

Ступенчатые сенсорные композиты для индикации силы сжатия при герметизации стыков

Александра Ю. Погиба	¹	pogiba.a@ya.ru	 0009-0008-6550-2892
Владислав Ю. Верещагин	¹	slavaver@ya.ru	 0000-0002-1344-4888
Александр П. Кондратов	¹	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

¹ Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, д. 38, г. Москва, 107023, Россия

Аннотация. Исследован цветопеременный эффект при термостимулируемой усадке комбинированного пакета металлизированных, термоусадочных и двуслоноориентированных пленок из термопластичных полимеров. Цветопеременный эффект возникает и может быть обнаружен лишь в поляризованном свете. В отсутствие поляризации света пакет линейно ориентированных термоусадочных и двуслоноориентированных пленок является прозрачным и бесцветным, а слой металлизированной пленки монохромным. Экспериментально установлено, что в процессе термостимулируемой усадки прозрачной линейно ориентированной пленки поливинилхлорида, обладающей двойным лучепреломлением коэффициент пропускания обычного и поляризованного света существенно различается, зависит от длины волны света и уровня внутренних напряжений в пленке. Это различие предложено использовать при изготовлении инновационного индикатора качества изоляции электрических контактов. В электротехнике существует необходимость «сглаживания» бросков напряженности электрического поля в области соединения кабелей и снижения трудоемкости процессов сборки пучка проводов. Разработке индикаторов и способов индикации (визуализации) сжимающих напряжений в области соединения проводов посвящено множество запатентованных технических решений, сочетающих использование механохромных полимерных композитов и электронных устройств. В настоящем исследовании показана возможность визуальной индикации внутренних напряжений, сжимающих контакты по цвету многослойной изоляции из металлизированных, термоусадочных и двуслоноориентированных пленок в поляризованном свете. Поляризованный свет, отраженный от зеркальной поверхности металлизированной пленки, обуславливает эффект плеохроизма (появление яркой цветной окраски) вследствие интерференции электромагнитных волн на тонких прозрачных полимерных пленках составляющих «пакет изоляции» со ступенчатым слоем. Ступенчатый слой формируется спиральной намоткой «внахлест» дихроичной двуслоноориентированной пленки полипропилена. В статье показан планируемый продуктовый результат исследований и приведен пример практического использования термоусадочных полимерных материалов в электротехнике. По спектрам отражения поляризованного света охарактеризован количественно переменный цвет многослойной изоляции с внешним слоем из пленки поливинилхлорида отечественного производства.

Ключевые слова: Полимерные покрытия, полипропилен, анизотропия, плеохроизм, двойное лучепреломление, координаты цвета, светлота, отражение света.

Step-by-step sensor composites for indicating the compression force during joint sealing

Aleksandra Y. Pogiba	¹	pogiba.a@ya.ru	 0009-0008-6550-2892
Vladislav Y. Vereshchagin	¹	slavaver@ya.ru	 0000-0002-1344-4888
Aleksandr P. Kondratov	¹	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

¹ Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russia.

Abstract. The color-changing effect during thermally stimulated shrinkage of a combined package of metallized, heat-shrinkable, and biaxially oriented films made of thermoplastic polymers has been studied. The color-changing effect occurs and can only be detected in polarized light. In the absence of light polarization, the package of linearly oriented heat-shrinkable and biaxially oriented dichroic films is transparent and colorless, and the metallized film layer is monochrome. It has been experimentally established that in the process of thermally stimulated shrinkage of a transparent linearly oriented polyvinyl chloride film with dichroism, the transmission coefficient of ordinary and polarized light differs significantly, depending on the wavelength of the light and the level of internal stresses in the film. It is proposed to use this difference in the manufacture of an innovative indicator of the insulation quality of electrical contacts. In electrical engineering, there is a need to "smooth out" the surges of electric field strength in the area of cable connection and reduce the complexity of the assembly of a bundle of wires. Many patented technical solutions combining the use of mechanochromic polymer composites and electronic devices have been devoted to the development of indicators and methods for indicating (visualizing) compressive stresses in the field of wire connection. The present study shows the possibility of visual indication of internal stresses compressing contacts by the color of multilayer insulation made of metallized, heat-shrinkable and biaxially oriented films in polarized light. Polarized light reflected from the mirror surface of the metallized film causes the pleochroism effect (the appearance of bright color) due to the interference of electromagnetic waves on thin transparent polymer films that make up the "insulation package" with a stepped layer. The stepped layer is formed by spiral overlapping of a dichroic biaxially oriented polypropylene film. The article shows the product result of optical research and provides an example of the practical use of heat-shrinkable polymer materials in electrical engineering. According to the reflection spectra of polarized light, the variable color of multilayer insulation with an upper layer of a polyvinyl chloride film of domestic production is quantitatively characterized.)

