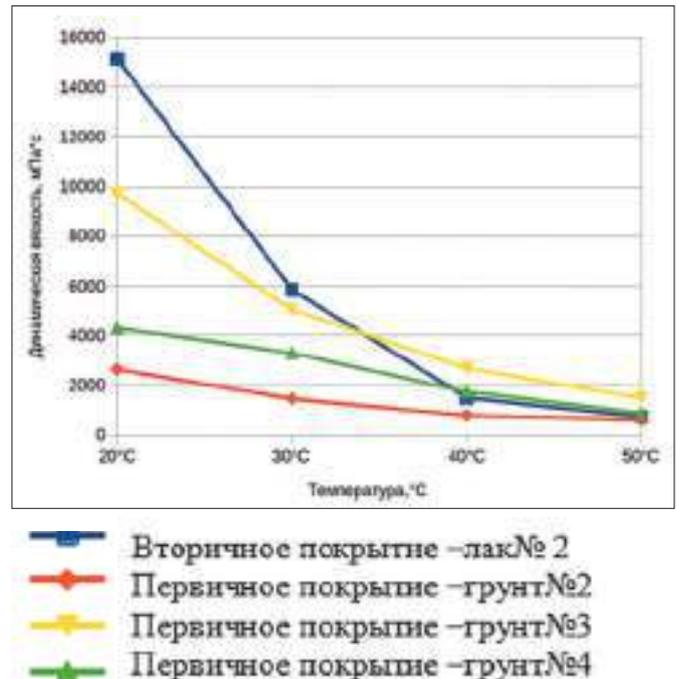


Рис. 2. Зависимость динамической вязкости от температуры для схем покрытий №2,3,4

Рассмотренные схемы полимерных покрытий наносили на производственной линии АО «Оптиковолокно» в интервале скоростей 1200–1600 м/мин и тестировали оптическое волокно по стандартным методикам:

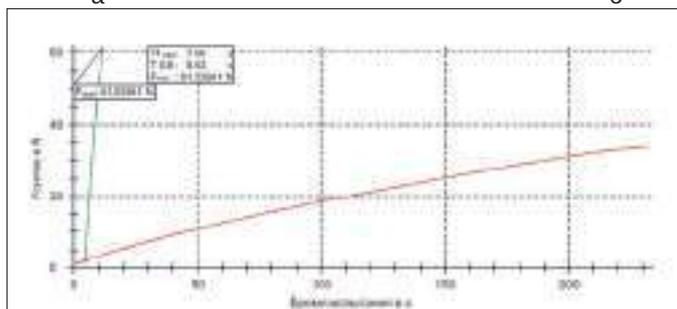
- испытания оптического волокна на разрыв по ГОСТ Р МЭК 60793-1-31-2010;
- определение усилия снятия защитного полимерного покрытия по ГОСТ Р МЭК 60793-1-32-2010;
- определение стойкости к коррозии в напряженном состоянии (динамического параметра усталости) по ГОСТ Р МЭК 60793-1-33-2014;
- определение округлости и концентричности оптического волокна при условии видимости грунтовочного и лакового покрытий на установке «PK 2400 (Fiber Geometry Systems)» (Photon Kinetics Inc., USA) по ГОСТ Р МЭК 60793-1-21-2012 (метод А. Распределение света при боковой проекции).

На рисунке 3 представлены результаты по определению прочности на разрыв при различных скоростях сдвиговых усилий 10 и 500 м/мин.

На рисунке 4 представлены результаты по определению усилия снятия защитного полимерного покрытия, согласно ГОСТ Р МЭК 60793-1-32-2010.

Все четыре схемы защитных покрытий по оптическому волокну позволяли тестировать геометрию покрытия (грунт, лак) на установке «PK 2400 (Fiber Geometry Systems)».

