



УДК 543.42

## АНТИПРОДУКЦИЯ: ПРОБЛЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ

*А. Г. АНИСОВИЧ, Институт прикладной физики НАН Беларуси,  
г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 16. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru.*

*Обсуждаются вопросы анализа неметаллических включений в сталях. Рассмотрены оптические эффекты, возникающие в поляризованном свете на неметаллических включениях, артефактах металлографической пробоподготовки, а также некоторых деталях и дефектах микроструктуры. Показано, что при максимальных увеличениях до 2000 крат не всегда возможно идентифицировать кристаллические включения, в частности силикатов. Проиллюстрировано сходство оптических эффектов на кристаллических включениях, с одной стороны, и каплях воды, порах и ямках травления – с другой.*

**Ключевые слова.** *Сталь, неметаллические включения, оптические эффекты, поляризованный свет, микроскопия.*

## ANTI-PRODUCTS: THE PROBLEM OF DETECTING NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEEL

*A. G. ANISOVICH, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Belarus, 16, Akademicheskaya str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru.*

*The issues of analyzing non-metallic inclusions in steels are discussed. The optical effects arising in polarized light on non-metallic inclusions, artifacts of metallographic sample preparation, as well as some details and defects of the microstructure are considered. It is shown that at maximum magnifications up to 2000x, it is not always possible to identify crystalline inclusions, in particular, silicates. The similarity of optical effects on crystalline inclusions, on the one hand, and water droplets, pores, and etching pits, on the other, is illustrated.*

**Keywords.** *Steel, non-metallic inclusions, optical effects, polarized light, microscopy.*

### Введение

Неметаллические включения являются продуктом физико-химических процессов, протекающих при выплавке стали, и рассматриваются как ее структурные составляющие. Они оказывают существенное влияние на свойства как полуфабрикатов, так и готовых изделий [1–3]. Неметаллические включения разнообразны по химическому составу, структуре, форме и размерам, физико-химическим и оптическим свойствам, а также топографии – распределению в структуре металла.

Изучение структуры и свойств неметаллических включений является неотъемлемой частью металлографических исследований разнообразных сталей [4]. Первый шаг в подобных изысканиях – обнаружение включений как таковых. Важность этой проблемы осознана металловедами и металлургами очень давно, и литература, посвященная данной теме, имеет уже вековую историю [5, 6]. Основные исследования проведены в 1950–60-е гг., но актуальны и сегодня. Учитывая большую практическую значимость данного вопроса, его научное изучение активно продолжается [7].

Современное развитие металлографии дает возможность использовать существенно большие увеличения, компьютерный анализ и регистрацию изображений, что позволяет фиксировать во всем многообразии не только структуру стали, но также брак и металлографические артефакты различного происхождения [8–10]. Таким образом, появилась возможность исследовать объекты, ранее недоступные для анализа, и создавать разнообразную справочную литературу.

Данная статья посвящена вопросам обнаружения неметаллических включений в стали при использовании поляризованного света. Современные металлографические комплексы позволяют работать с увеличением до 3000 крат, что существенно расширяет возможности анализа. Однако при этом возрастает важность умения отличать артефакты от особенностей структуры. Металлографические комплексы

оснащены различными опциями контрастирования, позволяющими визуализировать особенности морфологии поверхности образца. Развитие технологий дает возможность получать материалы с более дисперсной структурой. Но то же касается и неметаллических включений.

### Материалы и методики эксперимента

Исследования выполнены на металлографическом комплексе на основе инвертированного микроскопа МИ-1, оснащенного программой обработки изображений AXALIT (разработчик «Аксалит Софт») для фотографирования и количественной обработки данных. Использован анализ в светлом поле и поляризованном свете. Шлифы изготавливали по общепринятой методике. Травление на микроструктуру произведено ниталем. Использованы материалы хоздоговорных работ Института прикладной физики НАН Беларуси с предприятиями Республики Беларусь за 2022–2024 гг.

### Основная часть

В последнее время участились случаи брака по признаку избыточного количества неметаллических включений, наличие которых является причиной облома, в частности зубчатых передач (рис. 1).

