

ТЕРМОХРОМНЫЕ ПОЛИМЕРЫ, ВОЛОКНА И МАТЕРИАЛЫ: ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА

THERMOCHROMIC POLYMERS, FIBERS AND MATERIALS: PRODUCTION AND PROPERTIES

E.S. САШИНА, А.П. МИХАЙЛОВСКАЯ, М.А. БАКАЕВА, А.Ю. КУЛЕШОВА

E.S. SASHINA, A.P. MIKHAILOVSKAYA, M.A. BAKAEVA, A.YU. KULESHOVA

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: e.sashina@mail.ru

Рассмотрены способы получения волокнообразующих полимеров и текстильных изделий с термохромными свойствами. Для термохромных волокон рассмотрен способ введения термохромного красителя в расплав (полипропилен) или раствор (целлюлоза, полиакрилонитрил). Анализируется влияние состава термохромной композиции и полимерной матрицы на цветовой эффект.

Methods for obtaining dyes, fiber-forming polymers and textile products with thermochromic properties are considered. For thermochromic fibers, a method for introducing a thermochromic dye into a melt (polypropylene) or solution (cellulose, polyacrylonitrile) is considered. The influence of the composition of the thermochromic composition on the color effect is analyzed.

Ключевые слова: термохромные красители, микрокапсулирование, термохромные полимеры, текстильный материал с термохромным эффектом.

Keywords: thermochromic dyes, microencapsulation, thermochromic polymers, textile material with thermochromic effect.

Введение

На сегодняшний день разработано и успешно применяется множество красителей, обладающих способностью обесцвечиваться или изменять собственный цвет в зависимости от изменения условий окружающей среды, и в частности температуры. Термохромные красители активно используются в качестве температурных датчиков на различных объектах, а также в декоративных целях: окраска автомобилей, посуды и сувениров, печатной продукции, детских товаров и игрушек, упаковки для косметики и фармацевтики. Представляют особый интерес волокнистые материалы, обладающие термохромными свойствами.

Так, применение термохромного текстиля возможно в бытовой сфере для декорирования текстильных изделий, для медицинской, детской и профессиональной одежды, где требуется индикация температуры. Несмотря на популярность данного направления, механизмы термохромного поведения и алгоритм управления ими пока до конца не изучены, попытки создания термохромного текстиля сталкиваются с отсутствием отечественной базы красителей и технологий их применения, высокой стоимостью. В данной статье будут рассмотрены перспективы и особенности применения термохромных красителей в текстиле.

Термохромные красители

Согласно определению Дж. Дзя, написавшего обзор по термохромизму в 1963 году [1], термохромизмом считается легко заметное обратимое изменение цвета, вызванное точкой кипения растворителя в случае раствора или точкой плавления твердых веществ. Ныне данное определение упрощено до «свойства веществ изменять цвет из-за изменения температуры» [2]. В общем виде различают реверсивные (обратимые) и нереверсивные меняющие цвет системы. В случае обратимого термохромизма система возвращает свой цвет при установлении изначальной температуры. Для необратимого термохромизма характерен цветовой переход без возможности вернуть прежний цвет. Красители, способные к термохромному переходу, могут иметь органическую, металлоорганическую и неорганическую природу.

К неорганическим системам, способным проявлять свойство термохромизма, относятся комплексы переходных металлов. Выделяют несколько возможных механизмов цветового перехода в неорганических соединениях при нагреве:

- фазовый переход при условии разного цвета фаз (например, Cu_2HgI_4 , имеющий красный цвет при 20 °С и черный при 70 °С);

- уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводников (белый ZnO при прокаливании становится желтым);

- изменение геометрии лиганда (например, $(\text{Et}_2\text{NH}_2)_2\text{CuCl}_4$ имеет ярко-зеленый цвет при 20 °С, находясь в квадратном плоском состоянии, и желтый при 43 °С при тетраэдрической форме лиганда);

- изменение координационного числа (CoCl_2 в изопропанолe существует в своей розовой октаэдрической геометрии комплекса на основе Co^{2+} при 25°С и меняет цвет на синий в тетраэдрической геометрии при 75°С).

