



УДК 669.017+539.216

Поступила 8.11.2017

## ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ МИКРОСКОПИИ МЕТАЛЛОВ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

### OPTICAL EFFECTS AT METALLIC AND NONMETALLIC MATERIALS MICROSCOPY

*А. Г. АНИСОВИЧ, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru*

*A. G. ANISOVICH, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru*

*Рассмотрены оптические эффекты, возникающие на дефектах поверхности металлов, сплавов и оптически прозрачных материалов, при исследовании при различных способах освещения – светлого и темного поля, а также поляризованного света. Показано, что методы оптического контрастирования позволяют надежно определять дефекты поверхности металлических и неметаллических материалов, а также обнаружить дефекты в объеме оптически прозрачных материалов. Показана связь оптических эффектов с конструктивными особенностями объектива микроскопа при освещении по методу темного поля. Установлено, что при исследовании в поляризованном свете формирование изображения на сферическом дефекте происходит аналогично таковому для одноосного кристалла. Предложено схематическое представление оптических эффектов в различных материалах, позволяющее визуальную классификацию дефектов поверхности.*

*Optical effects arising on surface defects of metals, alloys and transparent materials are discovered in conditions of various illumination such as dark-field and bright-field illumination as well as polarized light. It is shown that the methods of optical contrasting let it possible to determine surface defects of metallic and nonmetallic materials as well as defects inside optically transparent materials. The connection between optical effects and design features of lens by the use of dark-field illumination was shown. It is established that picture generation of spherical defect came about by analogy to uniaxial crystal by the study using polarized light. The schematic diagram of optical effects for various materials to make visual classification of surface defects is suggested.*

**Ключевые слова.** Темнопольное освещение, поляризованный свет, оптически прозрачные материалы, металлические материалы.

**Keywords.** Dark-field illumination, polarized light, optically transparent materials, metallic materials.

Развитие технологий требует исследований материалов совершенно разных типов – металлов и сплавов, пластмасс, полимеров, стекол, покрытий и т. д. Кроме того, требуется детальный анализ трансформации структуры при различных видах воздействия на материалы. Все это обеспечивается возможностями современного металлографического оборудования, оснащенного разными средствами оптического контрастирования [1] – освещением по методу темного поля, поляризованным светом и др. Вместе с тем, использование современного оборудования означает получение структурно нагруженных изображений, на которых сочетаются как детали собственно структуры исследуемого материала, так и оптические эффекты разного происхождения. Причиной возникновения этих оптических эффектов могут быть как структурные факторы – ямки травления, включения фаз и границы зерен, так и дефекты структуры – пористость, кавитация, трещины, неметаллические включения. Оптические эффекты при микроскопии отраженного света проявляются в виде световых фигур различного вида и морфологии.

Исследование и описание таких эффектов является, прежде всего, задачей методологической. Достаточно подробно оптические эффекты были в свое время описаны для геологических образцов применительно к микроскопии прозрачных кристаллов [2]. Микроскопия металлических материалов (металлографический анализ) методом «на отражение» тогда не располагала настолько совершенными микроско-

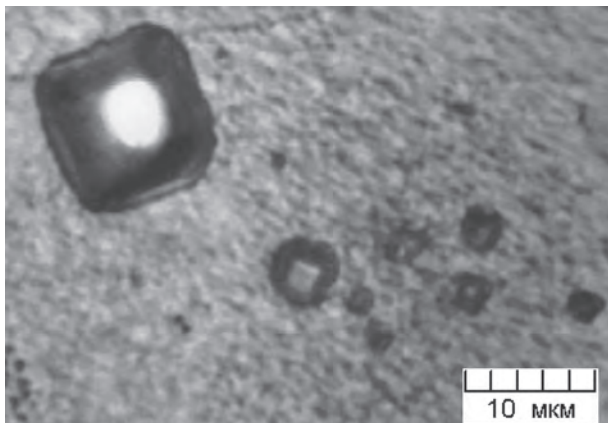


Рис. 1. Ямки травления в литой меди

в процессе металлографического травления. Ямки травления формируются в месте выхода дислокации на поверхность кристалла и закономерно ориентированы относительно кристаллографических направлений. Форма, величина и симметрия ямок травления определяются, помимо симметрии кристалла, составом и природой травящего реактива. Их формирование является достаточно сложным электрохимическим процессом и определяется соотношением скоростей растворения – вертикальной (в глубину), тангенциальной (поверхность), а также растворением на гранях кристалла [5]. Если зародыш растворения растет преимущественно в глубину, то формируется ямка травления, видимая в микроскоп как многогранник (рис. 1).