Схема № 1
а



б

Схема № 1

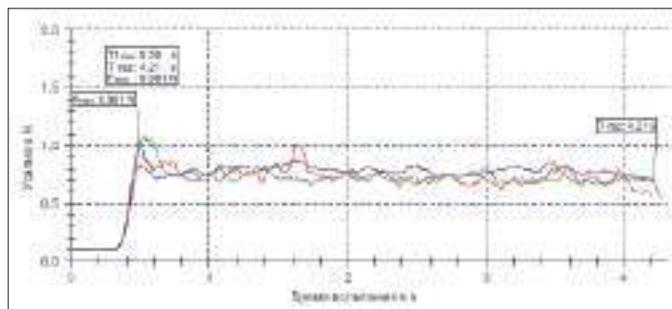
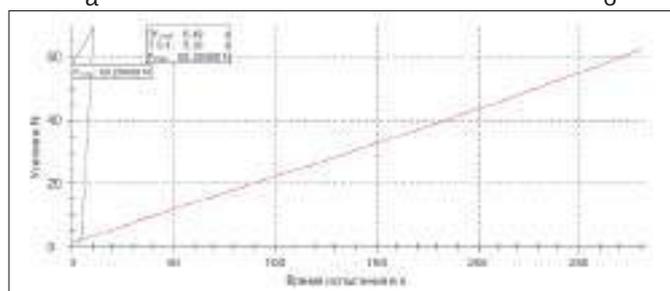


Схема № 2
а



б

Схема № 2

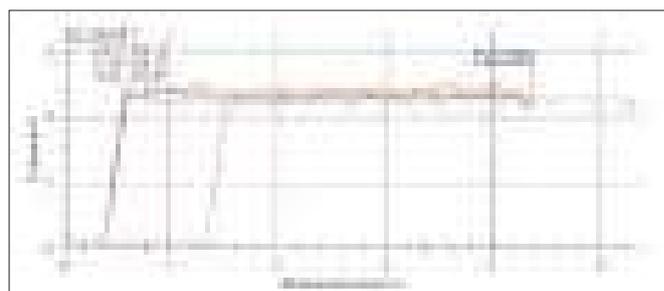
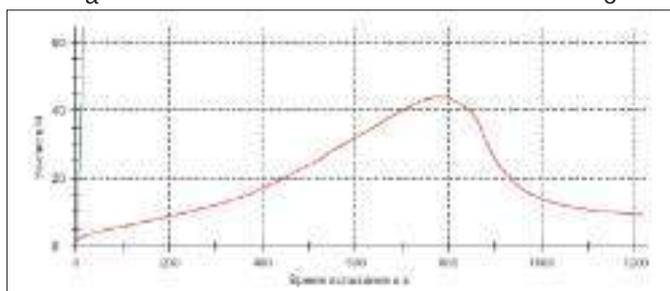


Схема № 3
а



б

Схема № 3

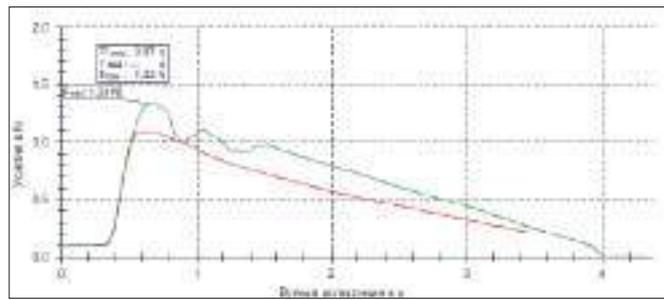
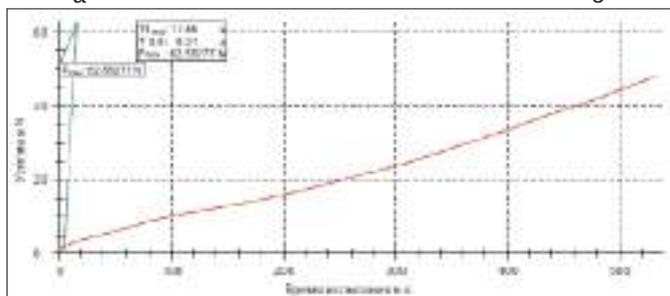