Ограничивающими применение неорганических соединений факторами являются высокие температуры и в большинстве своем необратимый характер их цветового перехода. Высокая температура тер-

мохромного перехода неорганических соединений дает возможность ее использования для окраса боевой одежды пожарных (БОП). В соответствии с ГОСТ Р 53264-2009 «Техника пожарная. Специальная защитная одежда пожарного» БОП подразделяется на 3 уровня: БОП-1 устойчива к воздействию температуры до 300 °С не менее 300 с, БОП-2 способна выдержать температуру среды до 200 °С не менее 240 с, БОП-3 выдерживает температуру среды до 200 °С не менее 180 с. Так как времени удержания тепла при критических температурах немного, яркий температурный индикатор будет способен продемонстрировать пожарным, что в скором времени теплозащитные свойства костюма ухудшатся. Для подобного назначения подходит координационное соединение диэтилендиаминнитрата меди (II) $[\text{Cu}(\text{N,N}\text{-этилендиамин})_2](\text{NO}_3)_2$, имеющее температуру термохромного перехода с красного цвета на фиолетовый 150 °С. Причиной термохромного перехода данного соединения является изменение геометрии комплекса.

В качестве примера металлоорганического красителя можно привести гибридные молекулы $[(\text{PyCH}_2\text{NH}_3)_6]\cdot[\text{Pb}_5\text{I}_{22}]\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ с неорганическим 2D слоем [3], их оранжевая при комнатной температуре окраска переходит в красный цвет при 80 °С, а также полиэтилендиокситиофенполистиролсульфонат с добавкой хлорида меди ($\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), меняющий цвет при обезвоживании около 65-70 °С [4].

Красители органической природы имеют, как правило, температурный переход ниже такового для неорганических красителей и чаще обладают обратимым характером. Нагревание вызывает изменение цвета хромофора, а при удалении источника тепла цвет возвращается к своему термически более стабильному состоянию. Механизм обратимого термохромизма может быть различным [5]:

- внутримолекулярная перегруппировка путем разрыва ковалентных связей (например, спирооксазины);

- холестические жидкие кристаллы, проявляющие одновременно свойства жидко-

стей и присущую кристаллическим веществам анизотропию свойств (основания Шиффа, бифенилы, азобензолы, толаны, пиридины и др.);

- стереоизомерия в молекулах, имеющих разные цвета стереоизомеров (биантроны);

- макромолекулярные системы с переходами электронной плотности (политиофены, полисиланы, полидиацетилен, полианилины).

Первые два механизма наиболее распространены. Таким образом, термохромные красители органической природы – обычно жидкие кристаллы или лейкокрасители.

Холестерические жидкие кристаллы способны к обратимому цветовому переходу и реагируют на небольшие температурные колебания, что обуславливает их применение в качестве высокочувствительных температурных индикаторов. Первым исследованным холестерическим жидкокристаллическим соединением является холестерил бензоат, открытый Ф. Рейнцем. Молекулярная цепочка жидкокристаллических полимеров имеет спиральную структуру, которая может преобразовываться при различных температурах. Размер спирали молекулярной структуры и показатель преломления определяют цвет материала. Поэтому жидкие кристаллы могут демонстрировать сложное термохромное поведение. Так, композиция из 45% пеларгоната холестерина и 55% олеата холестерина способна к четырёхкратной смене цвета: 31-32 °С – красный цвет, 32-33 °С – зеленый цвет, 33-34 °С – синий цвет, 34-36 °С – фиолетовый цвет. При этом смена пропорций в смеси тех же холестериков до 65% пеларгоната холестерина и 35% олеата холестерина увеличивает температуру цветового перехода: 35,5-45 °С – красный цвет, 45,5-46 °С – зеленый цвет, 46-46,5 °С – синий цвет, 46,5-48 °С – фиолетовый цвет. Но в целом высокая стоимость и слабый эффект изменения цвета являются недостатками этого класса термохромных красителей. Наиболее популярными являются термохромные лейкокрасители, работающие по меха-

низму внутримолекулярной перегруппировки и представляющие собой композицию из красителя, проявителя цвета и гидрофобных нелетучих органических растворителей. Такие композиции считаются наиболее подходящими для текстильных изделий: термохромный переход зависит исключительно от температуры плавления растворителей и обладает многократной обратимостью. Когда температура достигает точки плавления, растворитель претерпевает фазовый переход из твердого состояния в жидкое, при этом краситель и проявитель растворяются в растворителе, что приводит к изменению цвета из-за разрыва связей в структуре красителя и перестройки хромофора в результате протонирования (рис. 1 – зависимость строения кристаллического фиолетового лактона от pH: а – неокрашенный (pH>4); б – окрашенный (pH<4)).