В идеальном случае ямка травления представляет собой правильную геометрическую фигуру – треугольник, квадрат, параллелограмм. Признаком того, что это действительно ямка травления, является световая (или оптическая) фигура, получаемая в поляризованном свете. В этом случае оптическая фигура аналогична формирующейся при прохождении поляризованного света через одноосный кристалл [6]. При этом наблюдается эффект (рис. 2, *a*), аналогичный явлению «темного креста». Форма его связана с геометрией ямки, которая, в свою очередь, определяется симметрией плоскости, которой принадлежит ямка травления. При совершенной форме ямки травления на ней можно увидеть муаровые узоры, формирующиеся на наклонных поверхностях (рис. 2, *б*).

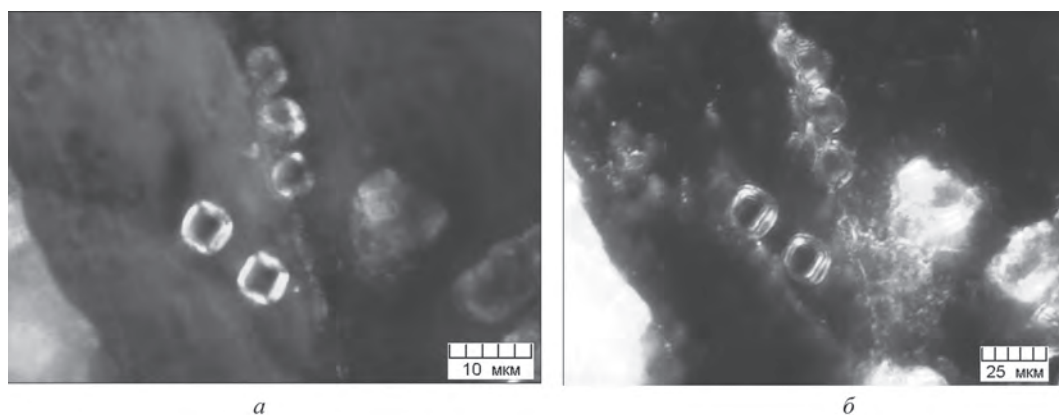
В некоторых случаях оптическая фигура служит единственным признаком, по которому можно идентифицировать ямки травления. На рис. 3 представлена структура литого сплава Al – 4% Cu после гомогенизации, закалки и старения [7]. На светлопольном изображении (рис. 3, *a*) внутри зерен видны включения, которые возможно принять за упрочняющую фазу. В поляризованном свете (рис. 3, *б*) по наличию оптических фигур видно, что «включения» представляют собой ямки травления.

Интенсивные внешние воздействия также приводят к появлению на поверхности материалов дефектов различного рода. Если они имеют правильную геометрическую форму, их возможно идентифицировать. На рис. 4 показана металлическая поверхность после воздействия лазера, на которой формируется развитый рельеф, детали которого затруднительно идентифицировать при освещении по методу светлого

пами. В настоящее время возможности оборудования могут и должны давать исчерпывающую информацию не только о структуре, но и о многочисленных дефектах и артефактах, признаками наличия которых являются, в том числе некоторые оптические эффекты, которые надо уметь определять.

Данная статья посвящена демонстрации и описанию оптических эффектов на поверхности металлических и неметаллических образцов при съемке «на отражение» с использованием поляризованного света [3] и освещением по методу «темного поля» [4].

Для металлов и сплавов известными дефектами поверхности являются ямки (или фигуры) травления. Они представляют собой правильно ограниченные углубления, образующиеся на поверхности кристаллов

Рис. 2. Оптические фигуры ямок травления в алюминии на плоскости {100}: *a* – поляризованный свет; *б* – темное поле

