



УДК 669.017+539.216

Поступила 18.01.2017

ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ МИКРОСКОПИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

OPTICAL EFFECTS AT NONMETALLIC MATERIALS MICROSCOPY

А. Г. АНИСОВИЧ, Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

A. G. ANISOVICH, State research Institution Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevitcha str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

Рассмотрены оптические эффекты, возникающие на дефектах оптически прозрачных материалов при исследовании с применением различных способов оптического контрастирования – темнопольного освещения и поляризованного света. Показано, что методы оптического контрастирования позволяют обнаруживать сферические дефекты под поверхностью оптически прозрачных материалов. Формирование оптических эффектов на дефектах материалов в темном поле частично обусловлено конструктивными особенностями объектива микроскопа. При исследовании в поляризованном свете формирование изображения на сферическом дефекте происходит аналогично таковому для одноосного кристалла.

The optical effects which appeared on internal defects of optically transparent materials by use of various methods of optical staining, i. e. dark-field illumination and polarized light were researched. It was shown that methods of optical staining support to determine spherical defects under a surface of optically transparent materials. Formation of optical effects on materials defects in dark background are partially determined by design features of microscope objective and it was found out. It was defined that the investigation using polarized light the image formation of spherical defects occurs similar to uniaxial crystal.

Ключевые слова. *Оптическое контрастирование, темнопольное освещение, поляризованный свет, оптически прозрачные материалы.*

Keywords. *Optical staining, dark-field illumination, polarized light, optically transparent materials.*

Современная металлография имеет дело не только с металлическими материалами, но и с неметаллами, в том числе полимерами, смолами, пластмассами. Среди них – материалы с различной степенью оптической прозрачности в видимом диапазоне. Для исследования таких материалов, а также композиционных материалов на их основе необходимо применение различных способов оптического контрастирования, так как обычное освещение по методу светлого поля не всегда создает необходимое качество изображения [1].

Наиболее часто в металлографии применяются методы контрастирования с использованием темнопольного освещения и поляризованного света, что обеспечивает получение структурно нагруженных изображений, на которых сочетаются как детали структуры исследуемого материала, так и оптические эффекты различного происхождения. Причиной возникновения этих оптических эффектов могут быть как структурные факторы, так и дефекты структуры – пористость, трещины, инородные включения и т. п.

Микроскопы прошлого поколения, как правило, не давали изображений оптических эффектов на дефектах структуры. Причиной являлось низкое качество оптики, а также отсутствие больших увеличений и неудовлетворительная разрешающая способность. В настоящее время, помимо использования больших увеличений (порядка 2000 крат и более), для фиксирования изображения применяются видеокамеры высокого разрешения, которые позволяют заметить даже незначительные различия в освещенности структурных элементов, а также оптические эффекты при работе в темном поле и поляризованном свете.

Проявление оптических эффектов на деталях и дефектах структуры может быть весьма разнообразным и не всегда узнаваемым в силу как разнообразия современных объектов исследования, так и возможностей оптической системы современных микроскопов. Оптические эффекты при металлографическом контрастировании требуют объяснения по той причине, что они ошибочно могут быть отнесены

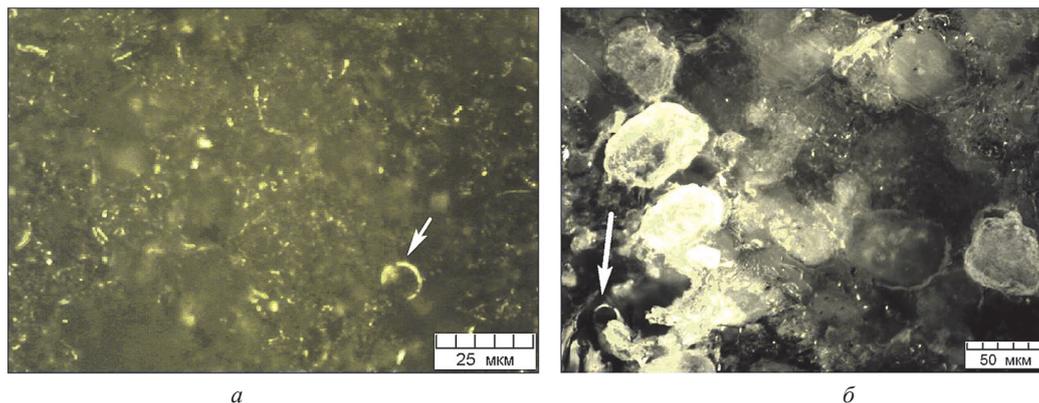


Рис. 1. Оптические эффекты в структуре полимерного материала: *а* – эпоксидная смола с наполнителем; *б* – сверхвысокомолекулярный полиэтилен; освещение по методу темного поля