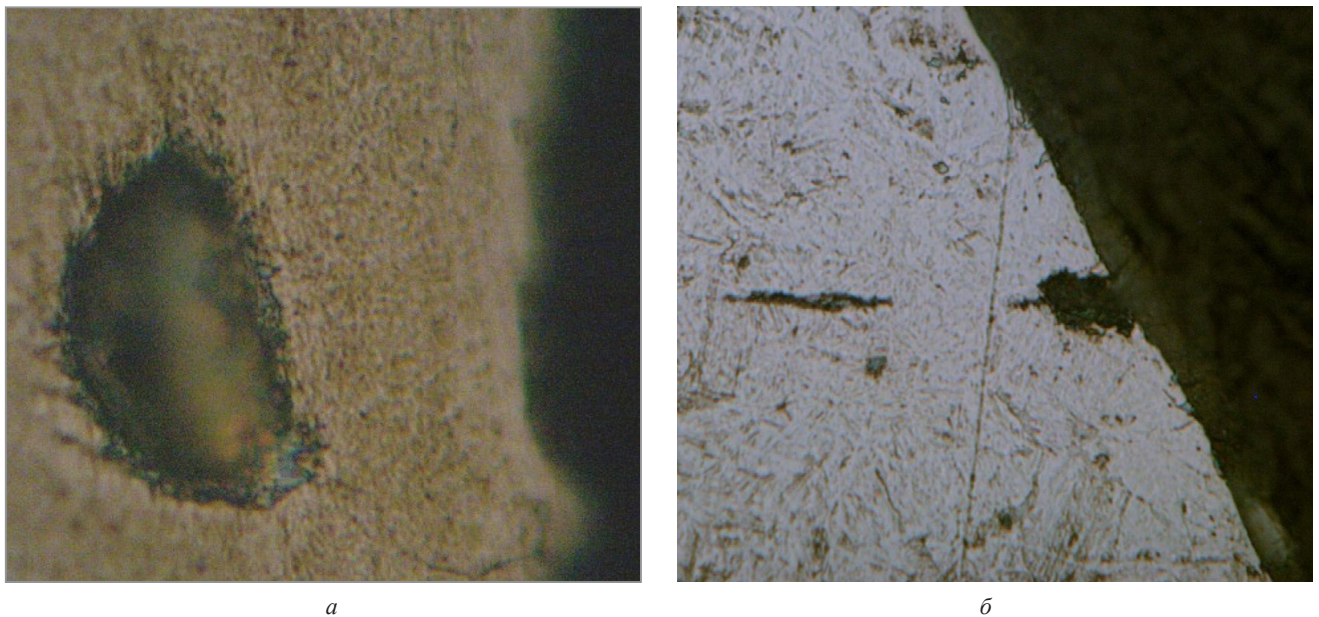


Рис. 1. Формирование трещин около неметаллических включений на кромке деталей:  
*a* – оксидное включение, сталь 25ХГТ; *б* – оксидное включение и строчечность, сталь 25ХГТ

Наиболее распространены оксидные включения (рис. 2), балл которых может достигать 4–5 по ГОСТ 1778–2022. В то же время в металле, поставляемом для различных предприятий, достаточно часто выявляют неметаллические включения на основе кремния. В качестве примера на рис. 3 показано сложное включение кремнеземистого стекла. Сталь, содержащая повышенное количество неметаллических включений (типа стекла), показывает значительный износ инструмента при обработке. По сделанным оценкам, при хорошем качестве металла инструмент обрабатывает партию изделий в 30 шт., тогда как для стали, структура которой показана на рис. 2, 3, это количество составляет 2 шт.

Вышеприведенные дефекты в целом имеют размер, который позволяет идентифицировать их при увеличениях от 100 до 1500 крат. Достаточно надежно определяются кристаллические включения в светлом поле (рис. 4, *a*), а также поляризованном свете (рис. 4, *б*) по характерному темному кресту [11]. В соответствии с [12] оптический крест дают в поляризованном свете, в частности глобулярные прозрачные включения силикатов. Формирование темного креста является доказательством наличия кристаллического включения.

Включения силикатов при освещении по методу светлого поля показаны на рис. 5, *a*. В поляризованном свете одноосный кристалл дает световую фигуру с характерным темным крестом, ветви которого, расширяющиеся к концам, параллельны главным сечениям николей [11] (рис. 5, *б*). В поле между ветвями креста видны концентрические кольца интерференционных цветов, повышающихся от центра к периферии. Контраст концентрических колец и темного креста зависит от совершенства формы включения [6].

