



Application of polarized light in the metallographic analysis of metals and alloys is considered, its application for the analysis of nonmetallic inclusions is shown. Examples of application of differential and interferential contrast for the analysis of structure of metals in reflected light are shown.

А. Г. АНИСОВИЧ, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

УДК 620.186.1 + 535-4

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В АНАЛИЗЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Метод наблюдения в поляризованном свете (поляризационная микроскопия) служит как для микроскопических исследований минералов, биологических объектов, так и для исследования структуры металлов и неметаллических материалов. 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. Свет, излучаемый осветителем, проходит через поляризатор; сообщенная ему при этом поляризация меняется при последующем отражении от образца и эти изменения изучаются с помощью анализатора и различных оптических компенсаторов. Полихроматический поляризованный свет результативен в металлографии для обнаружения и изуче-

ния прозрачных объектов, поэтому с использованием белого поляризованного света решается ограниченное количество задач. Традиционно в металлографии с применением поляризованного света изучают неметаллические включения [1]. Поскольку определенная часть неметаллических включений оптически прозрачна, исследование основано на различии оптических свойств включения в разных направлениях, т. е. их оптической анизотропии [2]. Оптическая анизотропия проявляется при прохождении света внутри включения при отражении света от его поверхности. Плоская поверхность и прозрачное включение по-разному взаимодействуют со световым потоком. Плоско поляризованный свет, отраженный от плоской поверхности, задерживается анализатором и поверхность выглядит темной. Часть света преломляется

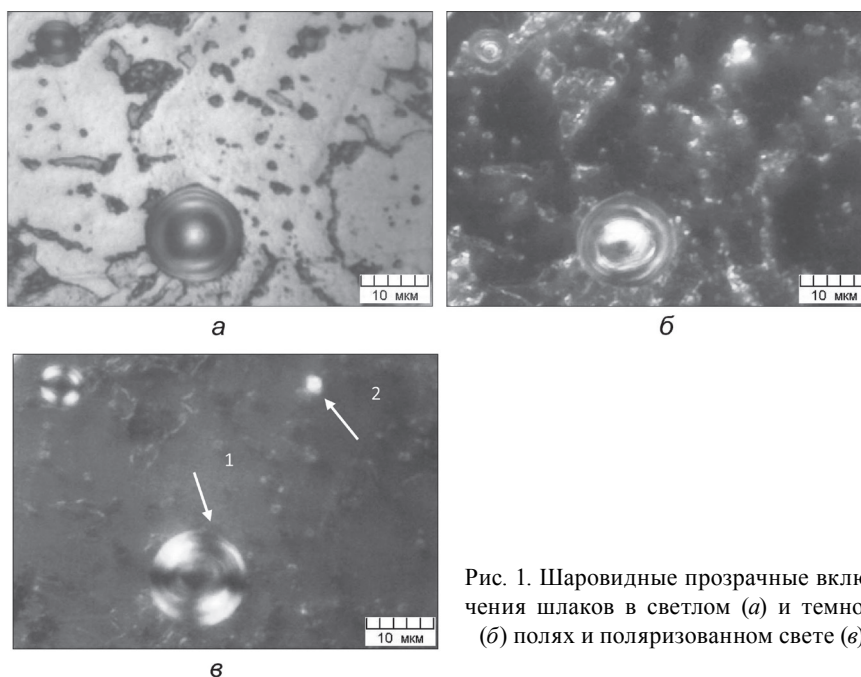


Рис. 1. Шаровидные прозрачные включения шлаков в светлом (а) и темном (б) полях и поляризованном свете (в)

на внешней поверхности включения, проходит внутрь и, отражаясь на поверхности включения-металл, выходит наружу, вновь испытывая преломление на внутренней поверхности [2]. В результате свет перестает быть поляризованным. Поэтому при скрещенном положении анализатора и поляризатора видно светлое изображение включения на темном фоне. Цвет включения может изменяться в результате интерференции [2], что связано с анизотропными эффектами при отражении поляризованного света.