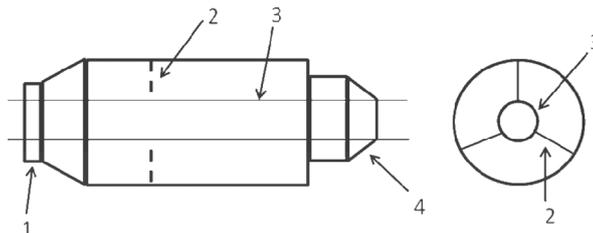


Рис. 2. Схема объектива микроскопа с опцией темного поля: 1 – резьба; 2 – держатели оптической системы «вертолетик»; 3 – оптическая система объектива; 4 – параболическое зеркало

к деталям структуры, в особенности при отсутствии у оператора навыка работы с подобными объектами. В справочной литературе такие сведения отсутствуют. Возникает необходимость выделения и описания оптических эффектов, вызванных, в первую очередь, дефектами структуры на поверхности металлических и неметаллических материалов, а также в объеме оптически прозрачных материалов.

В данной статье рассматриваются оптические эффекты, возникающие на сферических дефектах структуры полимерных материалов.

На рис. 1 показана структура композиционных неметаллических материалов на основе эпоксидных смол с различными наполнителями. Стрелками отмечены детали изображения, которые являются нехарактерными для структуры материала. Эти оптические эффекты могут принадлежать как структуре материала, так и быть артефактом. Также следует рассматривать возможность присутствия в композиции инородных включений.

Освещение по методу темного поля в металлографии – один из методов оптического контрастирования [1]. Для непрозрачных материалов применение темного поля позволяет визуализировать неплоскостные участки поверхности образца: включения фаз, границы зерен, частицы порошков, структуру изломов и т. д. Дополнительных структурных эффектов при этом, как правило, не возникает.

При исследовании оптически прозрачных материалов имеет место взаимодействие света не только с поверхностью образца, но и с внутренними слоями материала, в том числе с внутренними поверхностями (в первую очередь, полостями различной конфигурации). Толщина слоя, на который проникает свет, в основном зависит от свойств исследуемого объекта.

Формирование изображения в темном поле связано с особенностями конструкции объектива (рис. 2), которые визуализируются при отражении от специально подобранных поверхностей. Световые фигуры, формирующиеся в темном поле на плоской и сферических поверхностях непрозрачных материалов, показаны на рис. 3. Изображение на плоской поверхности сформировано двумя освещенными кольцами (рис. 3, *а*). Внутреннее кольцо представляет собой интерференционное кольцо за счет взаимодействия света с внешней кольцевой кромкой объектива. Внешнее кольцо, разделенное на три равных сегмента, является изображением крепления (так называемый «вертолетик») во внутренней части объектива для введения диафрагмы темного поля. При освещении шаровой непрозрачной поверхности в темном поле формируется световая фигура, состоящая из трех сегментов (рис. 3, *б*). Поэтому световые фигуры на рис. 1 могут быть образованы при взаимодействии света с объектами сферической формы.

При исследовании оптически прозрачных объектов, содержащих сферические дефекты (поры, газовые пузыри) в темном поле, падающий свет взаимодействует как с поверхностью образца, так и с вну-

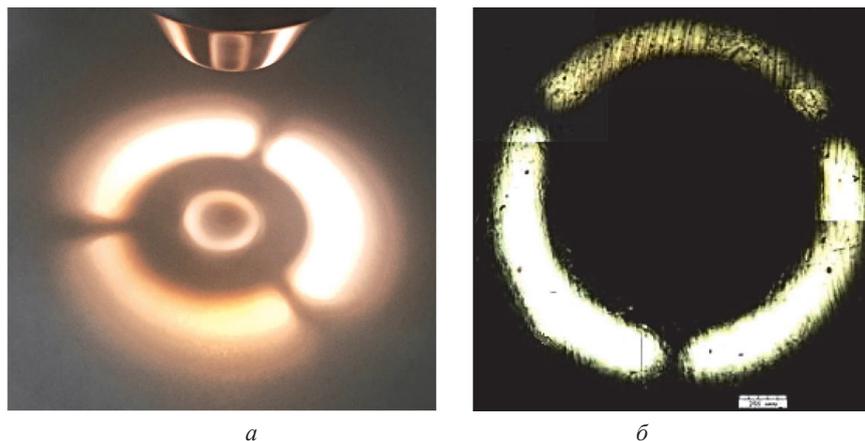


Рис. 3. Изображения светового пятна объектива микроскопа при освещении по методу темного поля: *a* – на бумаге; *б* – на полированном металлическом шарике (монтаж из нескольких кадров)