Keywords: Polymer coatings, polypropylene, anisotropy, pleochroism, birefringence, color coordinates, lightness, and light reflection.

Для цитирования

Погиба А.Ю., Верещагин В.Ю., Кондратов А.П. Ступенчатые сенсорные композиты для индикации силы сжатия при герметизации стыков // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 243–249. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-243-249

For citation

Pogiba A.Y., Vereshchagin V.Yu., Kondratov A.P. Step-by-step sensor composites for indicating the compression force during joint sealing. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 243–249. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-243-249

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В машиностроении, теплотехнике и промышленной энергетике, в частности, существует необходимость «сглаживания» бросков напряженности электрического поля в области соединения кабелей и снижения трудоемкости процессов сборки пучка проводов или герметизации стыков коммуникаций.

В патентных источниках описаны втулки из термопластичных материалов для соединения нескольких кабелей или иных коммуникаций, включающие гибкий лист, предназначенный для укладки вокруг кабельного соединения имеющий ряд продольных разрезов по направлению укладки соединения образующих «язычки». Сжатие при укладке листа вокруг кабельного соединения достигается перекрытием язычков. При этом разрезанная краевая часть листа зажимается вручную. Дополнительная обмотка стыка изоляционной лентой или его фиксация полимерной термоусадочной трубкой, обеспечивают необходимую прочность [1]. Для надежной герметизации предложено также использовать втулки с термоусадочными концевыми участками для соединения с соответствующими смежными торцевыми поверхностями трубчатых секций. Концевые термоусадочные участки должны быть выполнены заодно со средней частью и иметь относительно небольшую толщину стенки [2]. Термоусадочная трубка может быть выполнена из композиции сшитого радиацией полиолефина, способного менять цвет в зависимости от температуры для индикации нарушения электрических контактов и предупреждения аварийных ситуаций [3].

Таким образом частично решается задача визуализации качества соединения и герметизации стыков. Изменение цвета в известных технических решениях не всегда позволяет оценить силу сжатия, поэтому рядом исследователей продолжается разработка различных, в том числе оптических, датчиков силы сжатия. В патенте Японии [4] описаны сенсорные полимерные композиты, способ и устройство для оценки сжатия композиционного материала с электронным модулем обработки данных интенсивности оптического излучения, распространяющегося от источника оптического излучения к приемнику в среде деформируемого пористого или монолитного наполнителя методом оптической анизотропной диффузионной тензометрии. Интенсивность оптического излучения, распространяющегося в наполнителе, зависит от его светопрозрачности. В случае пористого наполнителя его светопрозрачность зависит не только от светопоглощения полимерного композита,

которое увеличивается за счет изменения плотности при деформации наполнителя, но и от направления деформации пор, которое приводит к анизотропному светорассеянию, вследствие чего изменяется средняя траектория света между источником и приемником оптического излучения. Учет параметров анизотропного изменения светорассеяния в среде пористого наполнителя в состоянии его деформации реализуется программными средствами в модуле обработки данных [5]. Известные запатентованные композиционные материалы и способы индикации силы сжатия при герметизации стыков основаны на использовании дорогостоящих ингредиентов и сложны в практической реализации.

Целью настоящего исследования является описание оптических свойств новых многослойных ступенчатых полимерных пленочных материалов и обоснование возможности их применения для индикации процесса сжатия термоусадкой, например, при герметизации стыков электрических проводов или коммуникаций.