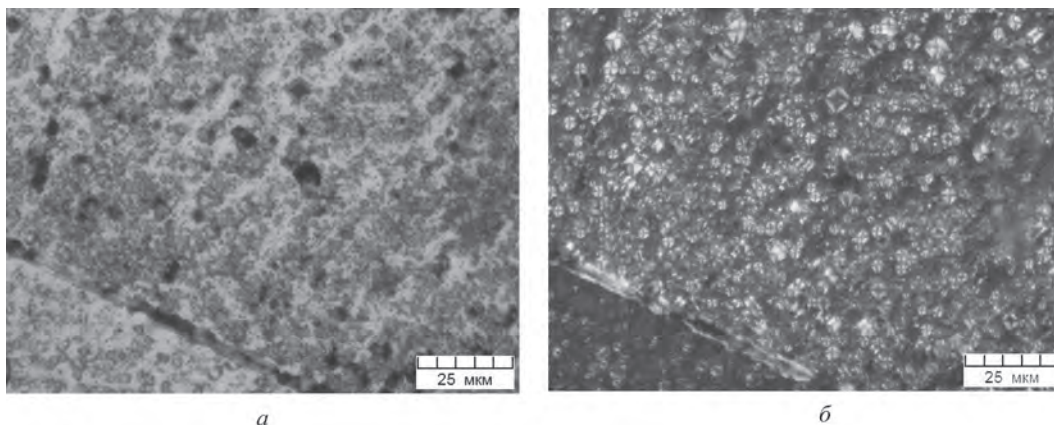


Рис. 3. Ямки травления в структуре сплава Al-4%Cu: *a* – светлоспольное освещение; *б* – поляризованный свет

поля (рис. 4, *a*). При большом увеличении (рис.4, *б*) в светлом поле на дефекте видны муаровые кольца. В поляризованном свете оптическая фигура от более совершенного по форме дефекта показывает темный крест с интерференционными полосами. Световая фигура аналогична получаемой на прозрачном шаровидном кристаллическом включении при его определенной ориентировке [3].

На дефектах неправильной формы также происходит формирование бликов и световых фигур неправильной формы. На рис. 5 приведены оптические фигуры для пор различной формы, образовавшихся на поверхности при нарушении технологии оксидирования. В поляризованном свете (рис. 5, *a*) на круглой поре наблюдается слабый эффект темного креста; более мелкие поры обнаруживаются по появлению четырех освещенных точек (стрелка). Так выглядят интерференционные кольца коноскопической фигуры при небольшом увеличении. При освещении в темном поле на дефекте правильной формы видны муаровые кольца (рис. 5, *б*).

Используя поляризованный свет, можно сделать выводы о форме прозрачных кристаллических включений. Если неметаллическое включение имеет правильную круглую форму, то на изображении структуры как в светлом, так и в темном поле появляются правильные концентрические муаровые кольца