Используя поляризованный свет, можно сделать выводы о форме прозрачных включений. Если включение имеет правильную круглую форму, то на изображении структуры как в светлом, так и в темном поле появляются концентрические кольца (рис. 1, а, б), связанные с интерференцией лучей, отраженных от внутренней поверхности включения [2]. В некоторых случаях можно наблюдать интерференционную окраску колец, формирование которой зависит от угла наклона лучей. В поляризованном свете при скрещенных николях наблюдается эффект темного креста (рис. 1, в). Контраст концентрических колец и темного креста зависит от совершенства формы включения [2]. Явление «темного креста» связано с оптическими явлениями в сходящемся поляризованном свете [3]. Ветви темного креста расширяются к концам

и параллельны главным сечениям николей. Так как оптическая ось включения совпадает с оптической осью системы микроскопа, центр включения не освещен. В соответствии с [4] оптический крест дают в поляризованном свете, в частности, глобулярные прозрачные включения силикатов.

Если включение непрозрачно (рис. 2), то концентрические кольца на светлом и темнопольном изображениях не формируются. Круговой контраст вокруг включения в светлом поле (рис. 2, а) не принадлежит самому включению и может быть связан с напряжениями в сплаве. В темном поле (рис. 2, б) светятся края включения за счет отражения света от неплоскостных участков [5]. В поляризованном свете (рис. 2, в, г) эффект темного креста отсутствует.

Прозрачное включение неправильной формы «светится» в темном поле (рис. 3, а, б) и поляризованном свете (рис. 3, в) без специфических оптических эффектов.

Изображения, приведенные на рис. 1–3, имеют хорошую контрастность. Тем не менее, при использовании светлопольного освещения не всегда возможно получить высококонтрастное изображение. На рис. 4 представлены фотографии прозрачной частицы оксида алюминия [6]. В светлом поле (рис. 4, а) изображение имеет низкую контрастность и четкость; наведение на резкость осуществ-

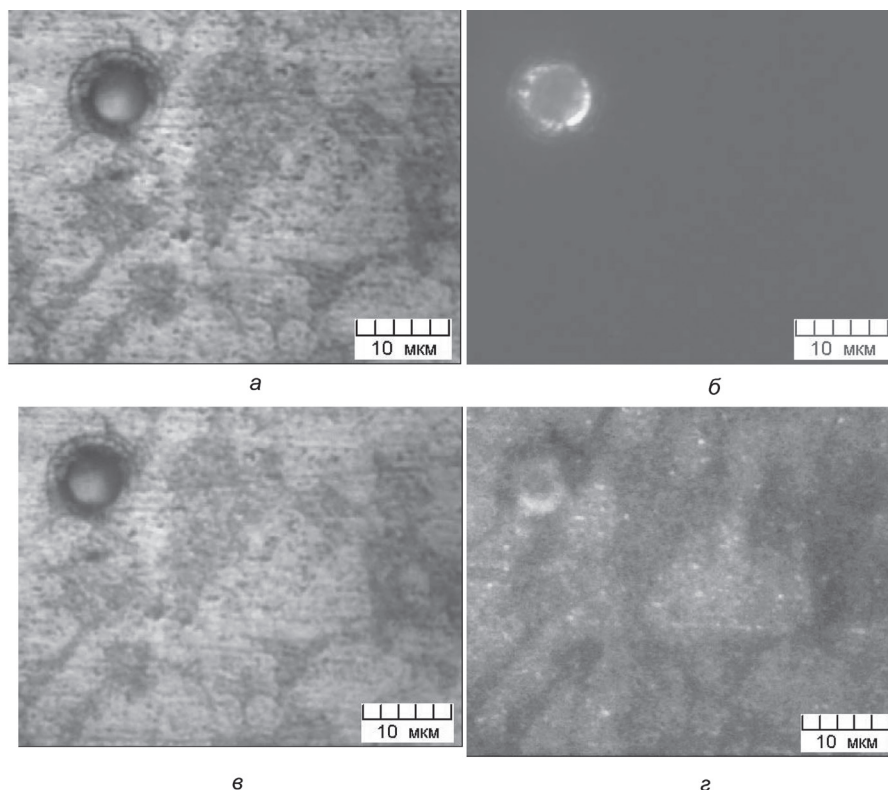


Рис. 2. Круглое непрозрачное включение шлака в силумине: а – светлое поле; б – темное поле; в, г – поляризованный свет (в – николи параллельны; г – николи скрещены)