Предмет исследования – плеохроизм при интерференции поляризованного света в многослойном пакете прозрачных бесцветных пленок из различных термопластов и его использование на примере герметизации стыков.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использованы:

Бесцветная прозрачная термоусадочная пленка поливинилхлорида (по ТУ 22.21.30–001–35639164–2019 производства ТД «Упак Трейд, Воронеж» толщиной 90 ± 5 мкм)

Бесцветная прозрачная биоксиально ориентированная пленка полипропилена (BOPP производства завода «Биакспен», Московская область, марки HGGW–40 толщиной 45 ± 5 мкм)

Металлизированная биоксиально ориентированная пленка полипропилена (BOPP производства завода «Биакспен» марки HMGW.M–20 толщиной 25 ± 5 мкм.)

Металлизированные самоклеющиеся ленты на основе пленки полипропилена с алюминиевым напылением марок Зубр, AVIORA, Unibob и Tesa ТУ 2245–001–45077247–2007)

Пленочные поляризаторы (NPF F1205DU (Япония), обеспечивающие степень поляризации света до 95,8%.)

Стекланные пластины – антибликовые поляризаторы (марка «HNNYKRAY» модель Wanbo T6 Max (КНР)

Полимерные поляризационные линзы для очков («Cantilen» POLARIZED (КНР).

Для демонстрации плеохроизма при интерференции поляризованного света в многослойном пакете прозрачных бесцветных пленок

и практического использования цветных эффектов при герметизации стыков коммуникаций собрались макеты термоусадочных втулок и лабораторный стенд для оптических измерений.

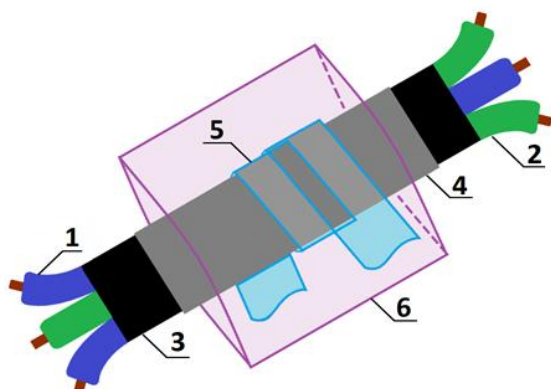


Рисунок 1. Схема укладки и расположения пленок при герметизации стыков: 1 и 2 – соединяемые провода, 3 – слой электроизоляции, 4 – слой материала отражающего свет, 5 – слой оптически активной полимерной пленки, 6 – термоусадочная пленка

Figure 1. Layout and arrangement of films during joint sealing: 1 and 2 – connected wires, 3 – electrical insulation layer, 4 – light-reflecting material layer, 5 – optically active polymer film layer, 6 – shrink film

Схема макета соединения электрических кабелей (1 и 2) с помощью прозрачной многослойной втулки, содержащей ступенчатый слой оптически активной в поляризованном свете пленки ВОРР (5), слоя изоляции со светоотражающей поверхностью (4) и внешнего термоусадочного слоя пленки поливинилхлорида (6) показана на рисунке 1.

Втулка показана в положении сборки до нагревания термоусадочной трубки и без поляризационного светофильтра, необходимого для цветной индикации процесса сжатия. Слои пленок расположенные поверх изоляции со светоотражающей поверхностью (4) бесцветны и прозрачны в обычном неполяризованном свете до и после нагревания для сжатия. «Цветными становятся» слои пленки ВОРР при наблюдении стыка в очках с поляризационными стеклами или при его освещении и фотографировании сквозь пленочные поляризаторы.

Процесс сборки макета стыка электрических кабелей (поз. 1 и 2 на рисунок 1) включает следующие операции. Концы электрических кабелей изолируют диэлектрическим материалом (поз. 3 на рисунок 1). Ленты, вырезанные из пленок полипропилена ВОРР обматываются поверх слоя металлизированной самоклеющейся пленки (поз. 4 на рисунок 1) в форме спирали внахлест с шагом 0,2–0,5 ширины лент для формирования ступенчатого оптически активного слоя (поз. 5 на рисунок 1). На ступенчатый оптически активный слой пленок полипропилена

ВОРР надевают термоусадочный рукав из пленки поливинилхлорида (поз. 6 на рисунок 1). Производят фотографирование сборки пленок сквозь пленочный поляризатор для фиксации цвета до сжатия.