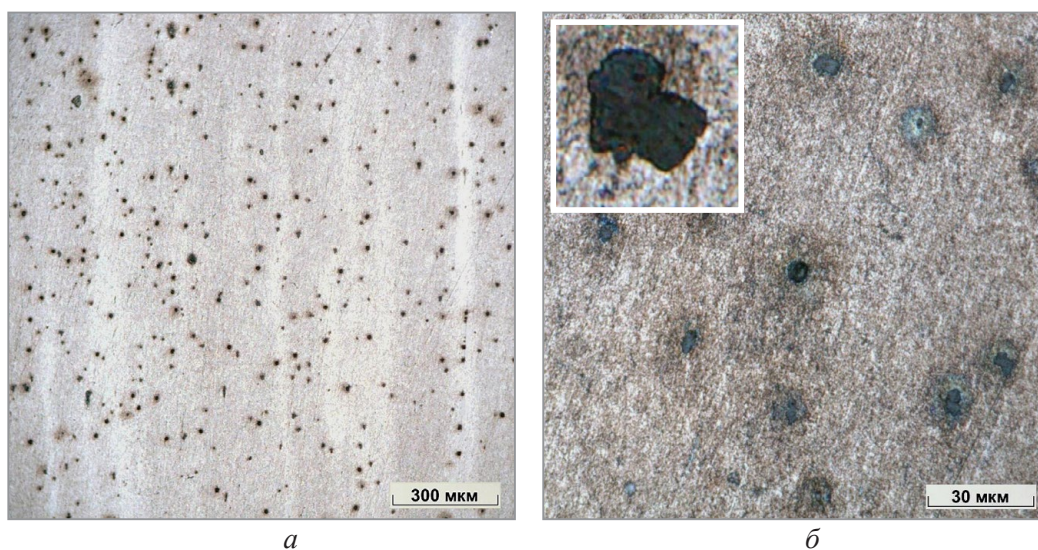


Рис. 2. Оксидные включения в стали 38ХМЮА:  
*a* – включения на фоне полосчатости, слабое травление.  $\times 100$ ; *b* – расплав вокруг включений.  $\times 1000$

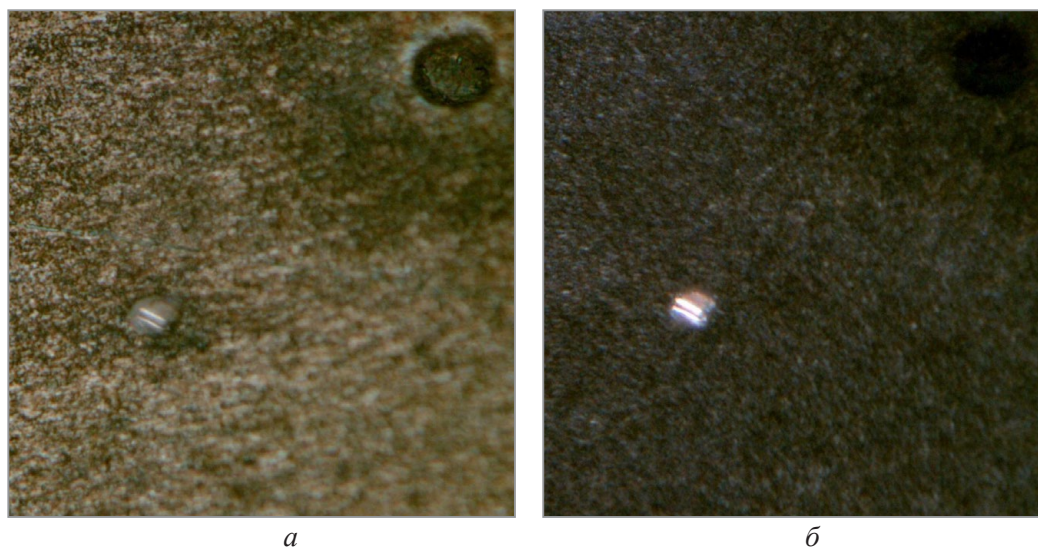


Рис. 3. Включение кремнеземистого стекла с  $\beta$ -кристобалитом игольчатой формы:  
*a* – светлое поле; *b* – поляризованный свет; сталь 38ХМЮА