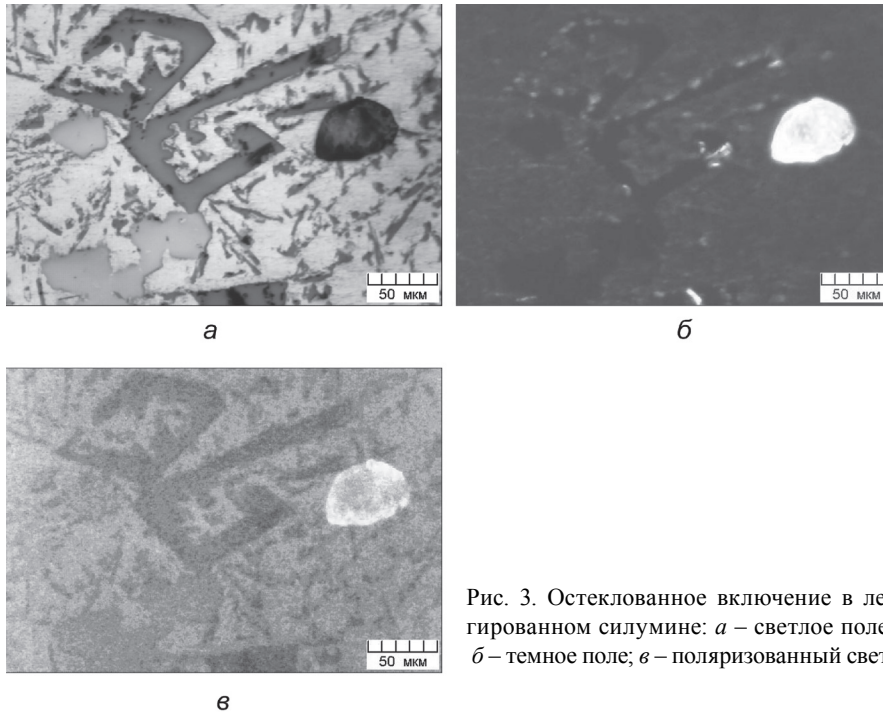


Рис. 3. Остеклованное включение в легированном силумине: *а* – светлое поле; *б* – темное поле; *в* – поляризованный свет

влялось на поверхность частицы. В темном поле виден рельеф поверхности (рис. 4, *б*). Для повышения контрастности изображения можно использовать специальные методы. Возможно изменять фазу отраженных лучей [7]. Человеческий глаз не воспринимает разности фаз, но способен различить изменение интенсивности и длины волны (цвета). Поэтому изменение фазы переводят в изменение интенсивности (или цвета) с использованием метода фазового контраста, что делает видимыми особенности структуры [7].

Получить цветное изображение структуры возможно при использовании поляризованного света и специальных устройств. При этом следует помнить, что получаемые цвета являются условными и не связаны с физическими свойствами фаз. К таким методам относится метод дифференциально-интерференционного контраста. На рис. 4, *в* показано изображение включения, полученное с использованием дифференциально-интерференционного контраста. Его применение повысило четкость изображения и глубину резкости. Наводка резкости на поверх-