Для исследования интерференции и определения зависимости цвета пакета пленок в поляризованном свете от силы сжатия собран лабораторный стенд для фотографирования и оптических измерений (рисунок 2). На стенде установлен спектрофотометр и/или фотокамера (поз. 5 на рисунок 2) с возможностью изменения угла наблюдения. Осуществляли фотографирование цветных эффектов, возникающих при отражении поляризованного света лампы (поз. 1 на рисунок 2) от зеркального слоя самоклеющихся пленки (поз. 4 на рисунок 2) в различных направлениях. Стабильная цветопередача во всем наборе данных обеспечена калибровкой цвета с использованием стандартизированной мишени X-Rite ColorChecker Passport, которая фотографировалась в начале каждого сеанса фотографирования. Объект для фотосъемки в отраженном потоке поляризованного света это – комбинация нескольких прозрачных полимерных пленок (ПВХ + ВОРР или ПВХ + ВОРР + ВОРР), проявляющая плеохроизм при размещении на различных отражающих поверхностях [6]. Все изображения были получены в условиях контролируемого освещения для поддержания постоянства в течение всей экспериментальной процедуры.

Обработка RAW-изображений производилась с помощью программного обеспечения Darktable с открытым исходным кодом, которое обеспечивает точное управление цветом и калибровку рабочих процессов. Пользовательский цветовой профиль был создан с помощью модуля цветовой калибровки (Color Calibration) в Darktable, реализующего стратегию оптимизации, основанную на минимизации среднего значения ΔE_{76} (цветового различия) участков (ступеней) на фотографии пленки [7].

Результаты и обсуждения

Оптическая активность прозрачных стеклообразных плёнок поливинилхлорида в проходящем поляризованном свете была обнаружена, исследована полуколичественно ранее и предложена для использования в светотехнике и уличной световой рекламе [8]. При этом зависимость прозрачности и цвета термоусадочных плёнок от деформации усадки и уровня внутренних напряжений в плёнках не анализировалась. Установлены лишь периодическая (синусоидальная) зависимость прозрачности плёнок и «повторяемость» цвета пакетов прозрачных пленок в проходящем потоке поляризованного света по мере увеличения количества слоёв [9].

Различие цвета пакетов прозрачных плёнок по мере увеличения их числа в пакете оценивается величиной ΔE_{76} и наиболее существенно при дублировании или сложении трёх-четырёх слоёв. Высечка части одного из слоёв в пакете плёнок или размещение между слоями плоских фигур, вырезанных из прозрачной плётки того же или другого полимера приводит к получению нового вида слоистых композитов, названных нами "ступенчатыми". Свойства ступенчатых прозрачных полимерных плёночных материалов аналогичны оптическим свойствам пакетов прозрачных минеральных пластин известных в геометрической оптике под именем «Стопа Столетова» и называемых в экспериментальных исследованиях интерференции полимерных систем, «multilayer optical film», «multilayer film stack» или optical film stack [10].

Новые технические решения в области индикации и/или измерения силы сжатия полимерных материалов при герметизации емкостей с жидкостью [11], а позднее пучков проводов [12] основаны на недавно обнаруженном изменении цвета ступенчатых оптически активных плёнок в поляризованном свете и систематических исследованиях механохромных материалов с памятью формы [13, 14]. Все предшествующие исследования цвета и прозрачности многослойных полимерных плёнок осуществлялись в проходящем потоке света при размещении плёнок между двумя поляризаторами. Применения на практике таких вариантов прохождения света и наблюдения изменений цвета полимерных плёнок с целью диагностики напряженного состояния материалов в изделиях или инженерных конструкциях весьма ограничены.

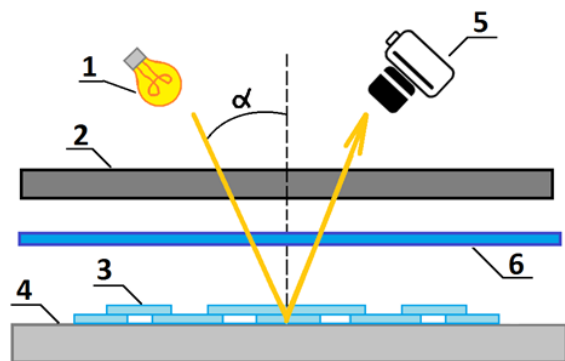


Рисунок 2. Схема стенда для изучения цвета и оптических характеристик пакета пленки в отраженном от зеркала световом потоке: 1 – Источник света; 2 – подвижный поляризатор; 3 – пакет лент из пленок ВОРР внахлест; 4 – светоотражающая поверхность; 5 – фотокамера; 6 – термоусадочная пленка ПВХ