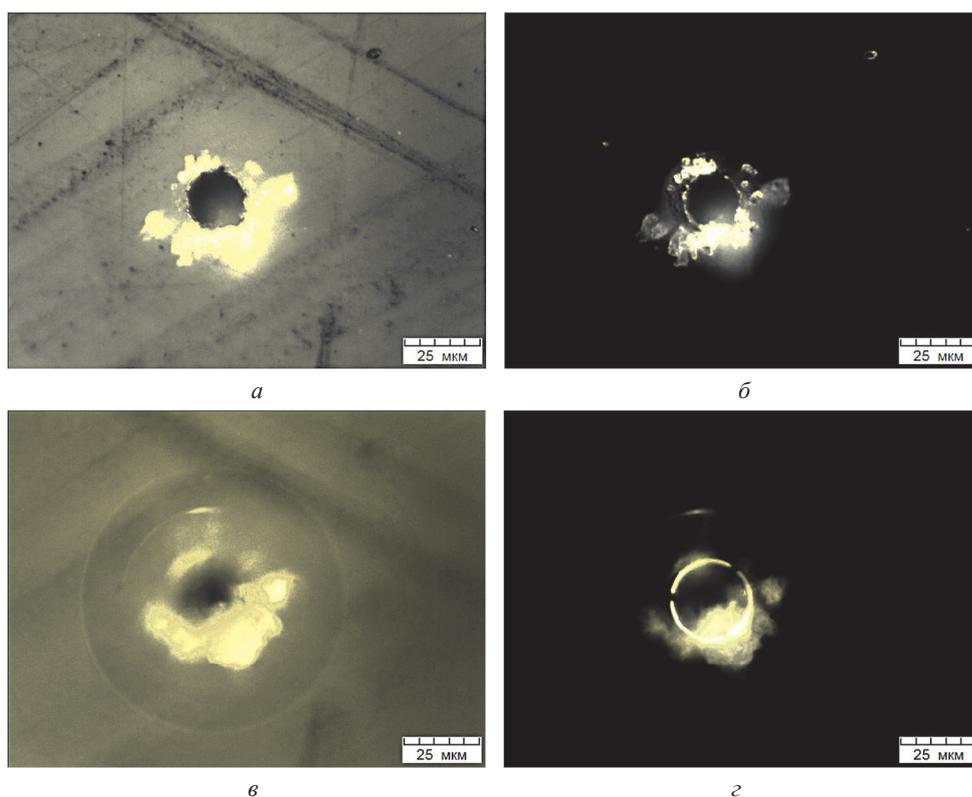


Рис. 4. Полость под поверхностью полупрозрачного материала (эпоксидная смола Д20): *a, в* – светлое поле; *б, г* – темное поле; *a, б* – фокусировка на поверхность образца

тренней сферической полостью. На рис. 4 представлена поверхность эпоксидной смолы Д20 с одиночной внутренней сферической порой, лопнувшей при деформации материала. При фокусировке на поверхность образца в резкости находится сама поверхность с царапинами, видны также продукты разрушения (рис. 4, *a*). Дефект плохо различим при светлопольном методе освещения, хотя увеличение фотографий достаточно велико (порядка 800 крат). В темном поле (рис. 4, *б*) «светятся» края отверстия и продукты разрушения. При фокусировке на внутренние слои материала в светлом поле видны контуры поры, в темном поле проявляется характерное кольцо, состоящее из трех сегментов – изображение «вертолетика».

При исследовании материала из смолы Д20 с нанокристаллическим наполнителем также не все дефекты структуры проявляются в светлом поле (рис. 5, *a*). При освещении по методу темного поля (рис. 5, *б*) в материале формируются оптические фигуры в виде сферических полостей. В центре оптических фигур также наблюдается изображение «вертолетика». Присутствует также яркий ободок, сформированный фрагментами колец; этот эффект можно отнести за счет оптического взаимодействия света, распространяющегося внутри сферических дефектов.