Схема № 4
а



б

Схема № 4

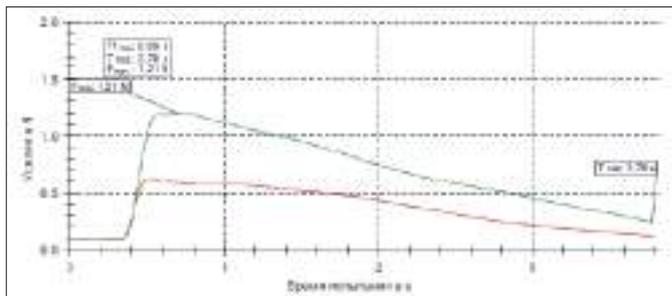


Рис. 3. Прочность на разрыв полимерного покрытия с оптического волокна для схем покрытий №1,2,3,4 при скорости сдвиговых усилий: б-10 м/мин; а-500 м/мин

Рис. 4. Усилия снятия полимерного покрытия с оптического волокна для схем покрытий №1,2,3,4

По результатам испытания оптического волокна на разрыв и определению стойкости к коррозии в напряженном состоянии (динамического параметра усталости) удовлетворительными признаны схемы покрытий № 1, 2 и 4.

По результатам определения усилия снятия защитного полимерного покрытия по ГОСТ Р МЭК 60793-1-32-2010 удовлетворительный результат показала схема покрытия № 2. Схема покрытия № 1 имеет недостаточную адгезионную прочность (определенное усилие снятия

меньше 1 Н), что объясняется отсутствием адгезионной добавки в рецептуре композиции грунта. Схемы покрытий № 3 и 4 при анализе усилия снятия покрытия показали хорошую адгезионную прочность, но после испытания на волокне наблюдали фрагменты покрытия, что и объясняет характер кривых на рис. 4.

На основе проведенных промышленных испытаний по нанесению полимерных покрытий на оптическое волокно в качестве оптимальной определена схема покрытия № 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Айкашева О.С., Ильина В.В. Принципы составления рецептур, определяющих свойства фотополимерных покрытий и изделий // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета). — 2019. — № 48 (74). — С. 63–67.
2. Babkin O.E., Zhdanova A.V. The effect of oligomers and monomers on the properties of UV-curable adhesive for cold embossing of foil // Polymer Science. Series D. — 2016. — Vol. 9, N 3. — P. 260–266.
3. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Ильина В.В. Особенности технологии нанесения УФ-отверждаемых композиций на оптическое волокно // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2017. — № 12. — С. 12–15.
4. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Ильина В.В., Мелидина А.А. Проблемы адгезионной прочности толстослойных покрытий ультрафиолетового отверждения // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2018. — № 1–2. — С. 18–20.
5. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Андреева Н.А., Данилович Д.П. Характеристики фотополимерных покрытий оптоволоконных кабелей // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2018. — № 5. — С. 37–39.
6. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Айкашева О.С., Власов М.Ю., Ильина В.В. Фотополимеризующиеся активные разбавители в композициях ультрафиолетового отверждения // Промышленные покрытия. — 2020. — № 1–2. — С. 12–17.
7. Babkin O.E., Babkina L.A., Aikasheva O.S., Il'ina V.V. Photopolymeric coatings for fiber-optic cables // Fibre Chemistry. — 2019. — Vol. 50, N 6. — P. 499–503. <https://doi.org/10.1007/s10692-019-10019-2>.
8. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А. Отечественные композиции УФ-отверждения для оптического волокна // Промышленные покрытия. — 2017. — № 9–10. — С. 2–7.
9. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Ерофеев В.В., Арабей А.В. Индустриальные покрытия ультрафиолетового отверждения // Промышленные покрытия. — 2017. — № 3–4. — С. 22–27.
10. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Ильина В.В. Роль активных разбавителей жидких фотополимеризующихся композиций в регулировании свойств получаемых покрытий // Химическая технология. — 2016. — № 11. — С. 498–502.