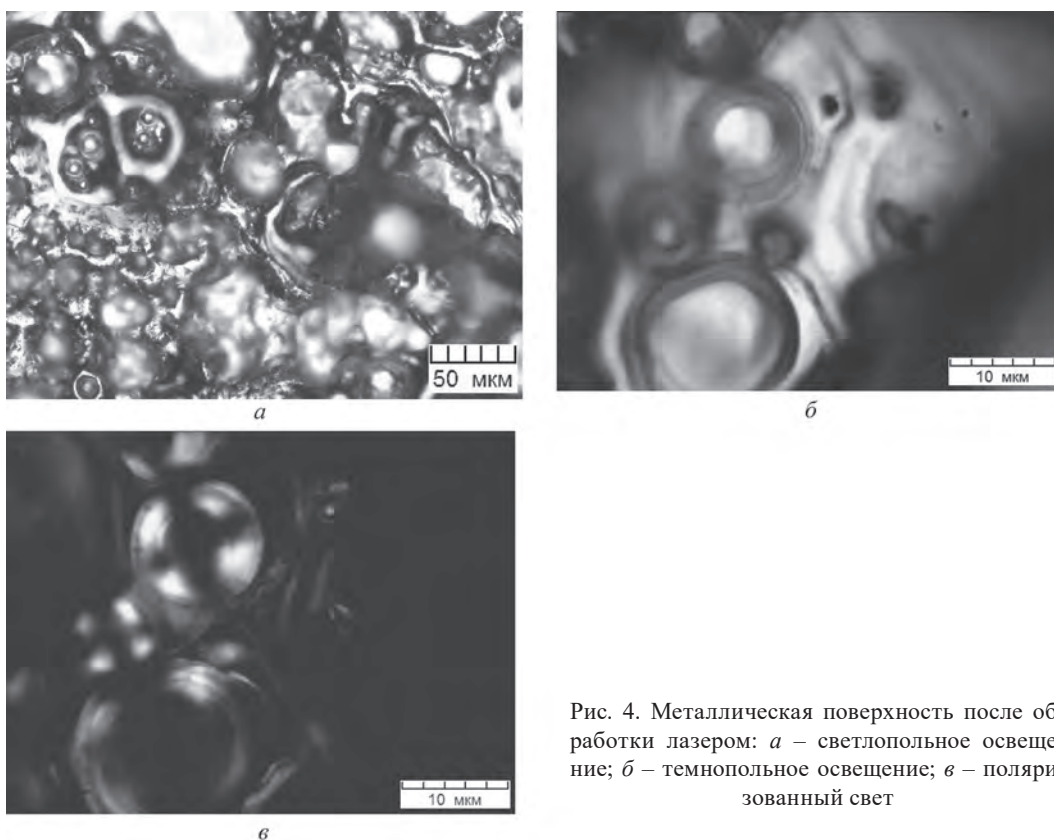


Рис. 4. Металлическая поверхность после обработки лазером: *a* – светлоспольное освещение; *б* – темнопольное освещение; *в* – поляризованный свет

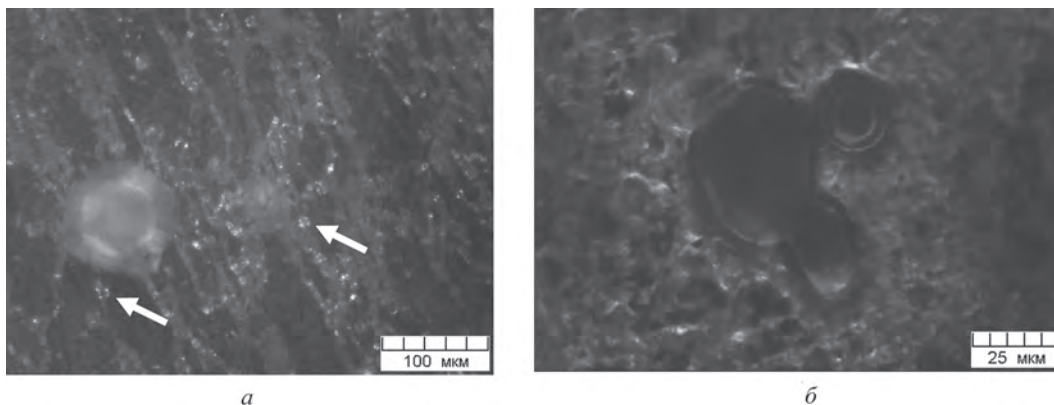


Рис. 5. Оптические фигуры для полусферической поры правильной формы: *а* – поляризованный свет; *б* – темное поле

ца, связанные с интерференцией лучей, отраженных от внутренней поверхности включения [3]. В поляризованном свете при скрещенных николях наблюдается эффект темного креста.

Оптические эффекты в окрашенных сферических включениях имеют аналогичные признаки, но, тем не менее, имеют некоторые особенности. В светлом поле муаровые полосы не наблюдаются (рис. 6, *а*), но, возможно, они просто не видны на фоне светлой металлической матрицы. В темном поле (рис. 6, *б*) муаровые полосы формируются в зоне наибольшей кривизны включения (периферическая часть); натуральный цвет включения при этом сохраняется. При освещении поляризованным светом эффект темного креста незначителен (рис. 6, *в*), хотя оптическая ось включения параллельна оси объектива (крест расположен в центре изображения включения). Очевидно, нечеткость световой фигуры связана с низкой прозрачностью включения. Применение поляризованного света позволяет заметить также, что, помимо крупного включения, в структуре присутствуют включения помельче (стрелка); интерференционные круги на оптической фигуре не видны и она воспринимается как совокупность четырех точек. В светлом поле такое включение воспринимается как дефект травления. В несферическом включении при освещении по методу темного поля формируется муаровый узор.