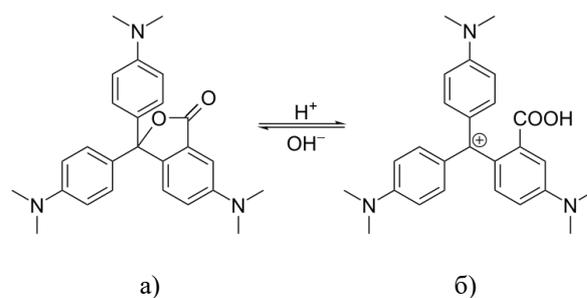


Рис. 1

При понижении температуры до точки замерзания растворитель переходит в твердое состояние, а красители возвращаются к исходному цвету. Цвет системы зависит от используемого лейкокрасителя, а температуру перехода можно регулировать с помощью подбора растворителей. Температура цветового перехода зависит только от растворителя, например, для систем с додеканолом цветовой переход наблюдается при расплавлении растворителя около 28 °С (рис. 2 – термограмма композиции фиолетовый лактон/проявитель/додеканол (1/5/300). Измерения выполнены на приборе DSC 8500 (PerkinElmer) со скоростью нагрева 10 °С/мин).

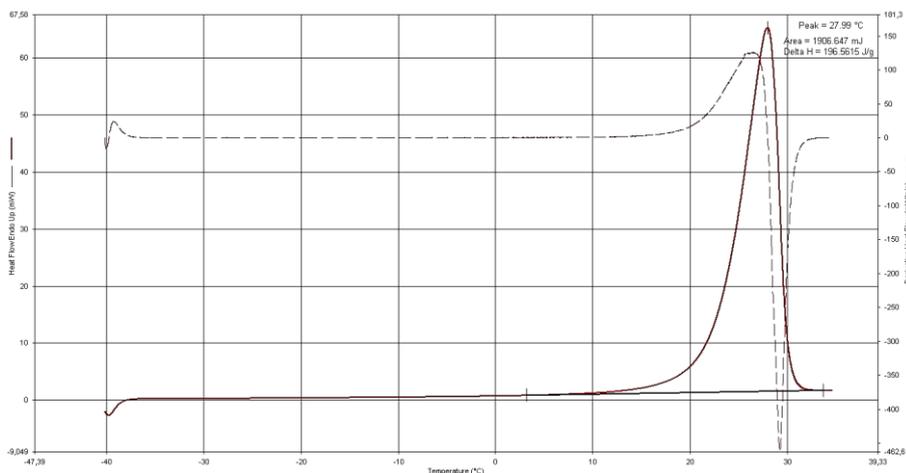


Рис. 2

Насыщенность цвета определяется содержанием красителя, а при одинаковом содержании красителя увеличивается до определенного максимума при возрастании количества проявителя в композиции (рис. 3 – зависимость светлоты L термохромной композиции от температуры в режиме нагрева, точка перехода $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, масс. соотношение краситель/проявитель/растворитель: 1 – 1/0,5/300; 2 – 1/1/300; 3 – 1/1,5/300; 4 – 1/2/300).

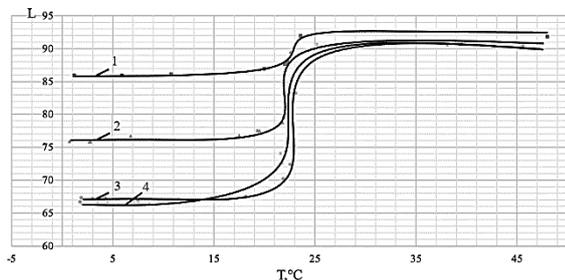


Рис. 3

Капсулирование термохромных красителей

Термохромные красители любой природы нельзя использовать для непосредственного окрашивания из-за их высокой чувствительности к окислению, низкого сродства к окрашиваемой поверхности и утечки растворителя при нагревании. Поэтому их капсулируют в полимерную оболочку с типичными размерами микрокапсул 2-50 мкм [6, 7]. Дополнительное преимущество микрокапсулирования состоит в защите чувствительных к УФ-излучению

красителей. Применение микрокапсулированных красителей позволяет комбинировать несколько термохромных красителей, в результате чего получается ряд узких цветовых диапазонов.

Учитывая задачу капсулирования гидрофобной красящей композиции, необходимо понимать, что в качестве оболочек не подходят водорастворимые или проницаемые при набухании вещества. Оболочка капсулы должна быть прозрачной, чтобы не исказить зрительное восприятие цвета термохромного красителя в составе капсулы. Таким образом, подходящими являются полиуретановые, полисилоксановые, полиамидные, полиэфирные, карбамидные или эпоксидные оболочки.

Приемы, используемые для микрокапсулированных продуктов, основаны на процессах пленкообразования в гетерогенных системах на границе раздела жидкость-жидкость. Существуют следующие способы создания полимерных оболочек:

- 1) пленкообразование из растворов пленкообразующих веществ за счет регулирования их растворимости в данной среде (понижение температуры раствора, его pH, испарение части растворителя, добавление осадителя);
- 2) пленкообразование из расплавов пленкообразующих веществ;
- 3) пленкообразование в результате полимеризации или поликонденсации низкомолекулярных веществ на поверхности капсулируемого вещества.