Figure 2. Diagram of the stand for studying the color and optical characteristics of a film package in the light reflected from a mirror: 1 – light source; 2 – movable polarizer; 3 – BORR film package (Stoletov stack); 4 – reflective surface; 5 – camera; 6 – PVC shrink film

В настоящем исследовании использована схема измерения цвета и прозрачности многослойных полимерных плёнок с одним поляризатором (рисунок 2), где роль источника поляризованного света, проходящего сквозь пакет пленок выполняет отражение от зеркал – металлизированной плёнки со светоотражающей поверхностью (поз. 4 на рисунок 2) расположенной на изделии или узле сжимаемых коммуникаций. Анализатором служит поляризационная пленка фильтр (поз. 2 на рисунок 2) или очки наблюдателя с поляризационными стеклами (не показаны).

На рисунке 3 показана реализация продуктового результата исследований – пример практического использования обнаруженных и количественно оценённых по контрасту цветных оптических эффектов. Изменение цвета пакета плёнок поляризованном свете после термоусадки внешнего слоя пленки поливинилхлорида как индикатор качества изоляции.

Цветопеременный эффект как индикатор изоляции исследован на комбинации пленок ПВХ и ВОРР размещенных в одной плоскости на стенде для оптических измерений (рисунок 2) с использованием различных светоотражающих материалов. Цвет в поляризованном свете под углом α менее 10 градусов комбинации пленок ПВХ с 1 или 2 слоями пленки ВОРР фиксировался на фотографиях и записывался в форме спектра.

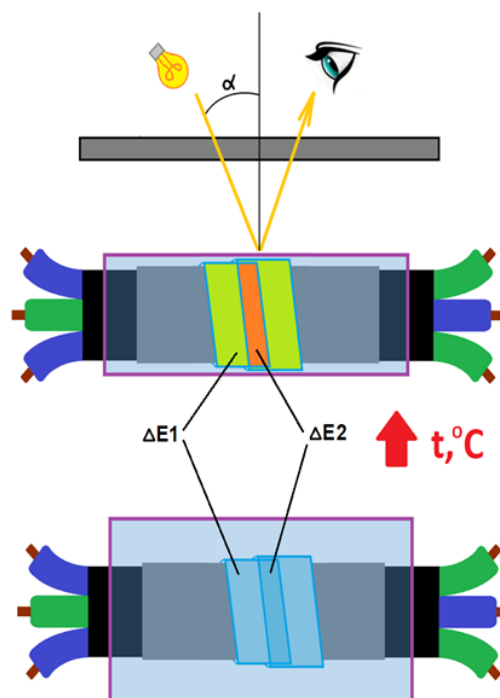


Рисунок 3. Выявление силы сжатия стыка по цвету ступенчатого слоя ленты ВОРР в поляризованном свете после термоусадки внешнего слоя пленки ПВХ (рукава с памятью формы)

Figure 3. Identification of the compression force of the joint by the color of the stepped layer of the BORR tape in polarized light after the shrinkage of the outer layer of the PVC film (shape-memory sleeves)

Пленка ПВХ подвергалась частичной свободной усадке с ограничением 50% и повторно фотографировалась в составе комбинации пленок ПВХ и (1–2) ВОРР. На фотографиях (рисунок 3 внизу), показан цвет плёнок полипропилена в поляризованном свете размещённых на зеркальной поверхности. После нагревания и сжатия внешнего слоя термоусадочной пленки ПВХ до максимально возможной величины

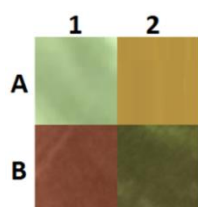


Рисунок 4. Изменение цвета ступеней пленки ВОРР на светоотражающей поверхности 1,2 – количество слоев пленки ВОРР; А – ВОРР + PVC 0%; В – ВОРР + PVC сжатие относительно первоначального размера 50%

Figure 4. Change in color of the BOPP film steps on the reflective surface 1, 2 – number of plecka layers BOPP; A – BOPP + PVC 0%; B – BOPP + PVC compression relative to the original size of 50%

Закключение

1 Поляризация и интерференция света, отраженного от зеркальной поверхности обеспечивают многоцветный эффект плеохроизма, обусловленный наличием и уровнем внутренних напряжений в дихроичной термоусадочной пленке поливинилхлорида.

