



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-69-79>
УДК 543.42

Поступила 18.02.2025
Received 18.02.2025

АНТИПРОДУКЦИЯ: К ВОПРОСУ 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 1500 крат не всегда возможно визуализировать кристаллические неметаллические включения. Проиллюстрировано сходство оптических эффектов на кристаллических включениях, каплях воды, порах и ямках травления. Показано, что в этой связи возрастает роль дополнительных опций оптических микроскопов, расширяющих возможности оптического контрастирования, что дает возможность распознавания разнообразных металлографических артефактов. При этом оснащение лабораторий современным металлографическим оборудованием, в первую очередь объективами высокого увеличения, а также разнообразными средствами оптического контрастирования имеет первостепенное значение.

Ключевые слова. Сталь, неметаллические включения, оптические эффекты, поляризованный свет, оптическая микроскопия.
Для цитирования. Анисович, А. Г. Антипродукция: к вопросу обнаружения неметаллических включений в стали / А. Г. Анисович // Литие и металлургия. 2025. № 3. С. 69–79. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-69-79>.

ANTI-PRODUCTION: ON THE ISSUE OF DETECTING NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEEL

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

The article discusses the issues of non-metallic inclusions analysis in steels. The article examines optical effects arising in polarized light on non-metallic inclusions, artifacts of metallographic sample preparation, and some details and defects of the microstructure. It is shown that at maximum magnifications of up to 1500 times it is not always possible to visualize crystalline non-metallic inclusions. The article illustrates the similarity of optical effects on crystalline inclusions, water droplets, pores, and etch pits. It is shown that in this regard, the role of additional options of optical microscopes increases, expanding the possibilities of optical contrasting, which makes it possible to recognize various metallographic artifacts. At the same time, equipping laboratories with modern metallographic equipment, primarily high-magnification objectives, as well as various means of optical contrasting is of paramount importance.

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

For citation. Anisovich A. G. Anti-production: on the issue of detecting non-metallic inclusions in steel. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 3, pp. 69–79. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-69-79>.

Введение

Неметаллические включения являются продуктом физико-химических процессов, протекающих при выплавке стали, и рассматриваются как их структурные составляющие. Они оказывают существенное влияние на свойства как полуфабрикатов, так и готовых изделий [1–4]. Неметаллические включения разнообразны по химическому составу, структуре, форме и размерам, физико-химическим и оптическим свойствам, а также топографии – распределению в структуре металла. Для борьбы с неметаллическими включениями развиваются методы управления структурой, в частности вакуумирование [5], модифицирование сложными лигатурами [6] и т. д.

Из-за негативного влияния неметаллических включений на свойства сталей изучение структуры и свойств таких включений – неотъемлемая часть металлографических исследований [7]. Первым этапом является обнаружение неметаллических включений как таковых. Важность этой проблемы осознана металловедами и металлургами очень давно, и литература, посвященная данной теме, имеет уже вековую историю [8, 9]. Основные исследования в данной сфере проведены в 1950–1960-е гг., но их результаты

актуальны и сегодня. Учитывая большую практическую значимость данной тематики, исследования в данном направлении активно продолжаются [10], в том числе и в Республике Беларусь [11, 12].

Приборная база металлографических исследований постоянно совершенствуется, и в настоящее время имеются широкие возможности для обнаружения и исследования неметаллических включений. В первую очередь эти возможности обеспечиваются существенно большими увеличениями по сравнению с тем, что было 30–50 лет назад. Микроскопы оснащены средствами цифровой регистрации изображений, что существенно повышает производительность металлографических исследований. Это позволяет фиксировать во всем многообразии не только структуру стали, но также брак и металлографические артефакты различного происхождения [13–15]. Поэтому можно исследовать объекты, ранее не доступные для анализа, а также создавать широкий спектр справочной литературы по рассматриваемому вопросу.

Современные осветительные системы микроскопов позволяют получить высококонтрастные и равномерно освещенные изображения. Соответственно этому совершенствуются осветительные устройства для отраженного света. В основе действия обычного оптического микроскопа лежит, как правило, способность различных участков препарата в различной степени абсорбировать свет. В природе многих объектов имеют место и другие физические явления. Применение их в микроскопии дает возможность расширить круг исследований и, тем самым, увеличить объем получаемой информации. Осуществление этой задачи в свое время стало причиной введения в микроскоп дополнительных опций для оптического контрастирования, поэтому современные металлографические микроскопы имеют достаточно возможностей для идентификации деталей структуры. Чаще всего это разнообразные методы освещения [16], среди которых:

- диафрагмирование при анализе в светлом поле (светлопольная микроскопия);
- освещение полым конусом света (темнопольная микроскопия);
- освещение цветным (хроматическим) светом;
- освещение поляризованным светом;
- интерференционное контрастирование объекта.

Взаимодействие этих методов в одном исследовании позволяет установить характер наблюдаемых оптических эффектов на поверхности металлов и неметаллических материалов и сделать определенное заключение о причинах их возникновения.

Метод исследования в поляризованном свете уже давно применяется для изучения анизотропных объектов, т.е. объектов, у которых оптические свойства неодинаковы по различным направлениям, что дает возможность использовать для анализа основные виды оптической анизотропии [17]:

- двойное лучепреломление. В частности, это рассматривалось в [18] для описания метода дифференциально-интерференционного контраста;
- анизотропию поглощения (плеохроизм). Проявляется в том, что свет, проходящий через среду, поглощается по-разному в зависимости от ориентации плоскости поляризации и направления распространения, что влечет за собой изменение окраски плеохроичного объекта с изменением направления;
- оптическую активность, т.е. способность поворачивать плоскость поляризации проходящего света.

Особенности обнаружения неметаллических включений связаны с тем, что, с одной стороны, современные металлографические комплексы позволяют работать с увеличением до 3000 крат, что существенно расширяет возможности анализа; с другой – возрастает возможность видеть различные мелкие артефакты, и здесь важным является умение отличить артефакты от особенностей структуры. Технологии получения металлургических материалов развиваются, и можно получать материалы с высокодисперсной структурой, но то же самое касается и неметаллических включений.

Данная статья посвящена некоторым вопросам обнаружения неметаллических включений в стали при использовании поляризованного света.

Материалы и методики эксперимента

Микроструктурные исследования выполнены на металлографическом комплексе на основе инвертированного микроскопа МИ-1, оснащенном 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 образцов стали на микроструктуру произведено ниталем, алюминиевых сплавов – реактивом Келлера. Исследование элементного состава образцов производили с использованием растрового электронного

микроскопа MIRA-3 (Чехия) с системой микроанализаторов фирмы Oxford Instruments (Великобритания). В статье использованы материалы хоздоговорных работ Института прикладной физики НАН Беларуси с предприятиями Республики Беларусь за 2022–2025 гг.

Основная часть

В последнее время участились случаи брака стали по признаку избыточного количества неметаллических включений различных типов. Некоторые наиболее характерные примеры приведены на рис. 1–4. Часто встречаются оксидные включения, балл которых может достигать 4–5 по ГОСТ 1778-2022 «Металлопродукция из сталей и сплавов. Металлографические методы определения неметаллических включений» (рис. 1).