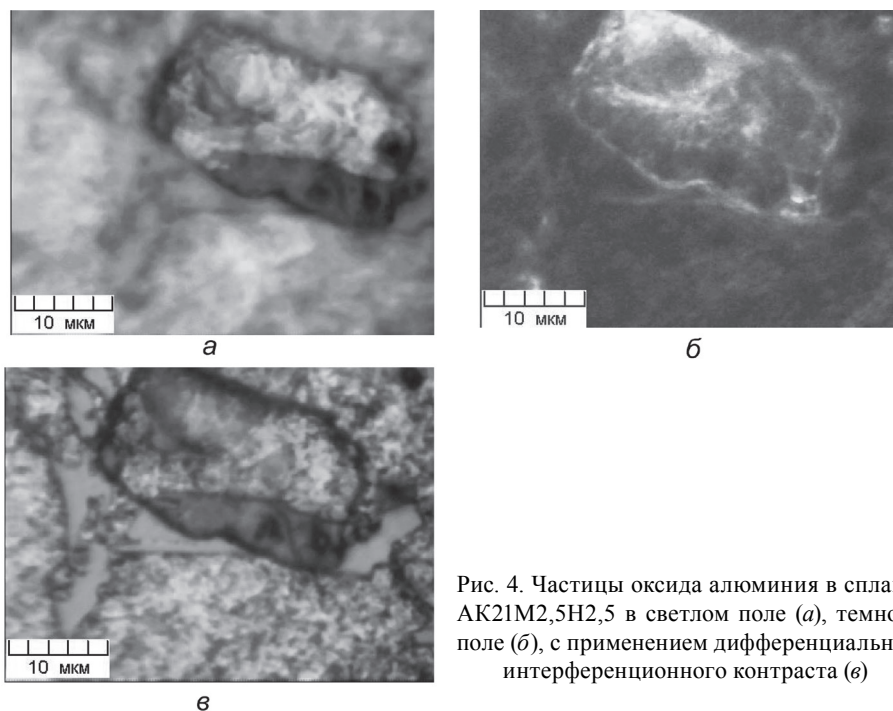


Рис. 4. Частицы оксида алюминия в сплаве АК21М2,5Н2,5 в светлом поле (*а*), темном поле (*б*), с применением дифференциально-интерференционного контраста (*в*)

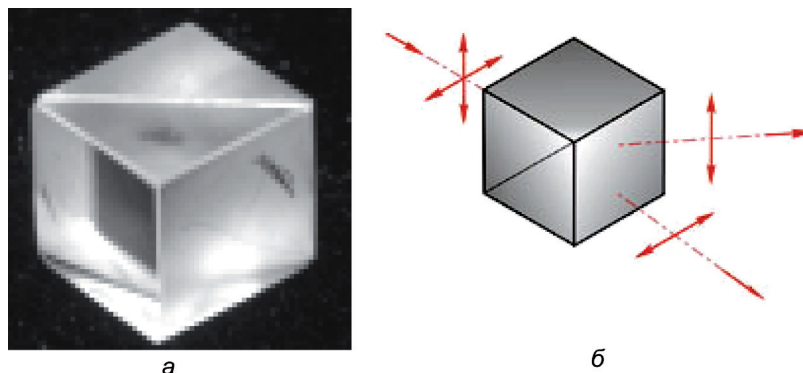


Рис. 5. Призма Волластона (а) [9] и схема расщепления светового пучка (б) [10]

ность включения позволяет видеть также избыточный и эвтектический кремний.

Метод дифференциально-интерференционного контраста (ДИК) представляет собой усовершенствованный метод поляризационного контраста и может применяться для визуализации минимальных различий по высоте или неровностей на поверхностях [8]. При этом используется двулучепреломляющая призма Номарского или Волластона (рис. 5, а), которая расщепляет поляризованный пучок света на его пути к образцу на два частичных пучка (рис. 5, б).

Эта призма состоит из двух склеенных между собою прямоугольных призм, изготовленных из кристаллов, обладающих двойным лучепреломлением (исландский шпат, природный кварц). Призмы склеены таким образом, чтобы их оптические оси были взаимно перпендикулярны. Луч света, падающий на боковую грань первой призмы, разделяется на два плоско поляризованных луча – обыкновенный и необыкновенный, распространяющихся в таком кристалле с различными скоростями. Попадая во вторую призму под другим углом к направлению оптической оси, они преломляются у поверхности раздела двух склеенных призм под разными углами (при этом обыкновенный луч становится необыкновенным и наоборот). Выходя из второй призмы наружу, каждый из двух лучей снова преломляется, почти симметрично отклоняясь один от другого в разные стороны от направления луча, входящего в первую призму. Визуально этот принцип выражается в том, что поверхности образца освещаются поляризованным монохроматическим светом, т. е. имеющим определенную длину волны (= окраску синим или красным, или зеленым и т. д.). Если поверхность образца совершенно плоская, то она окрашивается одинаково. При горизонтальном перемещении призмы цвет плоской поверхности будет изменяться в соответствии со схемой, приведенной на рис. 6 (цветная шкала приведена здесь для наглядности и не соответствует

шкале интерференционных цветов). При горизонтальном перемещении призмы поверхность сначала имеет, например, желтый цвет, потом зеленый и т. д.