2 Сочетание дихроичной термоусадочной пленки поливинилхлорида пленок с несколькими слоями дихроичной двуслоноориентированной пленки полипропилена усиливает интерференцию поляризованного света в слоистом пакете и изменение палитры цвета в процессе термостимулируемой усадки.

($\approx 50\%$ диаметра) цвет ступенчатого слоя пленок ВОРР меняется и это изменение указывает на успешной завершение герметизации стыка проводов. Следует отметить, что в отсутствие поляризатора весь пакет пленок является прозрачным и бесцветным до и после термоусадки.

Изменение цвета ступенчатого слоя пленок ВОРР в поляризованном свете показано на рисунке 4 и измерено спектрофотометром (рисунок 5).

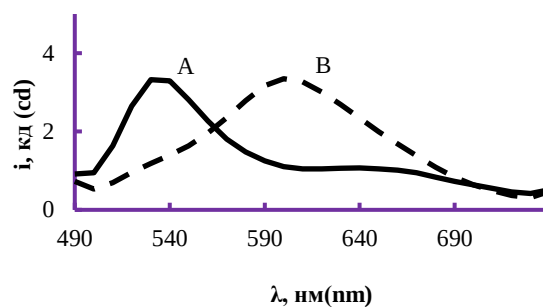


Рисунок 5. Коэффициент спектральной прозрачности. ВОРР + PVC сжатие относительно первоначального размера: В – 50%; А – 0%

Figure 5. Spectral transparency coefficient. BOPP + PVC compression relative to the original size: B – 50%; 2 – 0%

3 Цветопеременный эффект при термостимулируемой усадке комбинированного пакета металлизированных, термоусадочных и двуслоноориентированных пленок из термопластичных полимеров предложено использовать при визуальном контроле качества герметизации стыков электрических проводов или узлов соединения коммуникаций.

Благодарности

Настоящее исследование проведено при финансовой поддержке Московского Политехнического Университета в рамках гранта имени В.Е. Фортова.

Литература

- 1 Пат. 4731271 US, МПК H02G15/18; H02G15/08; H01R4/72. Cable connection sleeve / Heucke K.H., Ott A.; опубл. 15.03.1988.
- 2 Пат. 6355318 B1 US, МПК B29C65/34; F16L47/22; F16L59/20. Heat shrinkable member / Tailor D.K., Verge M., Steele R.E. et al.; опубл. 12.03.2002.
- 3 Пат. 105566736 A CN, МПК B29C61/06; C08F2/00. Radiation-crosslinked polyolefin heat shrink tube capable of changing color along with temperature for warning / Shiping X., Xuelian L., Jun L. et al.; опубл. 11.05.2016.
- 4 Пат. 5722259 B2 JP, МПК G01L1/24; G01L5/16. Flexible tactile sensor / Nagano U., Watanabe T., Maruyama S.; опубл. 20.05.2015.
- 5 Пат. 2822100 РФ. Способ измерения силы нажатия методом оптической анизотропной диффузионной тензометрии и датчик для измерения силы нажатия / Чех И.И., Синцов М.Ю.; заявл. 02.06.2022.
- 6 Верещагин В.Ю., Погиба А.Ю., Кондратов А.П. Плеохроизм бесцветных полимерных покрытий на светоотражающей поверхности // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 214–219. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.033
- 7 Nikolaev A.A., Kondratov A.P. Method for hidden marking of transparent polypropylene film // Fine Chemical Technologies. 2022. V. 17. № 4. P. 346–356. doi: 10.32362/2410-6593-2022-17-4-346-356
- 8 Kondratov A.P. New materials for light strain-optical panels // Light & Engineering. 2014. V. 22. № 3. P. 74–77.