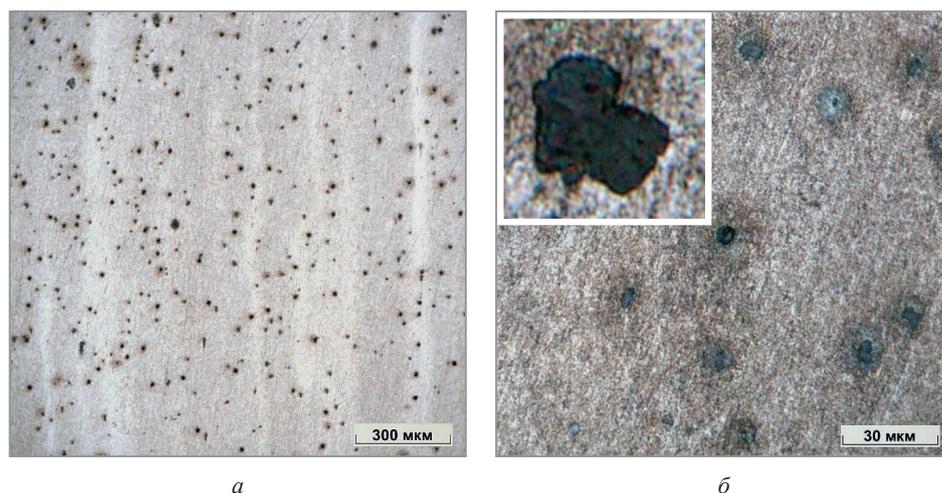


Рис. 1. Оксидные включения в стали 38ХМЮА при различных увеличениях: *а* – 100 \times ; *б* – 1000 \times

На рис. 2 приведены неметаллические включения, ставшие причиной облома зубчатых передач. На рис. 3 представлена структура стали 12Х17. Испытания в растворе уксусной кислоты по содержанию железа в осадке показали превышение концентрации железа в два раза. В соответствии с [19], норма осадка составляет 0,3 мг/дм³; фактически зарегистрировано 0,6 мг/дм³. Причины недостаточной коррозионной стойкости можно связывать с повышенным содержанием железосодержащих неметаллических включений.

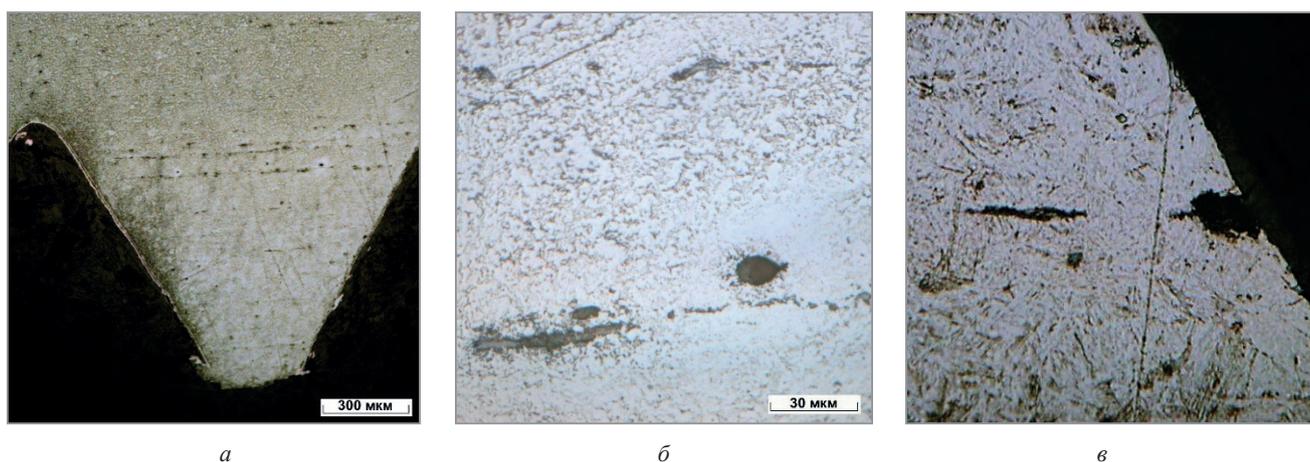


Рис. 2. Оксидные включения в структуре зуба (*а*), строчки неметаллических включений (*б*) и развитие разрушения (*в*); сталь 40Х

Проявляются крайние случаи брака. На фаске при изготовлении детали из стали 30ХГСА формируется шагреньевая поверхность (рис. 4, *а*). Причиной является аномальное количество неметаллических включений (рис. 4, *б*, *в*). Установить балл таких включений затруднительно, поскольку их количество в локальных участках превышает № 5 по ГОСТ 1778-2022, что говорит о необходимости совершенствования нормативной базы в области стандартов на микроструктуру. Вопросы несоответствия стандартов в области металлографии современным требованиям неоднократно поднимались автором в ряде работ [20].

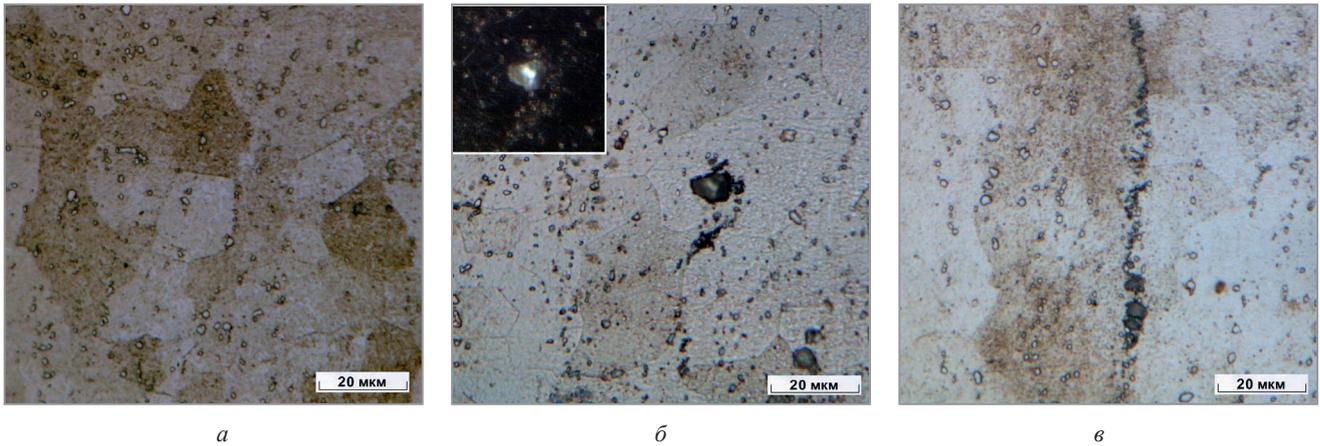


Рис. 3. Структура стали 12X17 в состоянии поставки:

a – без брака; *б* – с точечными неметаллическими включениями (вставка в поляризованном свете); *в* – строчки включений