Эпоксидная смола является основой некоторых композиционных материалов. Формирование из нее твердого материала происходит в процессе длительного твердения после перемешивания, в процессе

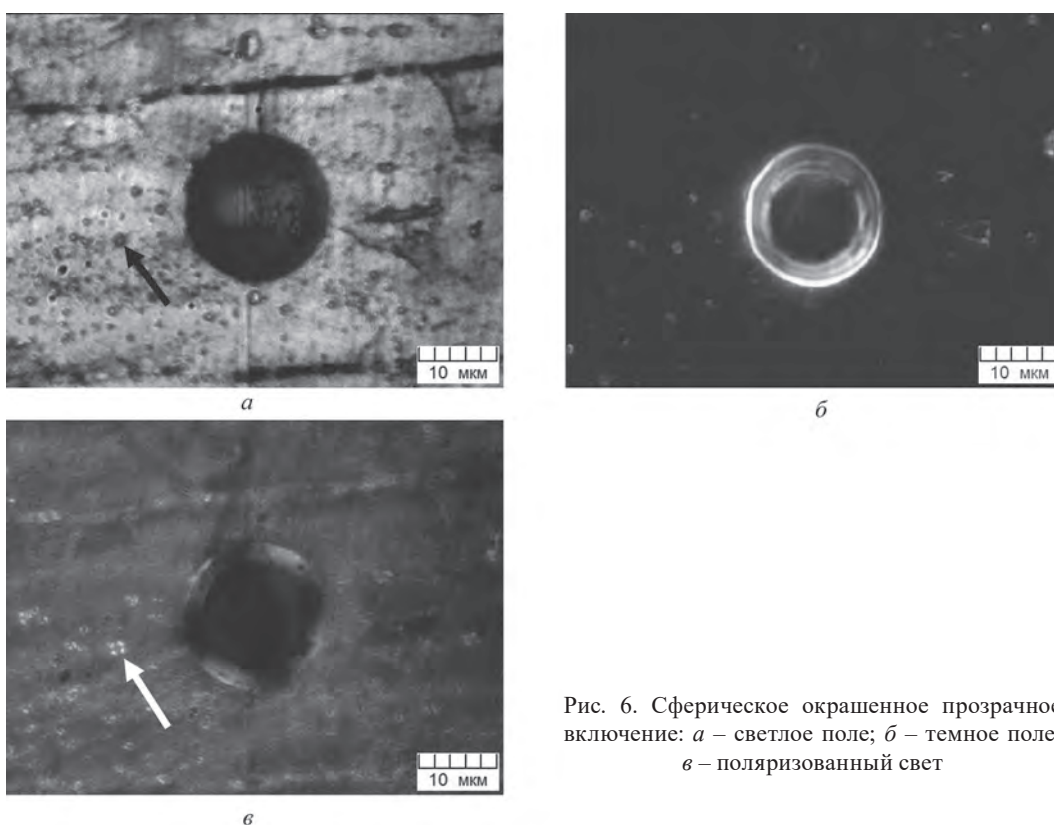


Рис. 6. Сферическое окрашенное прозрачное включение: *а* – светлое поле; *б* – темное поле; *в* – поляризованный свет

чего формируется неоднородная макроструктура. Дефектами такой структуры является пористость различной морфологии и дисперсности. Поскольку эпоксидная смола – оптически прозрачный материал, такого рода дефекты участвуют в формировании изображения при микроскопических исследованиях и применительно к данному объекту могут рассматриваться как артефакты. При этом существенно, на какой глубине данный артефакт формируется. При формировании сферической поры на поверхности материала (при диаметральном пересечении поры плоскостью поверхности) идентификация ее не представляет трудностей. В темном поле оптическая картина представляет собой чередующиеся окружности муарового узора.

В светлом поле сферические поры в объеме материала выглядят темными пятнами, четкость которых зависит от глубины залегания (рис. 7, а). В темном поле формируется специфическая световая фигура (рис. 7, б), частично представляющая собой проекцию конструктивного элемента объектива. Изображение проекции на плоскость светового пятна объектива при освещении по методу темного поля сформировано двумя освещенными кольцами [8]. Внутреннее кольцо представляет собой интерференционное