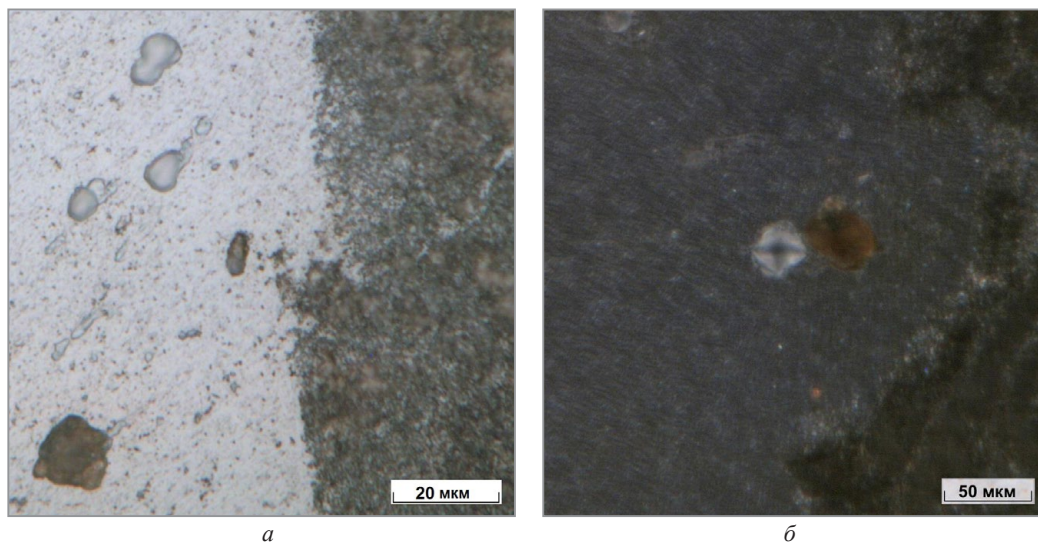


Рис. 4. Структура стали 20ХНЗА (состояние поставки): *a* – светлое поле; *b* – поляризованный свет

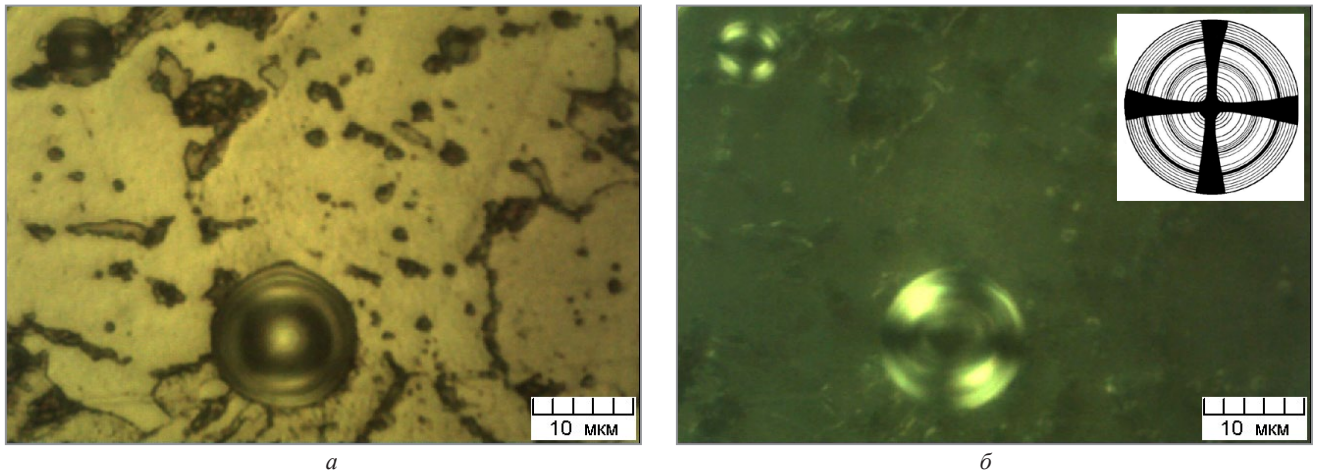


Рис. 5. Шаровидные прозрачные включения силикатов:  
*a* – в светлом поле; *б* – в поляризованном свете, схема коноскопической фигуры

Вопрос обнаружения стекловидных включений связан с высокой дисперсностью самих включений; наличием оптических эффектов на фазовых составляющих; присутствием различных артефактов, обусловленных качеством поверхности шлифов и травлением; дефектами структуры.