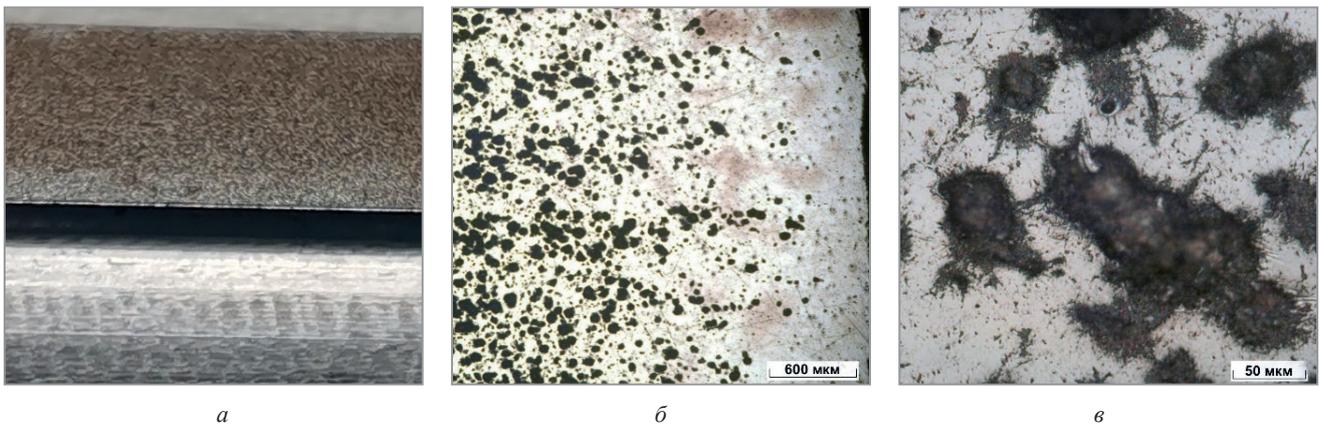
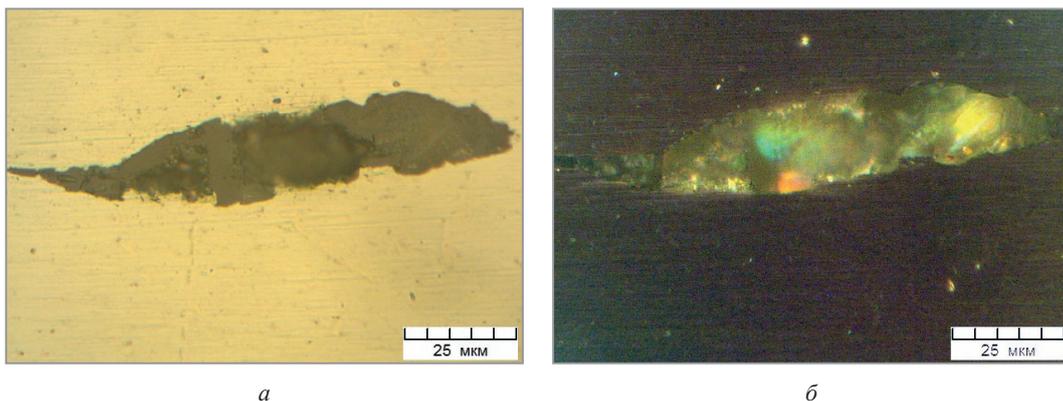


Рис. 4. Сталь 30ХГСА:

a – шагреньевая поверхность детали; *б* – неметаллические включения, 100[×]; *в* – отдельные включения, 500[×]

Вышеприведенные дефекты, в основном, имеют размер, который позволяет идентифицировать их при увеличениях от 100 до 1500 крат. Неметаллические включения типа оксидов, шлаков, сульфидов визуализируются, как правило, хорошо. Для их обнаружения и исследования методом оптической микроскопии достаточно, в сущности, использования освещения по методам светлого и/или темного поля.

В последнее время участились случаи наличия в металле, поставляемом различными предприятиями, неметаллических включений иных типов, для обнаружения которых желательно (или необходимо) использование поляризованного света. Крупное включение состава SiO_2 в трубной стали показано на рис. 5, *a*. В поляризованном свете оно показывает эффект опалесценции (рис. 5, *б*). На рис. 6 показано включение в белом чугуине того же состава. Идентификация таких включений, как правило, не вызывает проблем. На рис. 7 показано определение его элементного состава. Концентрация в атомных процентах позволяет определить химическую формулу.

Рис. 5. Неметаллическое включение состава SiO_2 в стали 20: *a* – светлое поле; *б* – поляризованный свет

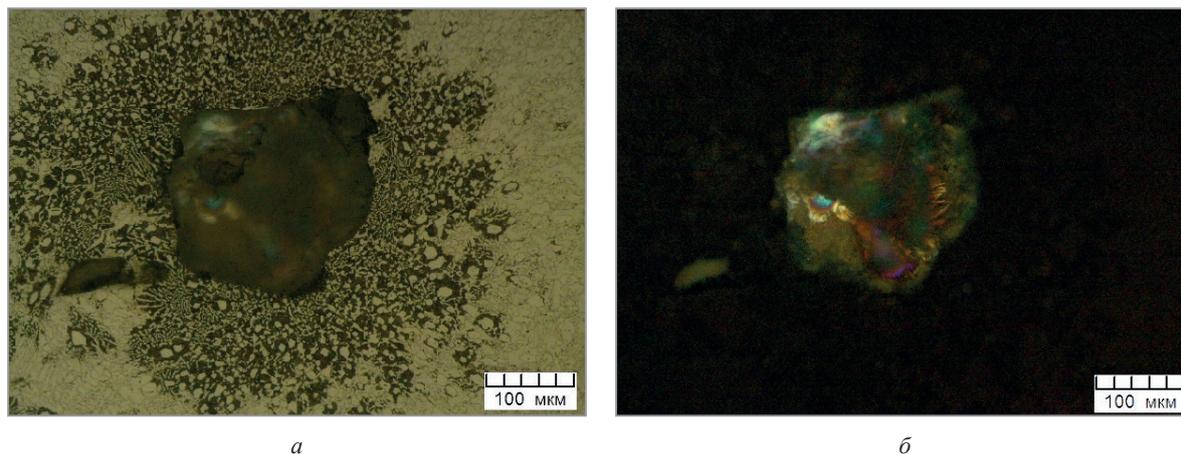


Рис. 6. Включение оксида кремния в белом чугуна: *a* – светлое поле; *б* – поляризованный свет