Для микрокапсулирования термохромных красителей обычно используются физико-химические и химические процессы, такие, как коацервация и межфазная полимеризация. Окончательный выбор способа микрокапсулирования зависит от области применения и таких факторов, как размер частиц, толщина стенки, непроницаемость, термическая стабильность, совместимость и адгезия с окружающими химическими веществами. Капсулируемое вещество вводят в исходный раствор пленкообразующего, размешивают до мелкодисперсного состояния. Это возможно при правильном подборе компонентов и растворителей: гидрофильное пленкообразующее и гидрофобное капсулируемое вещество. При этом используют поверхностно-активные вещества, в зависимости от природы которых будет достигаться необходимая степень дисперсности и исключается обращение фаз (обволакивание пленкообразующего полимера капсулируемым веществом). Далее тем или иным способом вызывают возникновение фазы пленкообразующего полимера, которая выделяется в виде мелких капелек и при перемешивании системы обволакивает частицы капсулируемого вещества, образуя непрерывную оболочку (рис. 4 – микрофотографии частиц капсулированной термохромной композиции, выполненные при помощи сканирующего электронного микроскопа *Sigma VP ZEISS* (ускоряющее напряжение 10 кВ, детектор *InLens*)).

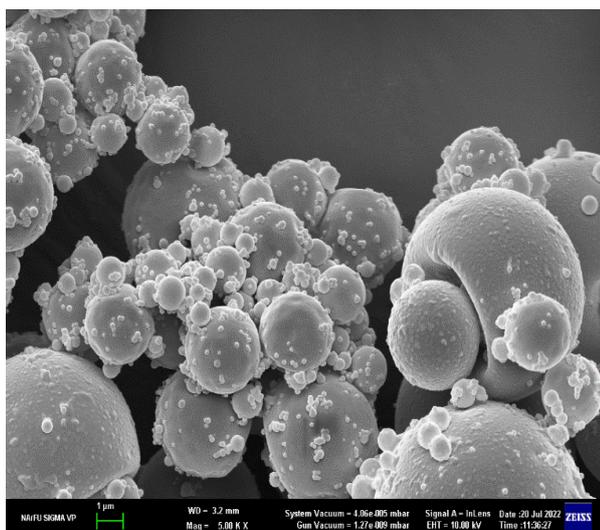


Рис. 4

Для образования оболочки на поверхности частиц капсулируемого вещества важно, чтобы капсулируемое вещество не было растворимо в растворителе и осадителе, используемых для образования полимерной оболочки, а также имело большее поверхностное натяжение, чем фаза, обогащенная пленкообразующим (пленка). Формирование пленки на поверхности диспергированных частиц протекает в течение длительного времени, иногда до нескольких часов. После его завершения добиваются затвердевания оболочек, понижая температуру системы или разбавляя ее осадителем. При необходимости повышения устойчивости оболочек микрокапсул (например, к воздействию жидких сред) молекулы пленкообразующего сшивают бифункциональным реагентом. Микрокапсулирование завершают отделением микрокапсул от среды с помощью центрифугирования, фильтрования или декантации с последующим промыванием и высушиванием микрокапсул.

Один из вариантов метода микрокапсулирования пленкообразованием из раствора основан на высушивании при распылении. По этому способу капсулируемое вещество диспергируют в жидкой среде, содержащей в растворенном или диспергированном виде пленкообразующее. Для осуществления стадии микрокапсулирования смесь распыляют в нагретой камере, в результате чего происходит испарение среды с образованием полимерной пленки на поверхности капсулируемого вещества. При этом необходимо, чтобы среда была легколетучей, а капсулируемое вещество – низколетучим.

Полимерные волокна с термохромными свойствами

Для производства термохромного текстиля приемлемы два способа, различающиеся по технологии: 1) получение волокон, содержащих в своей надмолекулярной структуре термохромный краситель, или 2) нанесение и фиксация красителя на готовый текстильный материал или изделие.

Для формования термохромных волокон капсулированные термочувствительные красящие композиции добавляют в расплав

или раствор волокнообразующего полимера [8, 9]. Микрокапсулированные термохромные пигменты гидрофобны и имеют микрометровые размеры частиц, отсюда следуют особенности их совмещения с полимерным расплавом, которые определяют равномерность окрашивания и возможность миграции красителя к поверхности волокон. Количество вносимого красителя определяет в первую очередь интенсивность окраски и варьируется от 2 до 8-10 %. Для полимеров, которые плохо окрашиваются в массе дисперсными красителями, например полиакрилонитрил (нитрон) [10], концентрацию красителя увеличивают (вплоть до 40 %), однако это часто влечет за собой ухудшение физико-механических свойств. Например, по данным многих исследований и нашим собственным, введение 10 % и более термохромного красителя

в полимер снижает механическую прочность волокон до 2 раз, а удлинение при разрыве до 1,5 раз [11].