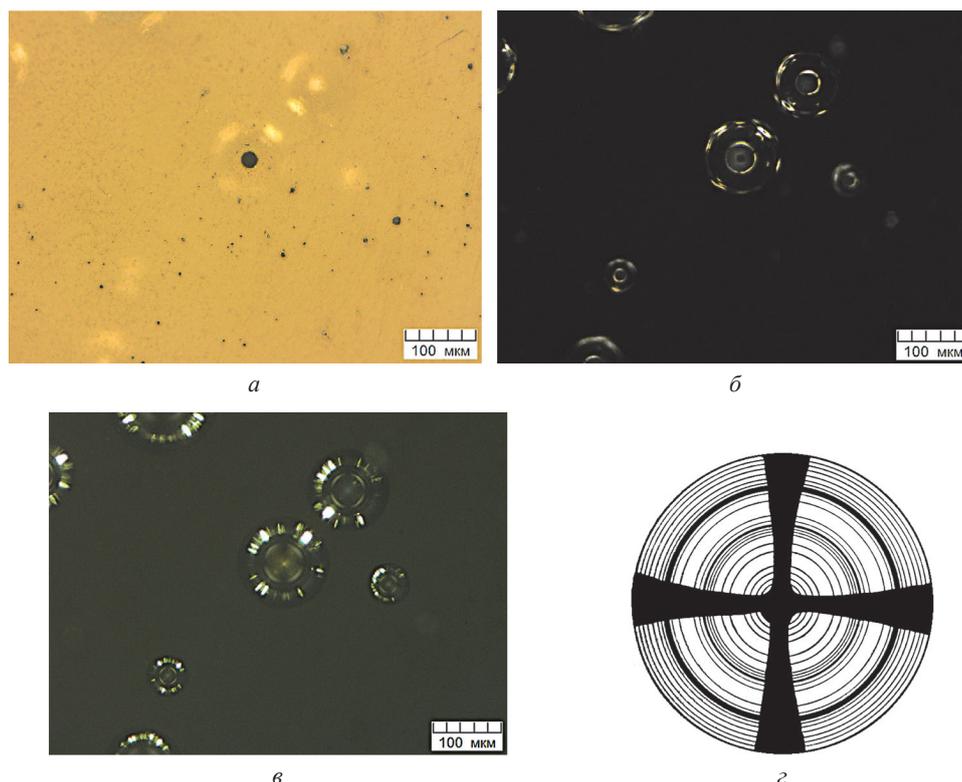


Рис. 5. Световые фигуры в слое эпоксидной смолы с нанокристаллическим наполнителем: *a* – светлое поле; *б* – темное поле; *в* – поляризованный свет; *г* – коноскопическая фигура одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси

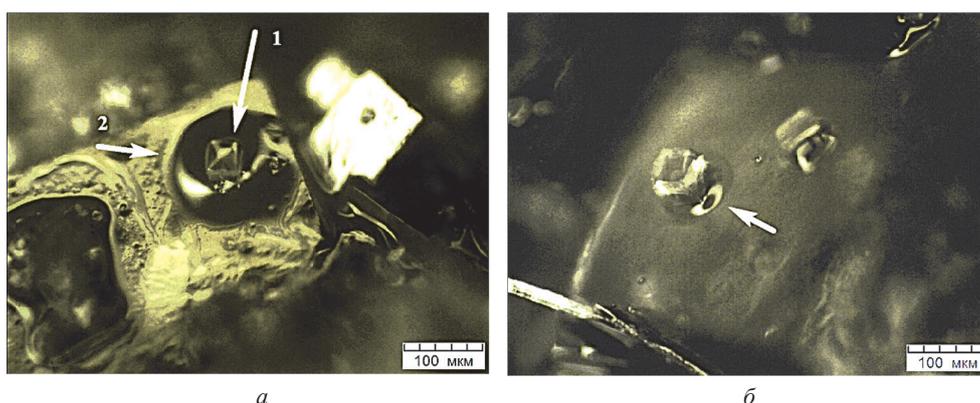


Рис. 6. Растущие кристаллы соли: *a* – начальная фаза роста; *б* – сформированный кристалл

В темном поле аналогичные эффекты можно наблюдать также на растущих кристаллах. На рис. 6 показаны кристаллы соли. В начальной стадии роста кристаллик 1 растет за счет подложки, на которой образуется кольцевой рельеф 2 (рис. 6, *a*). В процессе роста высота рельефа снижается и он не различим визуально. Но он формирует в темном поле световую фигуру, которая расположена под кристаллом и хорошо видна за счет высокой прозрачности соли (рис. 6, *б*).