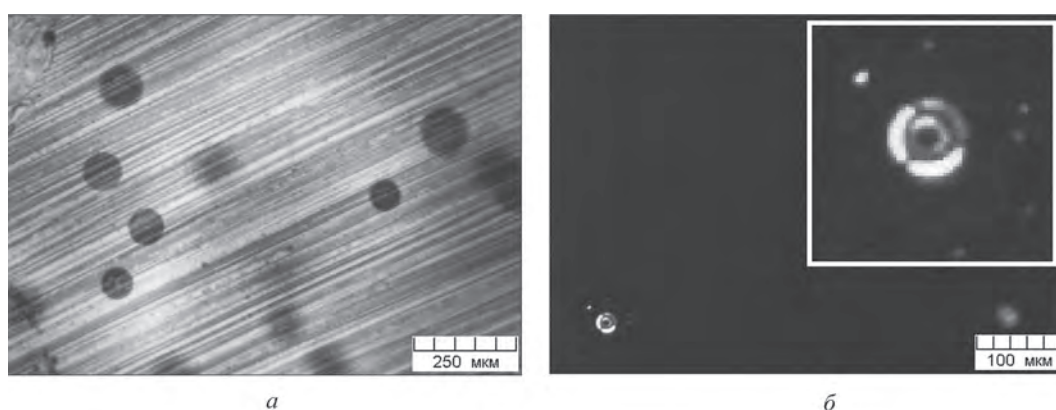


Рис. 7. Световые фигуры в эпоксидной смоле; поверхность шлифована и очищена: а – светлое поле; б – темное поле

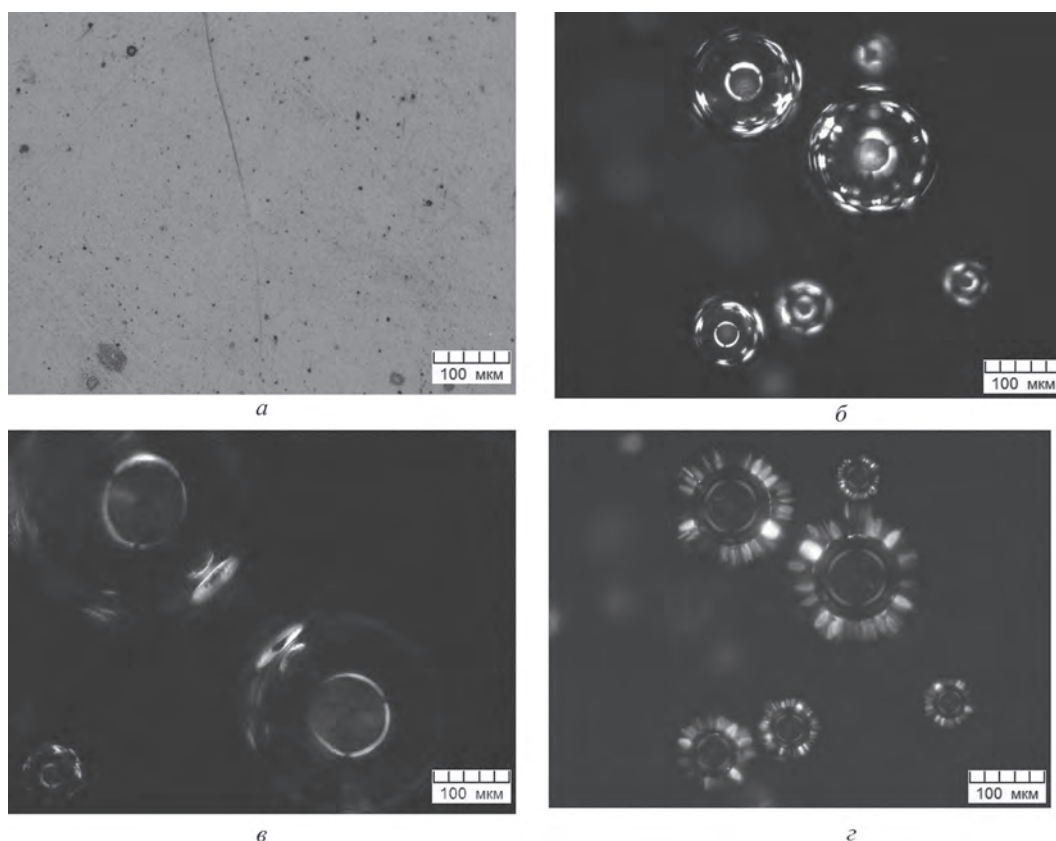


Рис. 8. Внутренняя пористость в оптически прозрачном материале: а – фокусировка на поверхность, светлое поле; б, в – темное поле, фокусировка на подповерхностные слои; г – поляризованный свет

кольцо за счет взаимодействия света с кольцевой внешней кромкой объектива. Внешнее кольцо, разделенное на три равных сегмента, является изображением крепления во внутренней части объектива для введения диафрагмы темного поля.