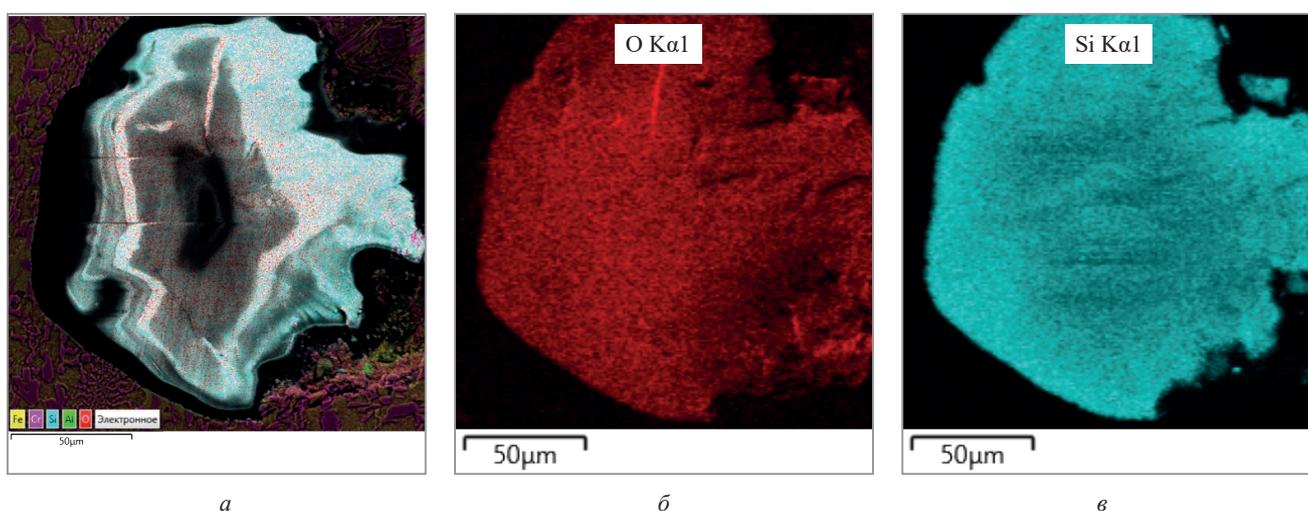


Рис. 7. Результаты элементного анализа: *a* – многослойное изображение; *б* – распределение кислорода; *в* – распределение кремния

Распределение элементов по площади включения представлено на рис. 7, *б*, *в*. Присутствуют кислород и кремний в соотношении 70 и 30 ат. % соответственно, что позволяет предположить наличие соединения SiO_2 .

На рис. 8 показано сложное включение кремнеземистого стекла, которое в поляризованном свете можно идентифицировать по специфическому виду оптического эффекта в виде двойной полосы [1].

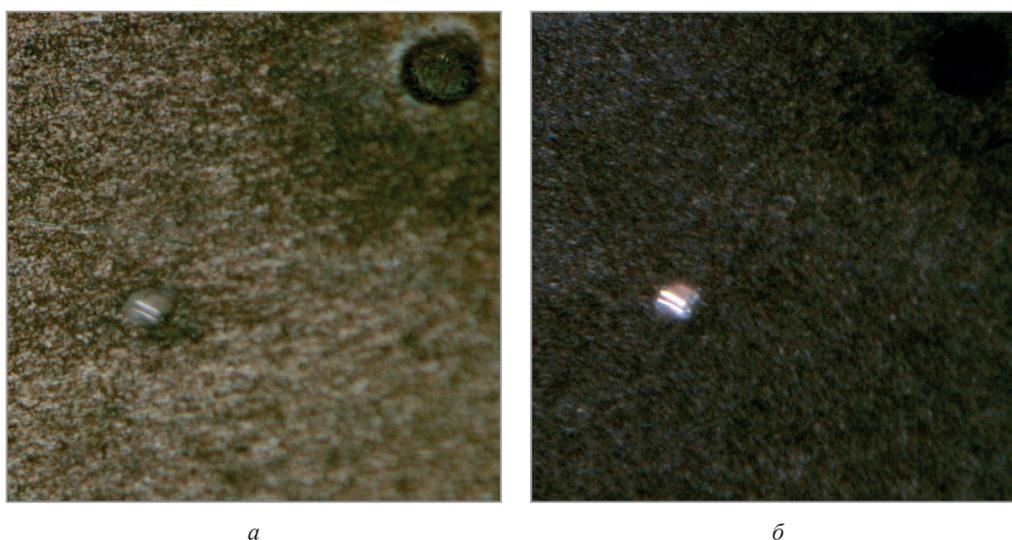


Рис. 8. Включение кремнеземистого стекла с β -кристобалитом игольчатой формы: *a* – светлое поле; *б* – поляризованный свет; сталь 38ХМЮА, 1500 \times

При использовании обычного оптического микроскопа интерференция поляризованных лучей изучается коноскопическим наблюдением. Интерференционные фигуры, наблюдаемые при коноскопировании, дают возможность определить: одно- или двухосный объект, знак двойного лучепреломления (т.е. оптический знак кристалла), ориентацию объекта и величину угла между оптическими осями. Кроме того, эти фигуры позволяют диагностировать изучаемые препараты и элементы их структуры [17].

Одноосный кристалл, лежащий на столике микроскопа и ориентированный оптической осью перпендикулярно к столику, в скрещенных николях в сходящемся свете дает весьма характерную фигуру, состоящую из темного креста, ветви которого, расширяющиеся к концам, параллельны главным сечениям николей. В поле между ветвями креста видны концентрические кольца интерференционных цветов, повышающихся от центра к периферии (рис. 9, а). При вращении столика никаких изменений не наблюдается.

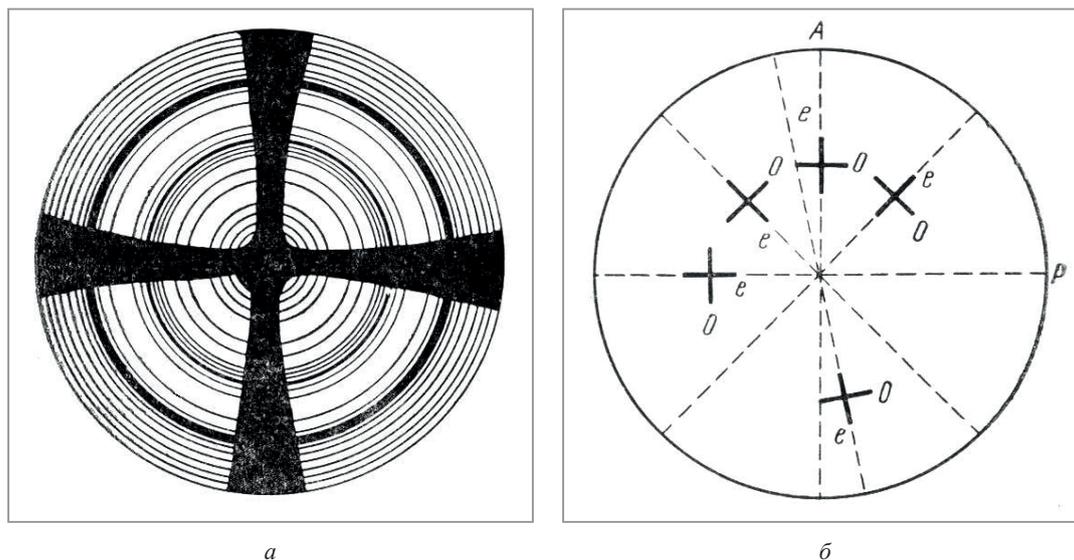


Рис. 9. Интерференция поляризованных лучей:
 а – коноскопическая фигура одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси;
 б – направления колебаний в некоторых точках коноскопической фигуры разреза, перпендикулярного к оптической оси одноосного кристалла

Указанное распределение интерференционных окрасок объясняется следующим [21]. Лучи, идущие параллельно оптической оси и не испытывающие поэтому двупреломления, собираются объективом в одну точку в центре поля зрения (так как оптическая ось совпадает с осью оптической системы микроскопа). В этой точке при скрещенных николях должна быть темнота. Во всех других точках поля зрения коноскопа соберутся лучи, наклоненные к оптической оси. Чем больше угол наклона лучей, тем дальше от центра фигуры будет находиться соответствующая им точка. Каждая волна, идущая не по оптической оси, должна разложиться на две, разность хода между которыми определит высоту интерференционной окраски в соответствующем месте фигуры. Чем больший угол делают нормали с оптической осью, тем больше перпендикулярные к ним эллиптические сечения индикатрисы отличаются от круга и тем выше, следовательно, будет двупреломление. Этим объясняется повышение интерференционной окраски от центра к периферии фигуры. Кроме того, чем больше угол наклона лучей, тем больший путь проходят они в плоскопараллельной пластинке, что также влияет на высоту интерференционной окраски.