Важной характеристикой термохромных волокон и полимерных изделий, независимо от цвета красителя и точки температурного перехода, является разница температур исчезновения–проявления цвета в цикле нагрев–охлаждение. На рис. 5 (зависимость светлоты L образцов полипропилена (толщина 1,5-2 мм) от температуры в режимах нагрев (сплошная линия) – охлаждение (пунктир), содержание красителя 5 масс. %, точка перехода: а) 65 °С; б) 28 °С) приведены кривые изменения координаты цвета в системе $CIE\text{Lab}$ – светлоты – в цикле нагрев–охлаждение для полипропиленовых образцов с красящими композициями, имеющими температуры перехода 28 °С и 65 °С.

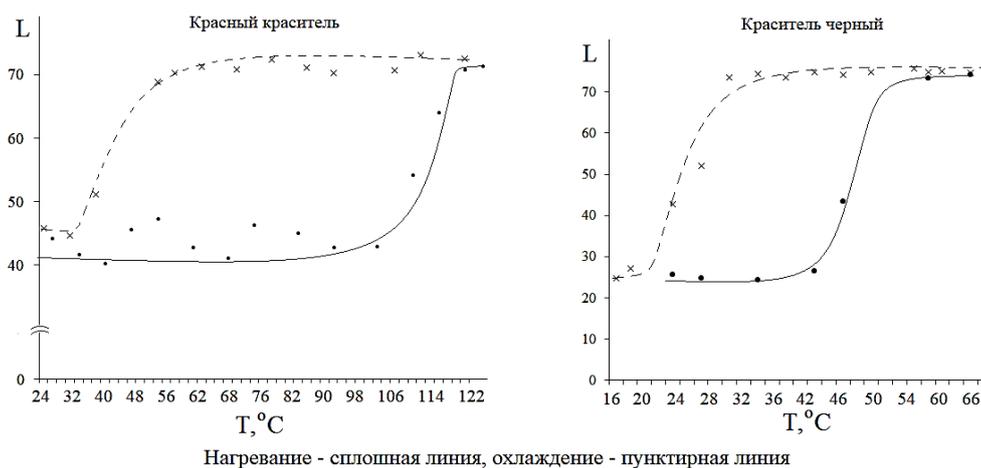


Рис. 5

Различие в температуре перехода при нагреве и охлаждении характеризуют как ΔH = ширина гистерезиса = $T_{\text{обесцв}} - T_{\text{восст}}$ и определяют по формулам:

$$T_{\text{обесцв}} = \frac{T_3 + T_4}{2}, \quad T_{\text{восст}} = \frac{T_1 + T_2}{2},$$

где T_1 – температура полного восстановления цвета;

T_2 – температура частичного восстановления цвета;

T_3 – температура частичного обесцвечивания;

T_4 – температура полного обесцвечивания,

Чем ближе значения температур перехода при нагревании и охлаждении, тем меньше ширина гистерезиса. Эта характеристика довольно сложным образом зависит от состава термохромной композиции и типа проявителя, а также от свойств полимерной матрицы, включая теплопроводность и способность аккумулировать энергию. Ширина петли (разница температур) зависит от того, как долго материал отдает тепло, сохраняя фазовое состояние термохромной композиции. Площадь петли, надо полагать, характеризует энергию, теряемую в образце за один цикл, которая

идет в конечном счете на нагревание полимерного образца.

Цвет образцов материала, как правило, оказывается бледнее цвета собственно красителя, что объясняется преломлением и отражением света в оболочке микрокапсулы. Это зависит как от толщины оболочки, так и от ее материала.

Поскольку температура расплава полимера при формовании зачастую превышает порог начала деструкции капсулы или компонентов красителя, более технологичным выглядит добавление термохромной композиции в раствор полимера, например целлюлозы в N-метилморфолин-N-оксиде или ионной жидкости, полиакрилонитрила в диметилсульфоксиде или диметилацетамиде, и формование волокон осаждением в осадительную ванну. В работе [12] нами получены термохромные материалы (волокна, пленки) из растворов целлюлозы в ионной жидкости – хлориде 1-бутил-3-метилимидазолия с добавлением 5-10 % капсулированного красителя; формование проводили в изопропанол. Распределение красителя в растворе и окрашивание полученных образцов охарактеризовано как равномерное, интенсивность определяется содержанием красителя. Выявлено с использованием метода рентгеновской дифракции, что степень кристалличности образцов даже при содержании красителя 10 % мало уменьшается. Фурье-ИК-спектроскопия показала, что положение полос поглощения, принадлежащих целлюлозе, при введении красителя практически не меняется, что говорит об отсутствии специфического межмолекулярного взаимодействия, то есть полимер является инертной матрицей для размещения в ней капсулированного красителя.