Однако если имеется небольшая ступень (перепад высоты) на поверхности образца, то один из этих двух частичных лучей должен пройти путь на $2\delta h$ (h – высота перепада, δ – разность хода лучей) длиннее и приобрести разность хода. Поэтому участки образца, лежащие выше или ниже основной плоскости его поверхности, будут иметь свой собственный цвет. Это проиллюстрировано на рис. 7. При светлопольном освещении частицы карбида кремния, расположенные на включении избыточного кремния, имеют вид темных пятен (рис. 7, а). При использовании дифференциально-интерференционного контраста (рис. 7, б) частицы SiC имеют свой цвет за счет того, что расположены над плоскостью шлифа [6].

Если поверхность изогнутая, то можно видеть одновременно несколько цветов или весь спектр. Для иллюстрации была сфотографирована плоская поверхность, в данном случае объект-микрометр (рис. 8, а). После этого, не меняя настроек оптической системы микроскопа, сфотографирована поверхность стального шарика [6] (рис. 8, б). Верхняя точка сферической поверхности соответствует белому пятну; цвет, приблизительно соответствующий

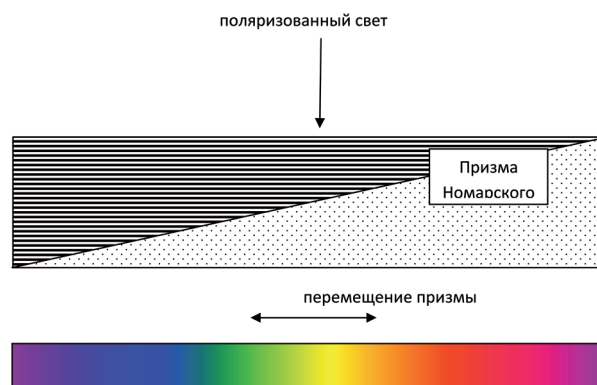


Рис. 6. Схема окрашивания поверхности образца

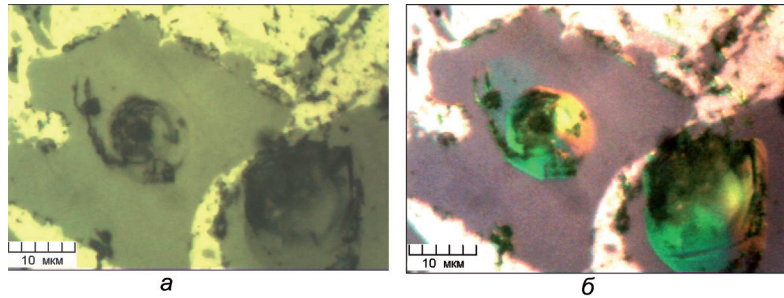


Рис. 7. Частицы карбида кремния в кристаллах избыточного кремния заэвтектического силумина в светлом поле (а); ДИК – контраст (б)

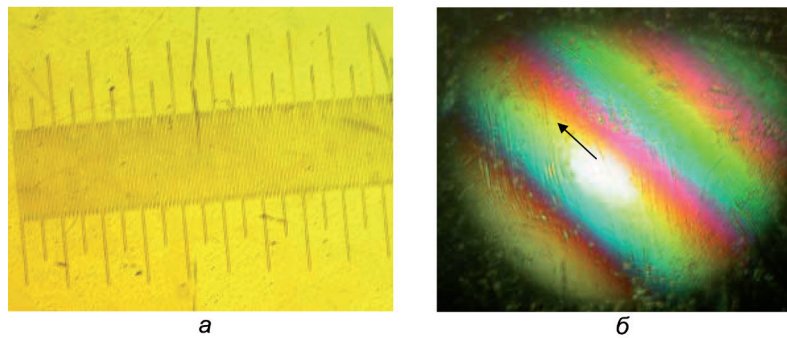


Рис. 8. Фрагмент шкалы объект-микронметра (а) и изображение криволинейной поверхности в ДИК (б)

щий цвету плоскости рис. 8, а, указан стрелкой. Цвет полос изменяется в соответствии с кривизмой сферической поверхности. Последовательность цветов соответствует шкале интерференционных цветов при интерференции на клиновидной пластинке [11]. Практически этот метод является «об-

ратным» тому, который применяется в кристаллографии для определения толщины прозрачных кристаллов [11].