Вышесказанное проиллюстрировано на рис. 6. После термической обработки сталь имеет собственную мелкую структуру, поэтому мелкие стекловидные включения в светлом поле заметны плохо (рис. 6, *a*). В поляризованном свете (рис. 6, *б*) точно установлено присутствие включения (стрелка), но на пределе возможностей микроскопа. Рядом с ним светятся еще включения, вероятно такие же, но это установить трудно по причине их размера и ориентации относительно плоскости шлифа. Также могут подсвечиваться фрагменты структуры. Крупное светящееся пятно – домовая пыль. Кроме того, видны включения кремнеземистого стекла, серые в светлом поле и темные в поляризованном свете. Присутствуют также радужные пятна, связанные с пористостью на границе металла, и включения [8].

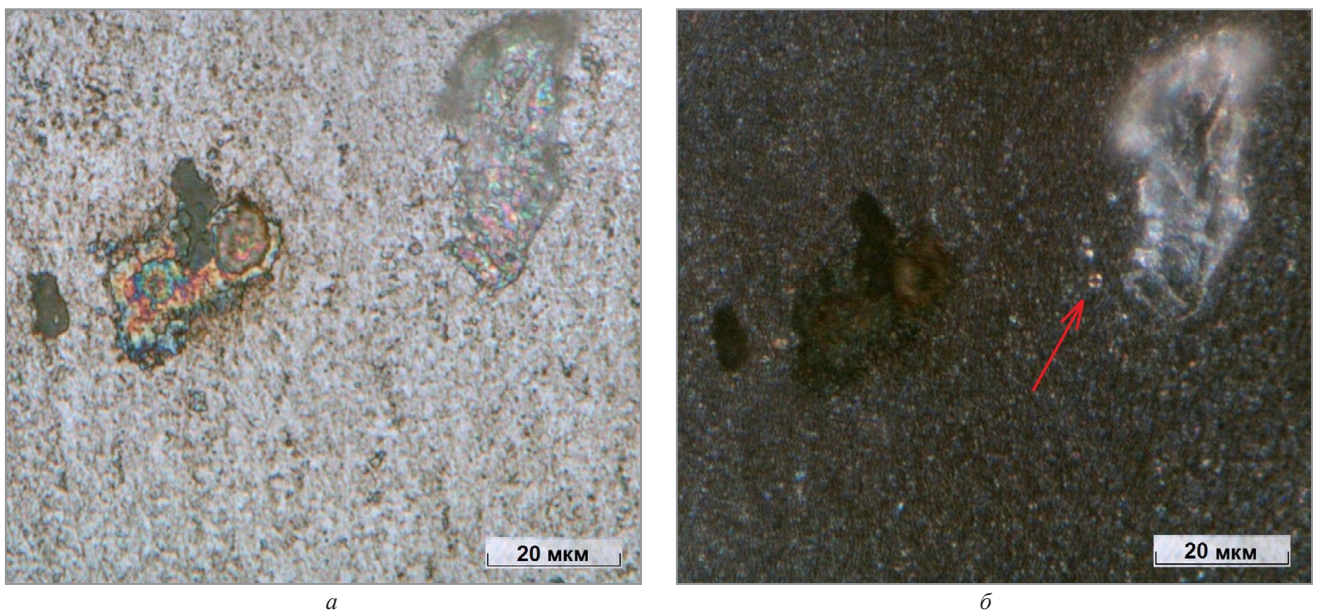


Рис. 6. Структура стали 38ХМЮА после закалки и высокого отпуска:  
*a* – светлое поле; *б* – поляризованный свет.  $\times 1500$

В отсутствие травления на участке с дефектами препарирования (рис. 7) видно, что оптические эффекты формируются в том числе на царапинах и пятнах воды [8], и отделить эффекты на включениях практически невозможно. На рис. 8 показаны оптические эффекты на высохших каплях воды различной формы.

Оптические эффекты в поляризованном свете формируются на определенных дефектах поверхности, имеющих относительно правильную форму (рис. 9), в частности полусферических порах [13], а также ямках травления [9].