Разница температур в цикле нагрев–охлаждение для целлюлозных образцов (рис. 6 – зависимость светлоты L пленок целлюлозы (толщина 1,5-2 мм) от температуры в режимах нагрев (сплошная линия) – охлаждение (пунктир), содержание красителя 5 масс. %) оказалась существенно меньше в сравнении с полипропиленом (см. рис. 5), что легко объяснимо разницей величин удельной теплоемкости дан-

ных полимеров, которая для целлюлозы составляет порядка 1500, а для полипропилена около 2000 Дж/кг·К.

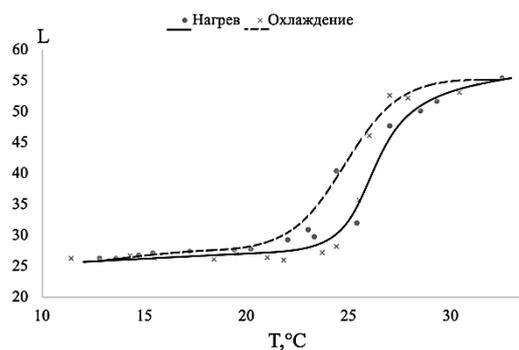


Рис. 6

Добавлением красителя в раствор полиакрилонитрила в диметилацетамиде получены термохромные образцы волокон и пленок путем испарения растворителя. Распределение красителя в структуре образцов равномерное, миграции к поверхности при высыхании растворителя не происходит. Интенсивность окраски зависит от концентрации красителя, что демонстрирует рис. 7 (зависимость светлоты L образцов полиакрилонитрила от температуры в режиме нагрева, точка перехода 28 °С, содержание красителя, масс. %: 1 – 2, 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15).

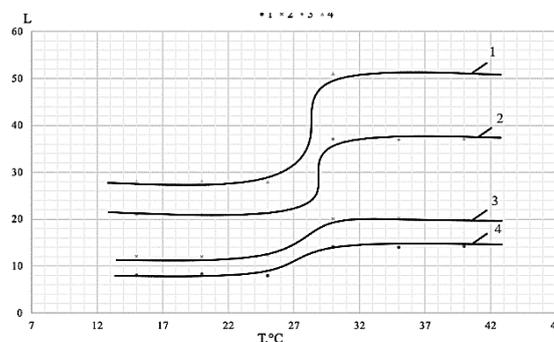


Рис. 7

Еще один способ формования волокон из раствора подразумевает электропрядение. При этом получают нановолокна, формируемые в волокнистый нетканый материал. Термохромные нановолокна получены электропрядением раствора полистирола в системе толуол/ацетон 7:3 и раствора поливинилпирролидона в этаноле с

добавлением жидких холестерических кристаллов из смесей холестерилбензоата, холестерилпеларгоната и холестерилолеилкарбоната [13]. Метод электропрядения сохраняет термохромные свойства жидкокристаллического состава, поскольку обеспечивает образование волокон малого диаметра.

Нанесение термохромной окраски на текстильный материал методом печати

На готовый текстильный материал термохромные краски наносят с помощью технологии шелкотрафаретной печати. Особенность техники заключается в возможности применения широкого диапазона печатных красок на различных связующих, а также использования любых материалов основы. Шелкография позволяет наносить на запечатываемый материал красочные слои различной толщины, которая зависит от структуры сетки, используемой в качестве формы. Регулируемая толщина слоя дает возможность менять интенсивность окраски, а также использовать кроющие краски на основе другого цвета.

Капсулированные красители не имеют сродства к волокну и не проникают в его структуру, поэтому фиксируются на поверхности текстильного материала за счет связующего, образующего прочную окрашенную пленку на стадии термофиксации. Кроме связующего вещества, добавляют фиксатор, мягчитель, эмульгатор, загуститель. По нашим наблюдениям, печатная композиция не должна содержать ацетон или пропилацетат, а в качестве катализаторов сшивки не допускаются аммонийные соли. Содержащиеся в краске цветочные пигменты в виде микрокапсул могут смешиваться с красками на акриловой, резиновой или масляной основе. Доля действующего вещества, как правило, составляет от пяти до тридцати процентов от общей массы печатной краски в зависимости от желаемой интенсивности цветового оттенка.