При изучении объектов в отраженном свете с использованием дифференциально-интерференционных устройств наблюдается повышение кон-

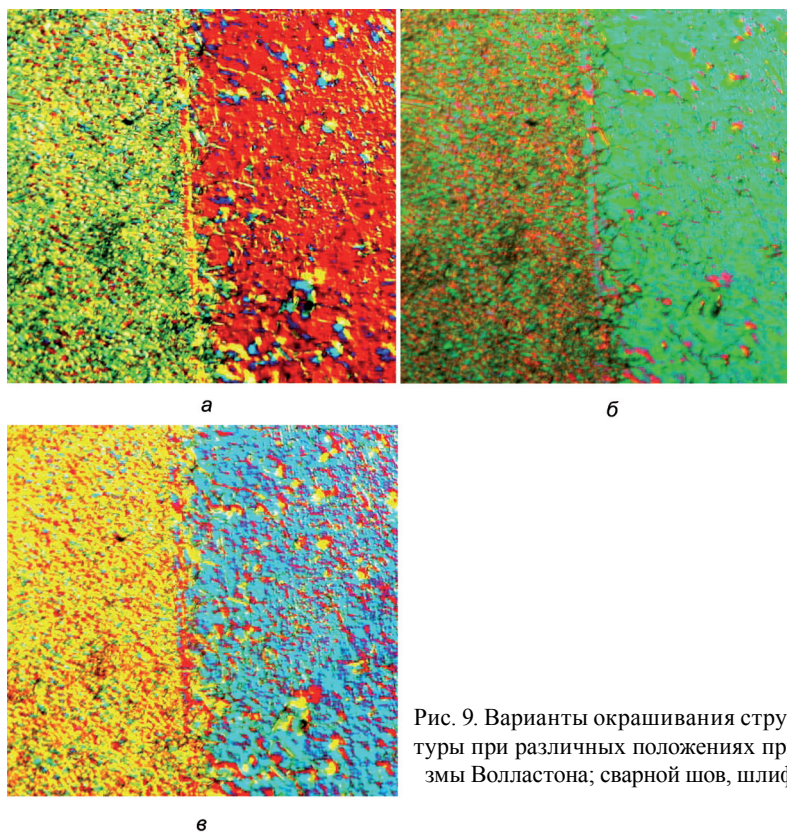


Рис. 9. Варианты окрашивания структуры при различных положениях призмы Волластона; сварной шов, шлиф

траста отдельных участков объекта, с близкими по значениям коэффициентами отражения, что дает дополнительную информацию о структуре объекта. При этом объект кажется рельефным. Метод позволяет анализировать образец с точностью измерения высоты неровности (толщины) в нанометровом диапазоне [8]. Пример того, как может из-

меняться окраска образца при перемещении призмы, показан на рис. 9. Здесь представлено соединение разнородных материалов сваркой. Разные половины образца имеют разные свойства и полируются неравномерно. Материал по разные стороны от шва имеет некоторое различие по высоте и соответственно окрашивается в различные цвета.

Литература

1. Червяков А. Н., Киселева С. А., Рыльникова А. Г. Металлографическое определение включений в стали. М.: Гос. науч.-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1962.
2. Панченко Е. В., Скаков Ю. А., Кример Б. И. и др. Лаборатория металлографии / Под ред. Б. Г. Лившица. М.: Металлургия, 1965.
3. Татарский В. Б. Кристаллооптика и эмерсионный метод. М.: Недра, 1965.
4. Левин Е. Е. Микроскопическое исследование металлов. М.; Л.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1951.
5. 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.
6. Анисович А. Г., Румянцева И. Н. Применение метода дифференциального интерференционного контраста в металловедении: Сб. материалов 3-й Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 15–17 октября 2008 г. Т. 1. С. 130–135.
7. Кларк Э. Р., Эберхардт К. Н. Микроскопические методы исследования материалов. М.: Техносфера, 2007.
8. Егорова О. В. Техническая микроскопия. С микроскопом на «ты». М.: Техносфера, 2007.
9. Призмы Волластона // ООО Оптикс Провайдер [Электронный ресурс]. 2012-Режим доступа: <http://opticsprovider.ru>.
10. Призма Волластона // ООО «Элан» [Электронный ресурс]. 2012-Режим доступа: <http://www.elan-optics.com>.
11. Четвериков С. Д. Методика кристаллооптических исследований шлифов. М.: Гос. изд-во геолог. литературы, 1949.