Причина появления темного креста следующая [21]. В каждой точке фигуры (кроме центра) имеются два колебания: одно соответствует волне обыкновенной (o), другое – необыкновенной (e). Волна e , как показано выше, должна колебаться в плоскости главного сечения, а волна o – перпендикулярно к этой плоскости. Плоскости главных сечений, как проходящие через оптическую ось (выходящую в центре фигуры), будут проектироваться по радиусам фигуры, и, следовательно, колебания в разных ее точках будут совершаться по разным направлениям (рис. 9, б). Два главных сечения P и A параллельны направлениям колебаний николей. Во всех точках, лежащих в этих главных сечениях, направления колебаний совпадают с направлениями колебаний в николях, следовательно, эти точки должны находиться на погашении. Поэтому получается черный крест, совпадающий с главными сечениями николей. Во всех остальных точках фигуры будет просветление, тем более интенсивное, чем больший угол делают направления

колебаний с главными сечениями николей. Максимум освещенности будет в точках, лежащих на диаметрах фигуры, расположенных под углом 45° к главным сечениям николей.

В наиболее удачных случаях кристаллическое оптически прозрачное включение распознается по формированию темного креста при благоприятном расположении включения относительно плоскости поверхности образца (рис. 10, *а*). При наличии мелких неметаллических включений их обнаружение возможно при использовании только больших увеличений (рис. 10, *б*). Сталь 20ХН3А с такими включениями вызвала повышенный износ инструмента при обработке. По сделанным оценкам, при хорошем качестве металла инструмент обрабатывает партию изделий в 30 шт.; для стали, структура которой показана на рис. 10, это количество составляет 2 шт.

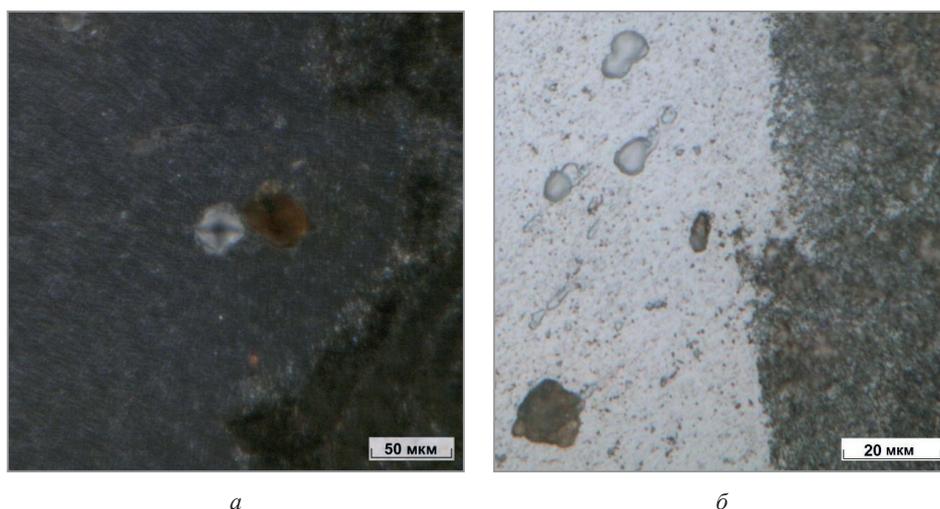


Рис. 10. Структура стали 20ХН3А (состояние поставки): *а* – поляризованный свет; *б* – светлое поле; $1500\times$

В соответствии с [18] темный крест дают в поляризованном свете, в частности, глобулярные прозрачные включения силикатов. Формирование темного креста является доказательством наличия кристаллического включения. Идеальный случай идентификации кристаллических включений силикатов в сварном шве показан на рис. 11. В светлом и темном поле на изображении включения силиката проявляются концентрические кольца (рис. 11, *а*, *б*). В поляризованном свете одноосный кристалл дает световую фигуру с темным крестом, ветви которого, расширяющиеся к концам, параллельны главным сечениям николей [21]. В поле между ветвями креста видны концентрические кольца интерференционных цветов. Контраст концентрических колец и темного креста зависит от совершенства формы включения [9].

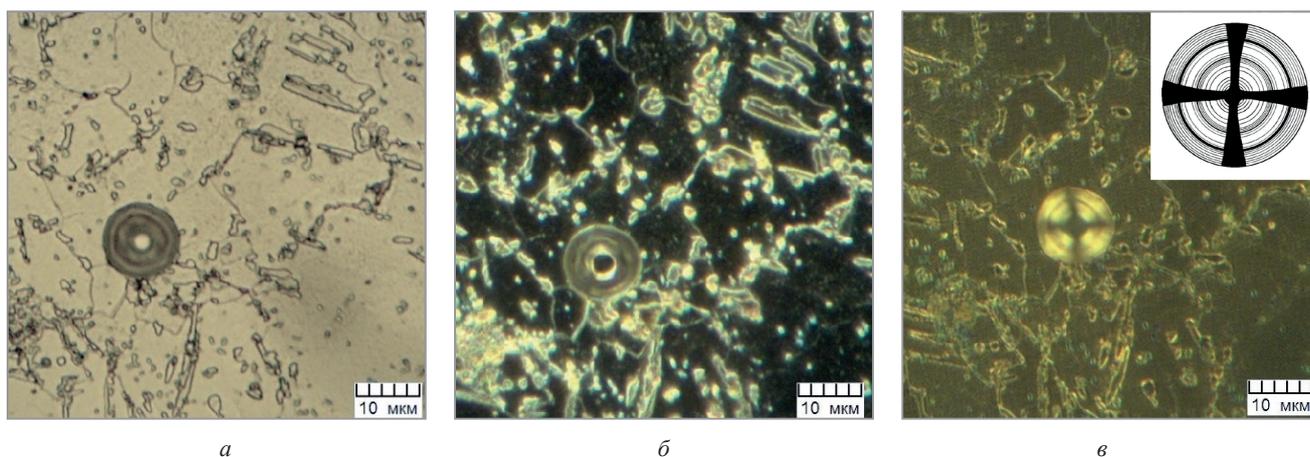


Рис. 11. Включение силиката в сварном шве:
а, *б* – в светлом и темном поле соответственно; *в* – в поляризованном свете, схема коноскопической фигуры

После термической обработки, когда сталь имеет собственную мелкую структуру, мелкие стекловидные включения в светлом поле заметны плохо (рис. 12, *а*). В поляризованном свете (рис. 12, *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 малого размера,