Одностадийная технология включает печатание, сушку, прогрев ткани для обеспечения взаимодействия между связующим и волокном, промывку и термическую обработку сухим горячим воздухом при температуре не более 140-160 °С в течение 2-4

мин. Качество напечатанных пигментами текстильных материалов в первую очередь зависит от используемых печатных составов, основными компонентами которых, кроме пигмента, являются связующее вещество (пленкообразующий компонент), фиксатор (сеткообразующий компонент), мягчитель, эмульгатор, загуститель.

На рис. 8 (фотографии смесовой трикотажной ткани с нанесенным методом шелкографии термохромным рисунком: а, в – до нагревания; б, г – в процессе нагревания) приведены фото устойчивых к стирке композиций состава: краситель термохромный 0,3-0,4 ч.; связующее *Helizarin Binder (BASF)* 1,2 ч.; карбамол ЦЭМ 0,4 ч.; мягчитель глицерин 0,2 ч.; загустка *Tanaprint MAXX (Tanatex Chemicals)* 8 ч.; сшивающий агент хлорид магния (5% раствор) 0,2 ч.



Рис. 8

Нанесение рисунка методом печати не приводит к существенному различию температур цветового перехода в режимах нагрев–охлаждение, обычно не более 2-4 °С (рис. 9 – зависимость светлоты L образцов полипропилена от температуры в режимах нагрев (сплошная линия) – охлаждение (пунктир) для красителя желтого с рис. 8),

что связано с малой толщиной слоя печатной краски (0,2-0,5 мм).

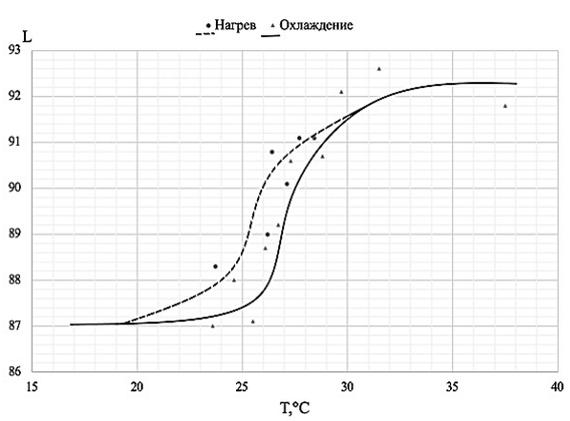


Рис. 9

Для указанного состава печатной краски устойчивость к стирке, определенная по ГОСТ 9733.4-83, составила 5 баллов.

Термохромные окраски на основе лейкокрасителей, нанесенные на текстильный материал указанным способом, устойчивы к солнечному свету, влаге, действию низких температур. Однако их не рекомендуется нагревать выше 150 °С, подвергать действию ацетона, пропилацетата или солей аммония. Капсулированные красители устойчивы к воде, этанолу, ксилолу, бутаноксиму. Устойчивость печатного рисунка к стирке определяется составом композиции, а именно природой связующего.

ВЫВОДЫ

Для колорирования текстиля наиболее удобными являются лейкокрасители, сочетаемые с протонодонорами в среде с температурой плавления, обеспечивающей желаемую точку цветового перехода. Для создания термохромного эффекта на текстильном изделии в зависимости от площади окрашенной поверхности может быть использован метод введения термохромного красителя в структуру волокнообразующего полимера на стадии формования через расплав или раствор либо нанесения его в составе печатной пасты на готовое текстильное изделие методом шелкографии с использованием сетчатых шаблонов.

Капсулированные термохромные композиции хорошо совмещаются с расплавом гидрофобного полимера, с полярными растворителями (за исключением ацетона) и ионными жидкостями. Они совместимы с типовыми составами печатной краски, за исключением содержащих соли аммония.

Интенсивность окраски цветовой композиции зависит от концентрации красителя и до определенного предела проявителя. Она увеличивается с ростом содержания красителя до 10 масс. % без существенного изменения прочих характеристик волокнистого материала.

Цветовые характеристики термохромного текстиля могут изменяться с различной скоростью в режимах нагрев–охлаждение, что определяется как составом термохромной композиции, так и природой и теплоемкостью текстильного материала. При этом разница температур точки перехода в режимах нагрев–охлаждение зависит от того, как долго материал аккумулирует тепло, сохраняя фазовое состояние термохромной композиции. Площадь петли на графике координат цвета в режимах нагрев–охлаждение характеризует энергию, теряемую в образце за один цикл, которая идет в конечном счете на нагревание полимерного образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Day J.H. Thermochromism // Chem. Rev. 1963. № 63. P. 65...80.
2. Bamfield P., Hutchings M. Chromic Phenomena: Technological Applications of Colour Chemistry. Royal Society of Chemistry, 2018. 782 p.
3. Yu H., Wei Z., Hao Y., Liang Z., Fu Z., Cai H. Reversible solid-state thermochromism of a 2D organic–inorganic hybrid perovskite structure based on iodoplumbate and 2-aminomethyl-pyridine // New Journal of Chemistry. 2017. № 18. P. 9586...9589.
4. Mehta S., Kushwaha A., Kisannagar R. R., Gupta D. Fabrication of a reversible thermochromism based temperature sensor using an organic–inorganic composite system // RSC Advances. 2020. № 36. P. 21270...21276.
5. Теренин А.Н. Фотохимия красителей и родственных органических соединений. М.: Рипол Классик, 2013. 364 с.
6. Chowdhury M.A., Joshi M., Butola B.S. Photochromic and Thermochromic Colorants in Textile Applications // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2014. № 1. P. 107...123.