- 9 Ермакова И.Н., Нагорнова И.В., Кондратов А.П. Прозрачные слоистые материалы на основе полиолефинов с варьируемой окраской // *Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства*. 2015. С. 101–102.
- 10 Пат. 20160216427 US, МПК G02B5/08; G02B5/30. Multilayer optical film / Johnson M.B., Haag A.D., Denker M.E.; опубл. 02.07.2016.
- 11 Пат. по заявке № 2025101494 РФ. Термоусадочный колпачок / Погиба А.Ю. и др.; заявл. 24.01.2025.
- 12 Пат. по заявке № 2025135670 РФ. Устройство для изоляции пучка проводов / Ямилиненец В.Ю. и др.; заявл. 12.12.2025.
- 13 Angelsky O.V., Bekshaev A.Y., Vasnetsov M.V. et al. Optical phase singularities: Physical nature, manifestations and applications // *Frontiers in Physics*. 2022. V. 10. P. 1060787. doi: 10.3389/fphy.2022.1060787
- 14 Balderas I., Kondratov A.P., Vereshchagin V.Y., Pogiba A.Y. Optical Properties of Colorless Polymer Coatings on the Mirrored Surface of Containers // *Physics of the Solid State*. 2026. V. 68. № 3. P. 283–289.
- 15 Dorohoi D.O., Postolache M., Nechifor C.D. et al. Review on optical methods used to characterize the linear birefringence of polymer materials for various applications // *Molecules*. 2023. V. 28. № 7. P. 2955. doi: 10.3390/molecules28072955
- 16 Kosmalska-Olańska A., Olszewski J., Masek A. A brief review of optical polymers in material engineering // *Express Polymer Letters*. 2024. V. 18. № 12. P. 1291–1326. doi: 10.3144/expresspolymlett.2024.99
- 17 Bokobza L. Infrared linear dichroism for the analysis of molecular orientation in polymers and in polymer composites // *Polymers*. 2022. V. 14. № 6. P. 1257. doi: 10.3390/polym14061257
- 18 Юдаев П.А., Тамбура Б., Чистяков Е.М. Антистатические полимерные материалы // *Нанотехнологии в строительстве*. 2023. Т. 15. № 2. С. 139.
- 19 Vilasó-Cadre J.E., González-Fernández L.A., Medellín-Castillo N.A., Reyes-Domínguez I.A. Diversified Analytical Methods Used to Analyze Plastic Biodegradation // *Advanced Strategies for Biodegradation of Plastic Polymers*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 165–192. doi: 10.1007/978-3-031-80853-7_7
- 20 Dorohoi D.O., Postolache M., Nechifor C.D. et al. Review on optical methods used to characterize the linear birefringence of polymer materials for various applications // *Molecules*. 2023. V. 28. № 7. P. 2955. doi: 10.3390/molecules28072955
- 21 Inoue T. Strain-induced birefringence of amorphous polymers and molecular design of optical polymers // *ACS Applied Polymer Materials*. 2021. V. 3. № 5. P. 2264–2273. doi: 10.1021/acsapm.1c00001