В зависимости от оптических свойств материала в нем возможно формирование оптических фигур различного вида. В эпоксидной смоле ЭД20 внутренние дефекты (рис. 8, а) не видны в светлом поле при фокусировке на поверхность. При фокусировке на подповерхностные слои проявляется оптический эффект от внутренних сферических дефектов (рис. 8, б). В темном поле в центре оптической фигуры находится изображение крепежного элемента объектива: периферическая часть оптической фигуры представлена световыми пятнами, расположенными на окружностях. При фокусировке на дефект (при максимальной резкости изображения в центре оптической фигуры) световые пятна трансформируются

Схематическое изображение оптических эффектов

Дефект	Светлое поле	Темное поле	Поляризованный свет
Прозрачное сферическое включение			
Прозрачное несферическое включение			
Полусферическая пора (поверхность)			
Несферическая пора (поверхность)			
Внутренняя сферическая пора	нет		
Ямки травления (пример для плоскостей {100})			

в кольцевые эффекты, визуально расположенные на диаметрах оптической фигуры (рис. 8, в). По-видимому, кольцевой эффект возникает в том случае, когда центры дефектов находятся на одной линии, параллельной поверхности.

При использовании поляризованного света (рис. 8, г) на месте дефекта формируется оптическая фигура, состоящая из темного креста в центре фигуры с неосвещенным центром, а также радиально расположенных лучей; при этом максимум освещенности находится напротив соседнего дефекта.

Представленное выше описание оптических эффектов позволяет систематизировать оптические эффекты и предложить их схематическое представление (см. таблицу).

### Литература

1. **Анисович А. Г.** Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 1. С. 36–42.
2. **Четвериков С. Д.** Методика кристаллооптических исследований шлифов. М.: Госгеоиздат, 1949. 157 с.
3. **Анисович А. Г.** Применение поляризованного света в анализе металлов и сплавов / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. 2012. № 3(67). С. 146–151.
4. **Анисович А. Г., Румянцева И. Н.** Искусство металлографии: возможности использования темнопольного изображения для анализа структуры металлов: Сб. материалов 4-й междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 19–21 октября 2009 г. Кн. 1. С. 7–12.
5. **Пшеничнов Ю. П.** Выявление тонкой структуры кристаллов: справ. М.: Металлургия, 1974. 528 с.
6. **Анисович А. Г., Румянцева И. Н.** Практика металлографического исследования материалов. Минск: Беларуская навук, 2013. 221 с.
7. **Топфенец Р. Л., Анисович А. Г.** Роль теплового и деформационного факторов в формировании структуры при термоциклировании сплава Al–Cu // Изв. РАН. Металлы. 2003. № 2. С. 30–34.
8. **Анисович А. Г.** Оптические эффекты при микроскопии неметаллических материалов // Литье и металлургия. 2017. № 1. С. 110–114.

### References

1. **Anisovich A. G.** Art of metallography: application of optical staining methods. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of physical-technical sciences*, 2016, no. 1, pp. 36–42.
2. **Chetvericov S. D.** *The study of section by the methods of crystal optics*. Moscow, Gosgocizdat Publ., 149. 157 p.
3. **Anisovich A. G.** The use of polarized light in the analysis of metals and alloys. *Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 146–151.
4. **Anisovich A. G., Rumiantseva I. N.** Art of metallography: the possibilities of dark field image used for metals structure analysis. *Collected articles 4 International scientific-technical conference «Advanced Methods and Technologies of Materials Development and Processing»*. Minsk, 19–21 oktober 2009, pp. 7–12.
5. **Pchenichnov Ju. P.** *Revelation of fine structure of crystals*. Moscow, Metallurgy Publ., 1974.
6. **Anisovich A. G., Rumiantseva I. N.** *Practice of materials metallographic examination*. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2013. 221 p.
7. **Topfenetz R. L., Anisovich A. G.** The roles of factors of heat and deformation in Al-Cu structure formation by thermal cycling. *Russian metallurgy (Metally)*, 2003, no. 2, pp. 30–34.
8. **Anisovich A. G.** Optical effects at nonmetallic materials microscopy. *Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 1, pp. 111–114.