7. Lee S.S., Kim S.H. Controlled Encapsulation of Cholesteric Liquid Crystals Using Emulsion Templates // *Macromolecular Research*. 2018. № 26. P. 1054...1065.

8. Prahsarn C., Sooksimuang T., Sahasithiwat S., Roungpaisan N., Kamtonwong S., Panchan W., Klinsukhon W., Suwannamek N. Luminescent polypropylene fibers containing novel organic luminescent substance // *J. Polym. Res.* 2015. № 22. P. 87...91.

9. Jun L., Qiang G., Kaiyan Z., Mingqiao G., Jialin L. Structure and luminescent properties of luminous polypropylene fiber based on $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ // *Journal of Rare Earths*. 2014. № 8. P. 696...701.

10. Виноюкова Г.Н. Химия красителей. М.: Химия, 1979. 296 с.

11. Rubacha M. *Thermochromic cellulose fibers* // *Polym. Adv. Technol.* 2007. № 18. P. 323...328.

12. Сашина Е.С., Беклямышев М.О. Термохромные целлюлозные пленки из растворов в ионной жидкости // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 5. P. 134...139.

13. Nguyen J., Stwodah R. M., Vasey C. L., Rabatin B. E., Atherton B., D'Angelo P. A., ... Tang C. Thermochromic Fibers via Electrospinning // *Polymers*. 2020. № 4. P. 842...848.

REFERENCES

1. Day J.H. Thermochromism // *Chem. Rev.* 1963. № 63. P. 65...80.

2. Bamfield P., Hutchings M. *Chromic Phenomena: Technological Applications of Colour Chemistry*. Royal Society of Chemistry, 2018. 782 p.

3. Yu H., Wei Z., Hao Y., Liang Z., Fu Z., Cai H. Reversible solid-state thermochromism of a 2D organic-inorganic hybrid perovskite structure based on iodoplumbate and 2-aminomethyl-pyridine // *New Journal of Chemistry*. 2017. № 18. P. 9586...9589.

4. Mehta S., Kushwaha A., Kisannagar R. R., Gupta D. Fabrication of a reversible thermochromism based

temperature sensor using an organic-inorganic composite system // *RSC Advances*. 2020. № 36. P. 21270...21276.

5. Terenin A.N. *Photochemistry of dyes and related organic compounds*. М.: Ripol Classic, 2013. 364 p.

6. Chowdhury M.A., Joshi M., Butola B.S. Photochromic and Thermochromic Colorants in Textile Applications // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2014. № 1. P. 107...123.

7. Lee S.S., Kim S.H. Controlled Encapsulation of Cholesteric Liquid Crystals Using Emulsion Templates // *Macromolecular Research*. 2018. № 26. P. 1054...1065.

8. Prahsarn C., Sooksimuang T., Sahasithiwat S., Roungpaisan N., Kamtonwong S., Panchan W., Klinsukhon W., Suwannamek N. Luminescent polypropylene fibers containing novel organic luminescent substance // *J. Polym. Res.* 2015. № 22. P. 87...91.

9. Jun L., Qiang G., Kaiyan Z., Mingqiao G., Jialin L. Structure and luminescent properties of luminous polypropylene fiber based on $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ // *Journal of Rare Earths*. 2014. № 8. P. 696...701.

10. Vinyukova G.N. *Chemistry of dyes*. Moscow: Chemistry, 1979. 296 p.

11. Rubacha M. *Thermochromic cellulose fibers* // *Polym. Adv. Technol.* 2007. № 18. P. 323...328.

12. Sashina E.S., Beklyamishev M.O. Thermochromic cellulose films from solutions in ionic liquid // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022. № 5. P. 134...139.

13. Nguyen J., Stwodah R. M., Vasey C. L., Rabatin B. E., Atherton B., D'Angelo P. A., ... Tang C. Thermochromic Fibers via Electrospinning // *Polymers*. 2020. № 4. P. 842...848.

Рекомендована оргкомитетом XIX Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы». Поступила 02.10.23.