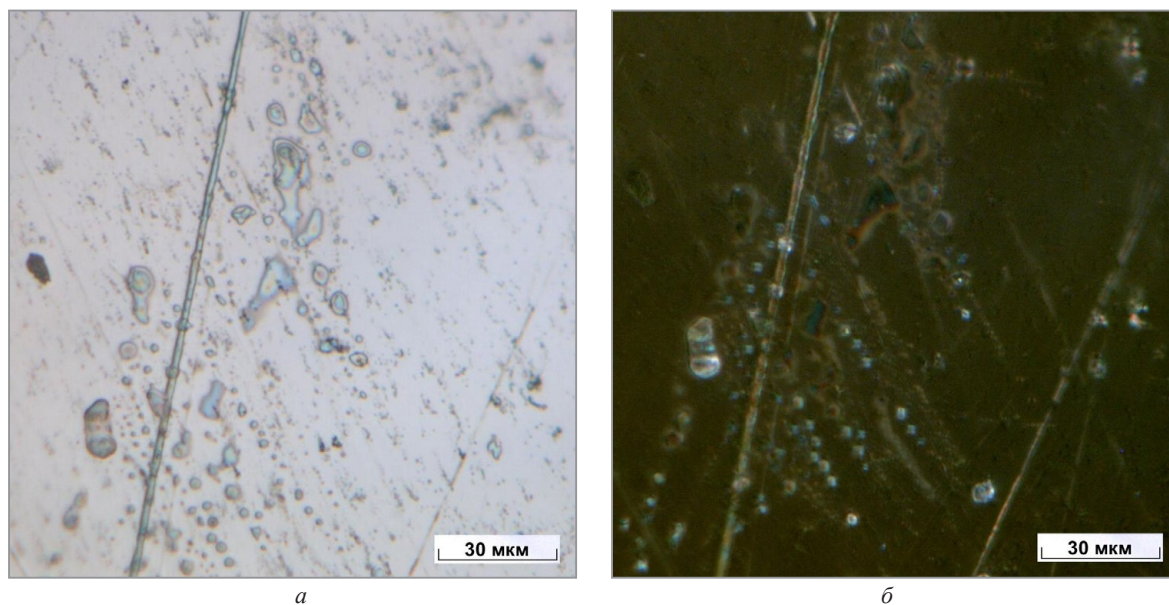


Рис. 7. Участок поверхности шлифа с царапинами и пятнами воды: *a* – светлое поле; *б* – поляризованный свет

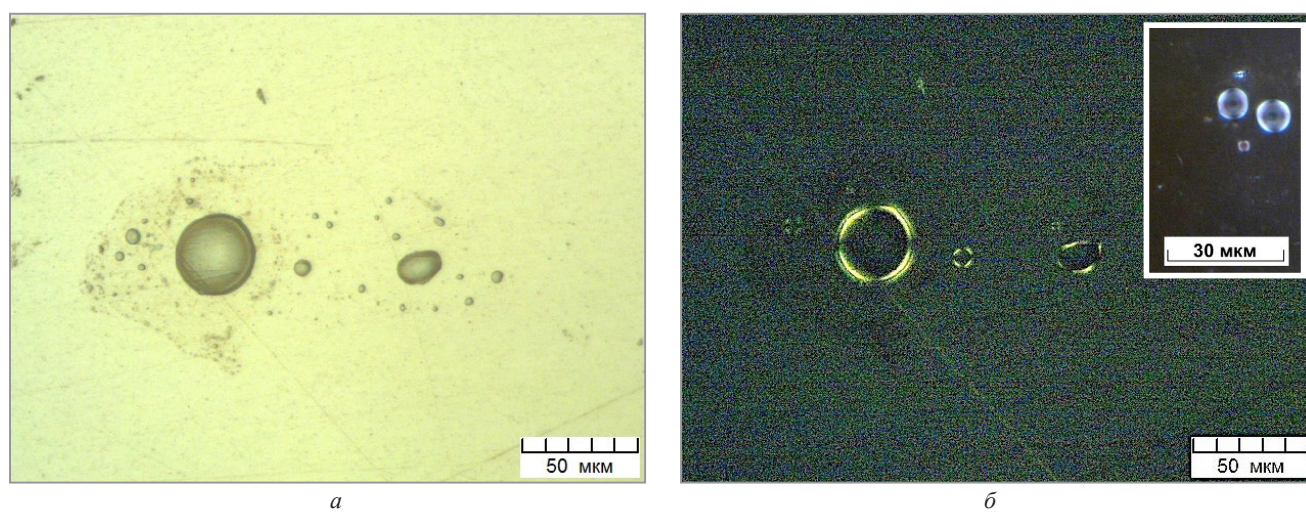


Рис. 8. Оптические эффекты на каплях воды: *a* – светлое поле; *б* – поляризованный свет