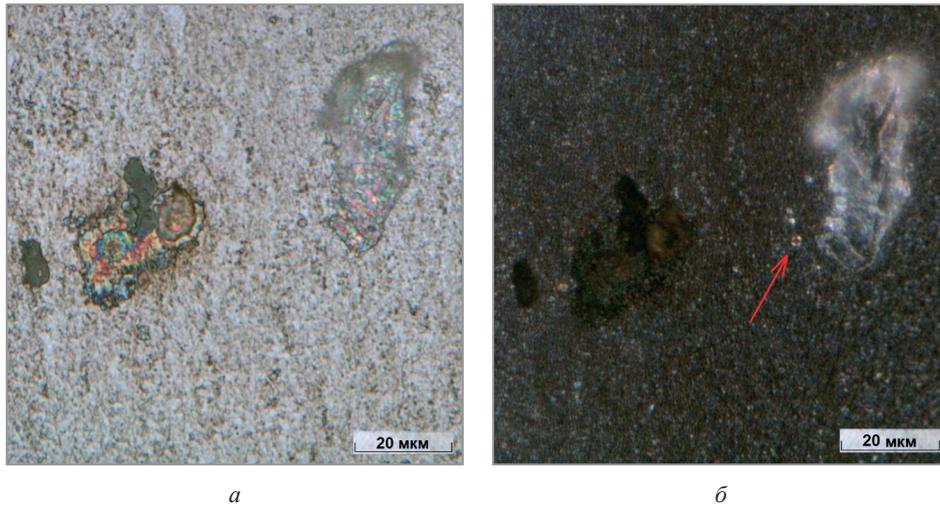


Рис. 12. Структура стали 38ХМЮА после закалки и высокого отпуска: *а* – светлое поле; *б* – поляризованный свет; 1500[×]

а также ориентации относительно плоскости шлифа. Также могут подсвечиваться детали структуры. Крупное светящееся пятно – прозрачная домовая пыль. Прозрачность включения влияет на его изображение в поляризованном свете. Плоско поляризованный свет, отраженный от внешней поверхности объекта, задерживается анализатором. Часть света преломляется на внешней поверхности включения, проходит внутрь, отражается от сложной по конфигурации поверхности включения – металл и выходит наружу, вновь испытывая преломление на внешней поверхности включения. В результате свет практически перестает быть поляризованным. Поэтому при скрещенных николях видно светлое изображение включения на темном фоне [9]. Кроме того, видны включения кремнеземистого стекла, серые в светлом поле и темные в поляризованном свете. Присутствуют также радужные пятна от воды, связанные с пористостью на границе металла и включения [13].

В отсутствие травления на участке с дефектами препарирования (рис. 13, *а*) видно, что оптические эффекты формируются в том числе на царапинах и пятнах воды [13], и отделить эффекты на включениях практически невозможно (рис. 13, *б*). На рис. 14 показаны оптические эффекты на высохших каплях воды различной формы.

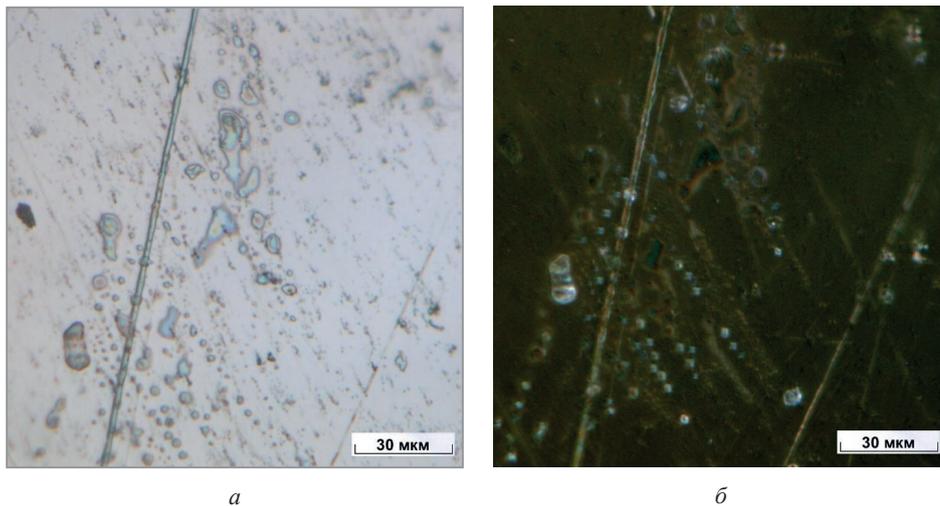


Рис. 13. Участок поверхности шлифа с царапинами и пятнами воды:
а – светлое поле; *б* – поляризованный свет; без травления

Интерференция лучей, отраженных от закономерно чередующихся деталей рельефа, может привести к формированию более или менее строгой дифракционной картины [9]. Оптические эффекты в поляризованном свете формируются на определенных дефектах поверхности, имеющих относительно правильную форму (рис. 15, 16), в частности полусферических порах [16], а также ямках травления [14]. Специфического вида оптические фигуры могут формироваться на порах и газовых пузырьках в смолах и полимерных материалах [22, 23].

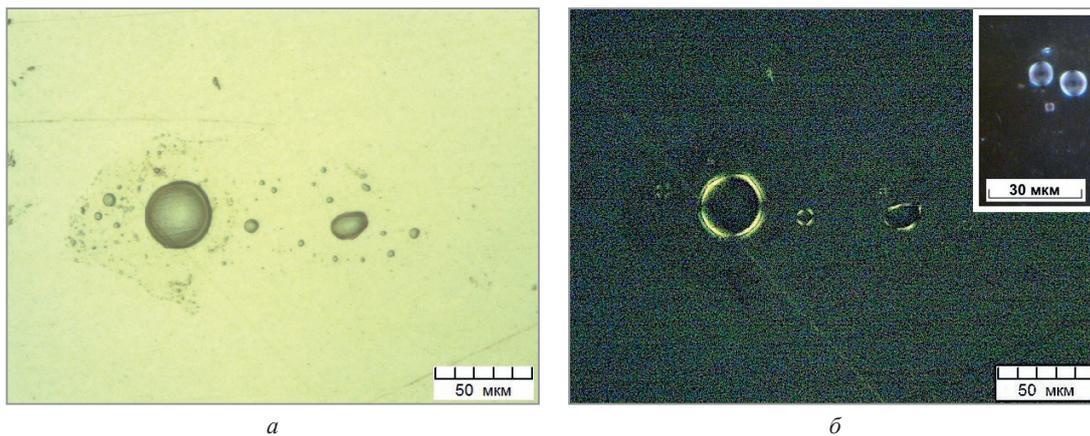


Рис. 14. Оптические эффекты на каплях воды: *а* – светлое поле; *б* – поляризованный свет