Метод наблюдения в поляризованном свете (поляризационная микроскопия) служит как для микроскопических исследований минералов, так и для исследования структуры металлов и неметаллических материалов [2]. Традиционно в металлографии с применением поляризованного света изучают неметаллические включения в стали [3]. Поскольку определенная часть неметаллических включений оптически прозрачна, исследование основано на различии оптических свойств включения в разных направлениях, т. е. их оптической анизотропии [4]. Оптические свойства анизотропных микрообъектов различны в разных направлениях и проявляются по-разному в зависимости от ориентации этих объектов относительно оси объектива и плоскости поляризации света, падающего на них. Плоская поверхность образца и прозрачное включение по-разному взаимодействуют со световым потоком. Плоско поляризованный свет, отраженный от плоской поверхности, задерживается анализатором, поверхность выглядит темной. Часть света преломляется на внешней поверхности включения, проходит внутрь и, отражаясь на поверх-

ности включение-металл, выходит наружу, вновь испытывая преломление на внутренней поверхности, в результате чего включение освещено. Поэтому при скрещенном положении николей (поляризатора и анализатора) видно светлое изображение включения на темном фоне.

При исследовании кристаллов в сходящемся свете одноосный кристалл дает характерную световую фигуру, состоящую из темного креста, ветви которого, расширяющиеся к концам, параллельны главным сечениям николей [5]. В поле между ветвями креста могут быть видны концентрические кольца интерференционных цветов (рис. 6, з). Сферическая пора в оптически прозрачном неметаллическом материале в поляризованном свете проявляет эффекты, аналогичные таковым для одноосного кристалла (рис. 6, в). При скрещенных николях сферические дефекты образуют сложную оптическую фигуру. В центре формируется коноскопическая фигура, которая окружена ободком за счет взаимодействия лучей света, распространяющегося от разных сферических полостей.

Таким образом, металлографические методы оптического контрастирования позволяют обнаружение внутренних дефектов оптически прозрачных материалов. При этом формирование эффектов в темном поле обусловлено конструктивными особенностями объектива микроскопа. При исследовании в поляризованном свете формирование изображения на сферическом дефекте происходит аналогично таковому для одноосного кристалла.

Литература

1. **Анисович А. Г.** Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 1. С. 36–42.
2. **Анисович А. Г.** Применение поляризованного света в анализе металлов и сплавов / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. 2012. № 3(67). С. 146–151.
3. **Червяков А. Н.** Металлографическое определение включений в стали / А. Н. Червяков, С. А. Киселева, А. Г. Рыльникова. М.: Государственное научно-техническое изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1962. 248 с.
4. **Панченко Е. В.** Лаборатория металлографии / Е. В. Панченко и др. М.: Металлургия, 1965. 440 с.
5. **Татарский В. Б.** Кристаллооптика и иммерсионный метод / В. Б. Татарский. М.: Недра, 1965. 306 с.

References

1. **Anisovich A. G.** *Iskusstvo metallografii: ispol'zovanie metodov opticheskogo kontrastirovaniya* [Art of metallography: application of optical staining methods]. *Vesti Natsional'noy Akademii nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of physical-technical sciences*. 2016, no. 1, pp. 36–42.
2. **Anisovich A. G.** *Primenenie poljarizovannogo sveta v analize metallov i spлавov* [The use of polarized light in the analysis of metals and alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3(67), pp. 146–151.
3. **Cherviakov A. N., Kiseleva S. A., Rilnikova A. G.** *Metallograficheskoe opredelenie vkljuchenij v stali* [Metallographic revelation of inclusions in steel]. Moscow, Metallurgy Publ., 1962. 248 p.
4. **Panchenko E. V.** and oth. *Laboratorija metallografii* [Laboratory of metallographic]. Moscow, Metallurgy Publ., 1965, 440 p.
5. **Tatarsky V. B.** *Kristallooptika i immersionnyj metod* [Crystal optics and immersion method]. Moscow, Nedra Publ., 1965, 306 p.