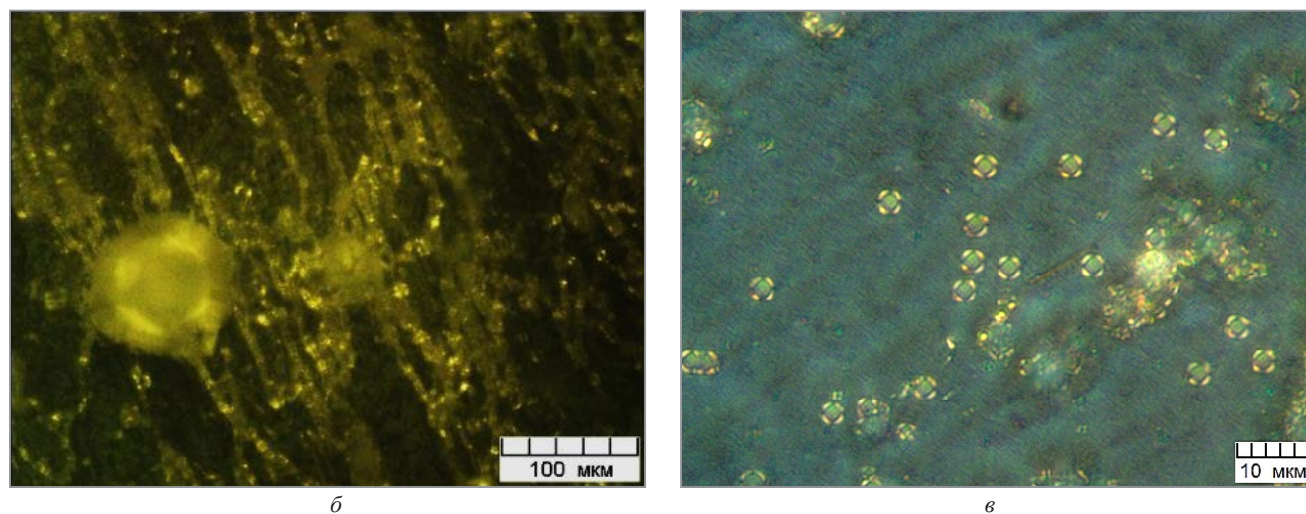


Рис. 9. Оптические эффекты в поляризованном свете:  
*a* – пористость в сплаве Д16 при нарушении регламента оксидирования;  
*б* – ямки травления на поверхности гальванического покрытия после травления.  $\times 1500$

### Выводы

Современное металлографическое оборудование с применением поляризованного света позволяет надежно идентифицировать мелкие неметаллические включения (силикаты) при увеличениях до 1500–2000 крат. При этом следует учитывать, что дефекты препарирования и детали микроструктуры могут создавать в поляризованном свете оптические эффекты, сходные с эффектами для кристаллических неметаллических включений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас микроструктур неметаллических включений / В. П. Пирожкова [и др.]. – Запорожье: Днепропетровский металлург, 2012. – 167 с.
2. **Симачев, А. С.** Влияние неметаллических включений рельсовой стали на высокотемпературную пластичность / А. С. Симачев, Т. Н. Осколкова, М. В. Темлянец // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 134–137.
3. Влияние неметаллических включений на сопротивление стали разрушению при многократном динамическом сжатии / А. И. Попелух [и др.] // Материаловедение. – 2017. – № 2. – С. 67–78.
4. **Григорович, К. В.** Анализ неметаллических включений – основа контроля качества стали и сплавов / К. В. Григорович, П. В. Красовский, А. С. Трушников // Аналитика и контроль. – 2002. – № 2. – С. 133–142.
5. **Червяков, А. Н.** Металлографическое определение включений в стали / А. Н. Червяков, С. А. Киселев, А. Г. Рыльникова. – М.: Металлургиздат, 1962. – 248 с.
6. Лаборатория металлографии / Е. В. Панченко [и др.]; под ред. Б. Г. Лившица. – М.: Металлургия, 1965. – 440 с.
7. **Губенко, С. И.** Неметаллические включения в стали / С. И. Губенко, С. П. Ошкадеров. Киев: Наукова думка, 2016. – 528 с.
8. **Анисович, А. Г.** Артефакты в металлографии: пятна на поверхности шлифов / А. Г. Анисович // Литейщик России. – 2024. – № 3. – С. 37–43.
9. **Анисович, А. Г.** Артефакты в металлографии: ямки травления / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 112–117.
10. **Анисович, А. Г.** Артефакты в металлографии: пыль / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 93–98.
11. **Татарский, В. Б.** Кристаллооптика и иммерсионный метод / В. Б. Татарский. – М.: Недра, 1965. – 306 с.
12. **Левин, Е. Е.** Микроскопическое исследование металлов / Е. Е. Левин. – Л.: Машгиз, 1951. – 176 с.
13. **Анисович, А. Г.** Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Вesci НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 36–42.