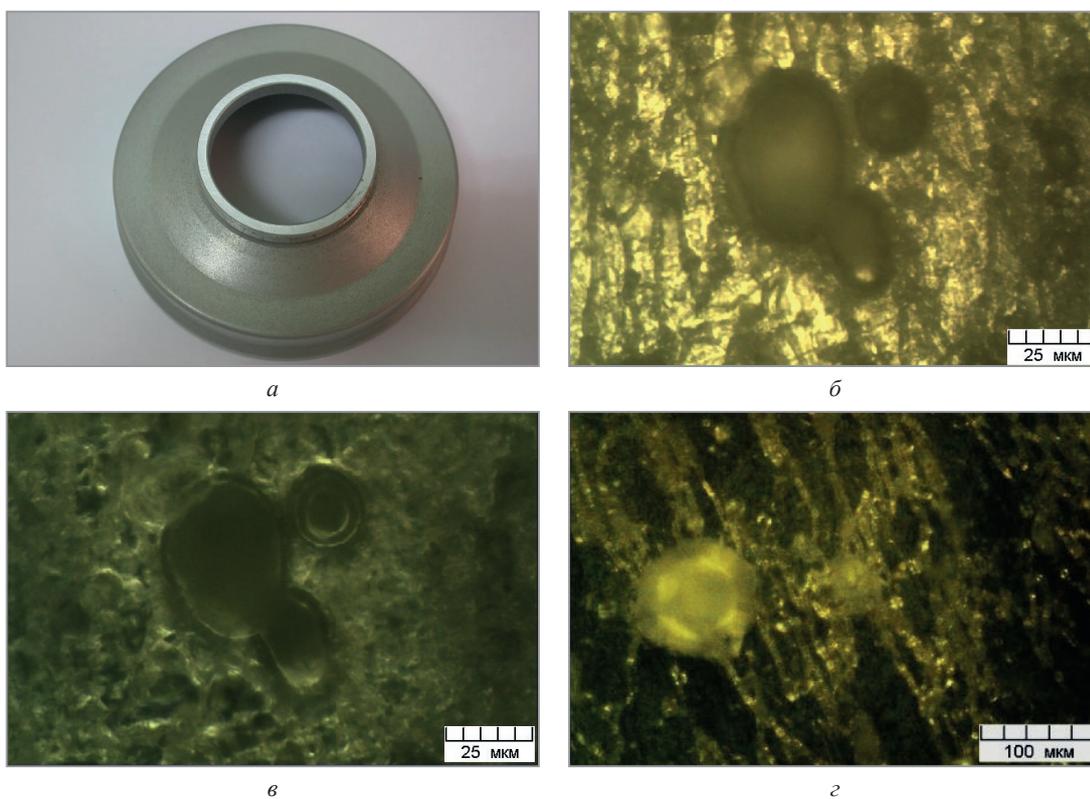


Рис. 15. Деталь из сплава Д16: *а* – вид поверхности; *б-г* – каверны в материале из-за несоблюдения режима оксидирования; *б* – светлое поле; *в* – темное поле; *г* – поляризованный свет

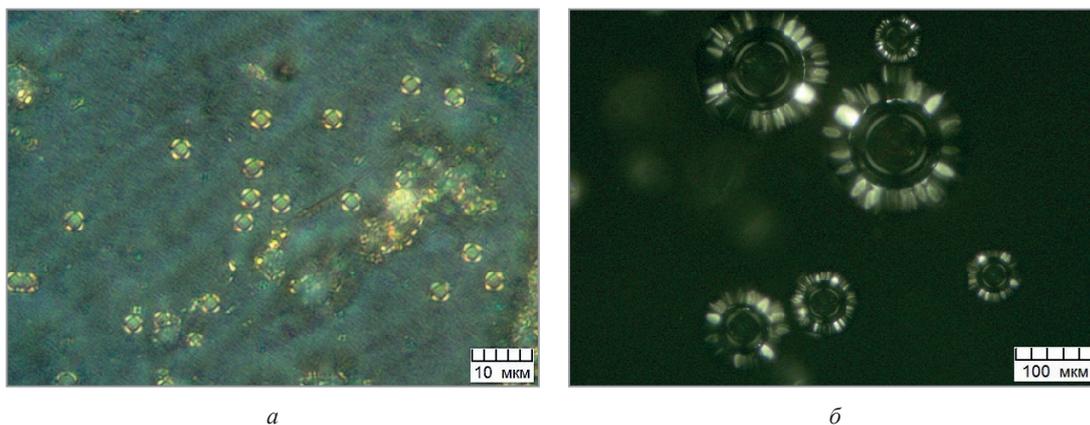


Рис. 16. Оптические эффекты на поверхности материалов в поляризованном свете: *а* – ямки травления в алюминиевом сплаве; *б* – пузырьки в эпоксидной смоле

Выводы

1. Определение неметаллических включений по ГОСТ 1778-2022 может быть затруднено в силу недостаточности увеличения в 100 крат (регламентируемого ГОСТ), поскольку вместе с совершенствованием структуры (что не всегда имеет место) измельчаются и неметаллические включения, которые не могут не реагировать на изменение технологии литья.

2. Современное металлографическое оборудование с применением поляризованного света позволяет надежно идентифицировать мелкие неметаллические включения при увеличениях до 1500–2000 крат. В силу вышеперечисленного оснащение металлографических лабораторий соответствующим оборудованием имеет первостепенное значение.

3. Следует учитывать, что дефекты препарирования и детали микроструктуры могут создавать в поляризованном свете оптические эффекты, сходные с эффектами для кристаллических неметаллических включений. В этой связи возрастает роль дополнительных опций оптических микроскопов, а также возможности распознавания различных металлографических артефактов.

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. – № 2. – С. 134–137.
3. Влияние неметаллических включений на сопротивление стали разрушению при многократном динамическом сжатии / А.И. Попелюх [и др.] // Материаловедение. – 2017. – № 2. – С. 67–78.
4. **Бельченко, Г.И.** Неметаллические включения и качество стали / Г.И. Бельченко, С.И. Губенко. – Киев: Техника, 1980. – 163 с.
5. **Стефанович, С.В.** Неметаллические включения в сталях марок 80 и 42CR4MO2 / С.В. Стефанович, В.М. Пищ // Литье и металлургия. – 2009. – № 2. – С. 153–158.
6. Происхождение неметаллических включений и пути снижения загрязненности ими металла / В.А. Голубцов [и др.] // Металлург. – 2005. – № 4. – С. 73–77.
7. **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.
8. **Червяков, А.Н.** Металлографическое определение включений в стали / А.Н. Червяков, С.А. Киселев, А.Г. Рыльникова. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1962. – 248 с.
9. **Панченко, Е.В.** Лаборатория металлографии / Е.В. Панченко [и др.]. – М.: Металлургия, 1965. – 440 с.
10. **Губенко, С.И.** Неметаллические включения в стали / С.И. Губенко, С.П. Ошкадеров. – Киев: Наукова думка, 2016. – 528 с.
11. **Куренкова, Т.П.** Основные методы контроля неметаллических включений в стали, используемые в ЦЗЛ ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» / Т.П. Куренкова // Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2017. – С. 189–193.
12. **Анисович, А.Г.** Антипродукция: проблема обнаружения неметаллических включений в стали / А.Г. Анисович // Литейное производство и металлургия 2024. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2024. – С. 120–125.
13. **Анисович, А.Г.** Артефакты в металлографии: пятна на поверхности шлифов / А.Г. Анисович // Литейщик России. – 2024. – № 3. – С. 37–43.
14. **Анисович, А.Г.** Артефакты в металлографии: ямки травления / А.Г. Анисович // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 112–117.
15. **Анисович, А.Г.** Артефакты в металлографии: пыль / А.Г. Анисович // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 93–98.
16. **Анисович, А.Г.** Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А.Г. Анисович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 36–42.
17. Микроскопы / Е.Е. Скворцов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1969. – 512 с.
18. **Anisovich, A. G.** Applications of the differential-interference contrast technique in materials science / A. G. Anisovich // Materials Evaluation. – 2020. – № 8. – P. 925–933.
19. Санитарные нормы и правила «Требования к миграции химических веществ, выделяющихся из материалов, контактирующих с пищевыми продуктами»: утв. пост. Мин. здравоохранения Респ. Беларусь от 30.12.2014 № 119.
20. **Анисович, А.Г.** Проблемы применения стандартов при оценке микроструктуры металлов и сплавов. / А.Г. Анисович // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 12–19.
21. **Татарский, В.Б.** Кристаллооптика и иммерсионный метод / В.Б. Татарский. – М.: Недра, 1965. – 306 с.
22. **Анисович, А.Г.** Оптические эффекты при микроскопии неметаллических материалов / А.Г. Анисович // Литье и металлургия. – 2017. – № 1. – С. 110–114.
23. **Анисович, А.Г.** Оптические эффекты при микроскопии металлов и неметаллических материалов / А.Г. Анисович // Литье и металлургия. – 2017. – № 4. – С. 119–125.