References

- 1 Patent no. 4731271 US, IPC H02G15/18; H02G15/08; H01R4/72. Cable connection sleeve. Heucke K.H., Ott A.; publ. 15.03.1988.
- 2 Patent no. 6355318 B1 US, IPC B29C65/34; F16L47/22; F16L59/20. Heat shrinkable member. Taylor D.K., Verge M., Steele R.E. et al.; publ. 12.03.2002.
- 3 Patent no. 105566736 A CN, IPC B29C61/06; C08F2/00. Radiation-crosslinked polyolefin heat shrink tube capable of changing color along with temperature for warming. Shipping X., Xuelian L., Jun L. et al.; publ. 11.05.2016.
- 4 Patent no. 5722259 B2 JP, IPC G01L1/24; G01L5/16. Flexible tactile sensor. Nagano U., Watanabe T., Maruyama S.; publ. 20.05.2015.
- 5 Patent no. 2822100 RF. Method for measuring pressing force by optical anisotropic diffusion tensiometry and sensor for measuring pressing force. Chekh I.I., Sintsov M.Yu.; filed 02.06.2022. (in Russian).
- 6 Vereshchagin V.Yu., Pogiba A.Yu., Kondratov A.P. Pleochroism of Colorless Polymer Coatings on a Light-Reflecting Surface. *Polzunovsky Bulletin*. 2025. no. 2. pp. 214–219. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.033 (in Russian).
- 7 Nikolaev A.A., Kondratov A.P. Method for hidden marking of transparent polypropylene film. *Fine Chemical Technologies*. 2022. vol. 17. no. 4. pp. 346–356. doi: 10.32362/2410-6593-2022-17-4-346-356.
- 8 Kondratov A.P. New materials for light strain-optical panels. *Light & Engineering*. 2014. vol. 22. no. 3. pp. 74–77.
- 9 Ermakova I.N., Nagornova I.V., Kondratov A.P. Transparent Layered Materials Based on Polyolefins with Variable Color. *Technique and Technology of Petrochemical and Oil and Gas Production*. 2015. pp. 101–102. (in Russian).
- 10 Patent no. 20160216427 US, IPC G02B5/08; G02B5/30. Multilayer optical film. Johnson M.B., Haag A.D., Denker M.E.; publ. 02.07.2016.
- 11 Patent application no. 2025101494 RF. Heat-shrinkable cap. Pogiba A.Yu. et al.; filed 24.01.2025. (in Russian).
- 12 Patent application no. 2025135670 RF. Device for insulating a bundle of wires. Yamilinenets V.Yu. et al.; filed 12.12.2025. (in Russian).
- 13 Angelsky O.V., Bekshaev A.Y., Vasnetsov M.V. et al. Optical phase singularities: Physical nature, manifestations and applications. *Frontiers in Physics*. 2022. vol. 10. article 1060787. doi: 10.3389/fphy.2022.1060787.
- 14 Balderas I., Kondratov A.P., Vereshchagin V.Y., Pogiba A.Y. Optical Properties of Colorless Polymer Coatings on the Mirrored Surface of Containers. *Physics of the Solid State*. 2026. vol. 68. no. 3. pp. 283–289.
- 15 Dorohoi D.O., Postolache M., Nechifor C.D. et al. Review on optical methods used to characterize the linear birefringence of polymer materials for various applications. *Molecules*. 2023. vol. 28. no. 7. article 2955. doi: 10.3390/molecules28072955.
- 16 Kosmalska-Olańska A., Olszewski J., Masek A. A brief review of optical polymers in material engineering. *Express Polymer Letters*. 2024. vol. 18. no. 12. pp. 1291–1326. doi: 10.3144/expresspolymlett.2024.99.
- 17 Bokobza L. Infrared linear dichroism for the analysis of molecular orientation in polymers and in polymer composites. *Polymers*. 2022. vol. 14. no. 6. article 1257. doi: 10.3390/polym14061257.
- 18 Yudaev P.A., Tambura B., Chistyakov E.M. Antistatic Polymer Materials. *Nanotechnologies in Construction*. 2023. vol. 15. no. 2. p. 139. (in Russian).

19 Vilasó-Cadre J.E., González-Fernández L.A., Medellín-Castillo N.A., Reyes-Domínguez I.A. Diversified Analytical Methods Used to Analyze Plastic Biodegradation. In: Advanced Strategies for Biodegradation of Plastic Polymers. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. pp. 165–192. doi: 10.1007/978-3-031-80853-7_7.

20 Dorohoi D.O., Postolache M., Nechifor C.D. et al. Review on optical methods used to characterize the linear birefringence of polymer materials for various applications. *Molecules*. 2023. vol. 28. no. 7. article 2955. doi: 10.3390/molecules28072955.

21 Inoue T. Strain-induced birefringence of amorphous polymers and molecular design of optical polymers. *ACS Applied Polymer Materials*. 2021. vol. 3. no. 5. pp. 2264–2273. doi: 10.1021/acsapm.1c00001.

Сведения об авторах

Александра Ю. Погиба преподаватель, кафедра инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, pogiba.a@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-6550-2892>

Владислав Ю. Верещагин к.т.н., доцент, кафедра инфо-когнитивные технологии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, slavaver@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1344-4888>

Александр П. Кондратов д.т.н., профессор, кафедра инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, apkrezer@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Aleksandra Y. Pogiba lecturer, innovative materials of printmediaindustry department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, pogiba.a@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-6550-2892>

Vladislav Y. Vereshchagin Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, infocognitive technologies department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, slavaver@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1344-4888>

Aleksandr P. Kondratov Dr. Sci. (Engin.), professor, innovative materials of printmediaindustry department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, apkrezer@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 22/12/2025	После редакции 18/01/2026	Принята в печать 09/02/2026
Received 22/12/2025	Accepted in revised 18/01/2026	Accepted 09/02/2026