### REFERENCES

1. **Pirozhkova V. P., Yatsenko M. Yu., Lunev V. V., Grishchenko S. G.** Atlas mikrostruktur nemetallicheskih vklyuchenij [Atlas of microstructures of non-metallic inclusions]. Zaporozhye, Dneprovsky metallurgist Publ., 2012, 167 p.
2. **Simachev A. S., Oskolkova I. N., Temlyantsev M. V.** Vliyanie nemetallicheskih vklyuchenij rel'sovoj stali na vysokotemperaturnuyu plastichnost' [Influence of non-metallic inclusions in rail steel on its high-temperature plasticity]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2016, no. 59, pp. 134–137.
3. **Popelyukh A. I., Veselov S. V., Munkueva D. D., Timonin V. V., Karpov V. N.** Vliyanie nemetallicheskih vklyuchenij na soprotivlenie stali razrusheniyu pri mnogokratnom dinamicheskom szhatii [Influence of nonmetallic inclusions on the fracture resistance of steel under fatigue dynamic compression conditions]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 2, pp. 67–78.
4. **Grigorovich K. V., Krasovsky K. V., Trushnikova A. S.** Analiz nemetallicheskih vklyuchenij – osnova kontrolya kachestva stali i spлавov [Analysis of non-metallic inclusions – the basis for quality control of steel and alloys]. *Analitika i kontrol' = Analytics and control*, 2002, no. 2, pp. 133–142.
5. **Chervyakov A. N., Kiselev S. A., Rylnikova A. G.** Metallograficheskoe opredelenie vklyuchenij v stali [Metallographic determination of inclusions in steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962, 248 p.
6. **Panченко E. V. [et al.], Livshits B. G. (ed.)** Laboratoriya metallografii [Metallography Laboratory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1965, 440 p.
7. **Gubenko S. I., Oshkaderov S. P.** Nemetallicheskie vklyucheniya v stali [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 2016, 528 p.
8. **Anisovich A. G.** Artefakty v metallografii: pyatna na poverhnosti shlifov [Artifacts in metallography: spots on the surface of polished sections]. *Liteyshchik Rossii = Foundry worker of Russia*, 2024, no. 3, pp. 37–43.
9. **Anisovich A. G.** Artefakty v metallografii: yamki travleniya [Artifacts in metallography: etching pits]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 112–117.
10. **Anisovich A. G.** Artefakty v metallografii: pyl' [Artifacts in metallography: dust]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 93–98.
11. **Tatarsky V. B.** Kristallooptika i immersionnyj metod [Crystal optics and immersion method]. Moscow, Nedra Publ., 1965, 306 p.
12. **Levin E. E.** Mikroskopicheskoe issledovanie metallov [Microscopic study of metals]. Leningrad, Mashgiz Publ., 1951, 176 p.
13. **Anisovich A. G.** Iskusstvo metallografii: ispol'zovanie metodov opticheskogo kontrastirovaniya [Art of metallography: application of optical staining methods]. *Vesci NAN Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk = Processings of the National Academy of Sciences of Belarus. Ser. physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 36–42.