REFERENCES

1. **Pirozhkova V.P.** Atlas mikrostruktur nemetallicheskih vkljuchenij [Atlas of microstructures of non-metallic inclusions]. Zaporozh'e, Dneprovskij metallurg Publ., 2012, 167 p.

2. **Simachev A. S., Oskolkova T. N., Temljancev M. V.** Vlijanie nemetallicheskih vključenij rel'sovoj stali na vysokotemperaturnuju plastichnost' [Effect of non-metallic inclusions of rail steel on high-temperature plasticity]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija = News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2016, no. 2, pp. 134–137.
3. **Popeljuh A. I., Veselov S. V., Munkueva D. D., Timonin V. V., Karpov V. N.** Vlijanie nemetallicheskih vključenij na soprotivlenie stali razrusheniju pri mnogokratnom dinamicheskom szhatii [The influence of non-metallic inclusions on the resistance of steel to destruction under repeated dynamic compression]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 2, pp. 67–78.
4. **Bel'chenko G. I., Gubenko S. I.** *Nemetallicheskie vključenija i kachestvo stali* [Non-metallic inclusions and steel quality]. Kiev, Tehnika Publ., 1980, 163 p.
5. **Stefanovich S. V., Pishh V. M.** Nemetallicheskie vključenija v staljah marok 80 i 42CR4MO2 [Non-metallic inclusions in steel grades 80 and 42CR4MO2]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 2, pp. 153–158.
6. **Golubcov V. A., Voronin A. A., Tetjueva T. V., Roshhin V. E., Zinchenko S. D., Usmanov R. G.** Proishozhdenie nemetallicheskih vključenij i puti snizhenija zagrjaznjonnosti imi metalla [Origin of non-metallic inclusions and ways to reduce metal contamination with them]. *Metallurg = Metallurgist*, 2005, no. 4, pp. 73–77.
7. **Grigorovich K. V., Krasovskij P. V., Trushnikova A. S.** Analiz nemetallicheskih vključenij – osnova kontrolja kachestva stali i splavov [Analysis of non-metallic inclusions – the basis of quality control of steel and alloys]. *Analitika i kontrol' = Analytics and control*, 2002, no. 2, pp. 133–142.
8. **Chervjakov A. N., Kiselev S. A., Rylnikova A. G.** *Metallograficheskoe opredelenie vključenij v stali* [Metallographic determination of inclusions in steel]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo literatury po chernoj i cvetnoj metallurgii Publ., 1962, 248 p.
9. **Panchenko E. V., Skakov Ju. A., Krimer B. I., Arsent'ev P. P., Popov K. V., Cviling M. Ja.** *Laboratorija metallografii* [Metallography laboratory]. Moscow, Metallurgija Publ., 1965, 440 p.
10. **Gubenko S. I., Oshkaderov S. P.** *Nemetallicheskie vključenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2016, 528 p.
11. **Kurenkova T. P.** Osnovnye metody kontrolja nemetallicheskih vključenij v stali, ispol'zuemye v CZL OAO “Belorusskij metallurgicheskij zavod – upravljajushhaja kompanija holdinga “Belorusskaja metallurgicheskaja kompanija” [Main methods of control of non-metallic inclusions in steel, used in the Central Laboratory of the Belarusian Steel Works OJSC – the management company of the holding “Belarusian Steel Company”]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2017. Belarus': sb. trudov Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. = Foundry production and metallurgy 2017. Belarus: Collection of works of the International scientific and technical conference*. Minsk, 2017, pp. 189–193.
12. **Anisovich A. G.** Antiprodukcija: problema obnaruzhenija nemetallicheskih vključenij v stali [Anti-production: the problem of detecting non-metallic inclusions in steel]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2024. Belarus': sb. trudov Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. = Foundry and Metallurgy 2024. Belarus: Collection of works of the International scientific and technical conference*. Minsk, 2024, pp. 120–125.
13. **Anisovich A. G.** Artefakty v metallografii: pjatna na poverhnosti shlifov [Artifacts in metallography: spots on the surface of sections]. *Litejshhik Rossii = Foundryman of Russia*, 2024, no. 3, pp. 37–43.
14. **Anisovich A. G.** Artefakty v metallografii: jamki travlenija [Artifacts in metallography: etching pits]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 112–117.
15. **Anisovich A. G.** Artefakty v metallografii: pyl' [Artifacts in metallography: dust]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 93–98.
16. **Anisovich A. G.** Iskusstvo metallografii: ispol'zovanie metodov opticheskogo kontrastirovanija [Art of metallography: use of optical contrasting methods]. *Vesci NAN Belarusi. Ser. fiz.-tjechn. navuk = Vesti NAS Belarusi. Ser. phys.-tech. science*, 2016, no. 1, pp. 36–42.
17. **Skvorcov E. E., Panov V. A., Poljakov N. I., Fedin L. A.** *Mikroskopy* [Microscopes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 512 p.
18. **Anisovich A. G.** Applications of the differential-interference contrast technique in materials science. *Materials Evaluation*, 2020, no. 8, pp. 25–933.
19. Sanitarnye normy i pravila “Trebovanija k migracii himicheskikh veshhestv, vydelyajushhihsja iz materialov, kontaktirujushhih s pishhevymi produktami”: utv. post. Min. zdravoochranenija Resp. Belarus' ot 30.12.2014 № 119 [Sanitary norms and rules “Requirements for the migration of chemicals released from materials in contact with food products” Resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus dated 30.12.2014 No. 119.].
20. **Anisovich A. G.** Problemy primenenija standartov pri ocenke mikrostruktury metallov i splavov [Problems of application of standards in assessing the microstructure of metals and alloys.]. *Vesci NAN Belarusi. Ser. fiz.-tjechn. navuk = Vesti NAS Belarusi. Ser. phys.-tech. science*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 12–19.
21. **Tatarskij V. B.** *Kristallooptika i immersionnyj metod* [Crystal optics and immersion method]. Moscow, Nedra Publ., 1965, 306 p.
22. **Anisovich A. G.** Opticheskie jeffekty pri mikroskopii nemetallicheskih materialov [Optical effects in microscopy of non-metallic materials]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 1, pp. 110–114.
23. **Anisovich A. G.** Opticheskie jeffekty pri mikroskopii metallov i nemetallicheskih materialov [Optical effects in microscopy of non-metallic materials]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 4, pp. 119–125.