

3. Дубоделов В. И., Богдан К. С., Фикссен В. Н. Дискретное дозирование металлических расплавов магнитовесовым методом // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 5. – С. 8-13.
4. Слажнев Н. А., Богдан К. С. Электромагнитное управление процессом заливки металлических расплавов из магнитовесовой установки в литейные формы // Процессы литья. – 2011. – № 1. – С. 69-77.
5. Полищук В. П., Самсоник В. А., Цин М. Р. Стабильность и точность дозирования алюминиевых сплавов магнитодинамическими установками // Литейн. пр-во. – 1983. – № 10. – С. 29-30.

Поступила 10.05.2011

УДК 621.74.002:669.131.7

О. В. Соценко

Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск

КОМПЬЮТЕРНАЯ 3D-РЕКОНСТРУКЦИЯ ФОРМЫ ВКЛЮЧЕНИЙ ГРАФИТА В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ

Предложена методика трехмерной стереологической реконструкции графитных включений в высокопрочном чугуна с использованием программы SolidWorks. Показано, что реконструированные компактные и агрегированные графитные включения дают более полное представление об их реальной форме, чем случайные сечения плоскостью шлифа.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, глобулярный графит, стереологическая реконструкция.

Запропонована методика тривимірної стереологічної реконструкції графітних включень у високоміцному чавуні з використанням програми SolidWorks. Показано, що реконструйовані компактні та агреговані графітні включення дають повніше уявлення про їх реальну форму, ніж випадкові перетини площиною шліфа.

Ключові слова: високоміцний чавун, кулястий графіт, стереологічна реконструкція.

The technique of three-dimensional stereological reconstruction of graphite inclusions in ductile iron using the program SolidWorks. It is shown that the reconstructed compact graphite inclusions and aggregates provide a more complete picture of their true form than the random cross-section plane of the thin section.

Keywords: ductile iron, globular graphite, stereological reconstruction.

Количественная оценка объектов микроструктуры по параметрам их случайного двумерного сечения часто приводит к неправильному представлению об их пространственном строении и механизме формирования. Плоскость шлифа пересекает отдельные элементы структуры (графитные и другие неметаллические включения, газоусадочные дефекты, дендриты и т. п.) не по центру или оси, а случайно – на большем или меньшем расстоянии от осевого сечения. В связи с этим размеры и форма плоского сечения объекта микроструктуры на шлифе создают

ложное представление об истинных размерах, морфологических, топологических и других характеристиках пространственного строения исследуемых объектов. Металлы и сплавы оптически непрозрачны и поэтому их пространственная структура невидима, а ее геометрические параметры недоступны непосредственному измерению и анализу. Источником информации о параметрах пространственного строения обычно служат параметры двумерной структуры, оцениваемые в случайном сечении в плоскости шлифа, количественно взаимосвязанные с реальными пространственными параметрами. Установление этих связей – одна из основных задач стереометрической металлографии [1, 2].

Методы стереологической реконструкции микрообъектов широко используются в практике металлографического анализа. В монографии [3] методом стереометрического анализа подтверждена непрерывность графита в пределах эвтектической колонии. На основе серии микрофотографий последовательных сечений образцов чугуна построены объемные модели графитных скелетов эвтектических колоний в чугуне, который затвердевает с различной скоростью. В монографии [4] широко использованы методы стереологического микроанализа двойных и псевдодвойных эвтектик с построением их геометрических моделей на основе микрофотографий последовательных сечений образцов сплавов. В работах автора [5-7] выполнены исследования по стереологической реконструкции компактных включений графита в высокопрочном чугуне. Проведение таких исследований весьма трудоемко, а адекватность моделей строению реальных микроструктур или объектов в сплаве в значительной мере определяется опытом и уровнем индивидуального пространственного воображения исследователя.

С распространением современной техники подготовки шлифов и оборудования для микроструктурного анализа сплавов значительно упростился процесс подготовки микрофотографий серий последовательных сечений исследуемых образцов. Компьютеризация исследовательского процесса позволяет существенно ускорить и упростить процесс **3D-моделирования объектов микроструктуры, повысить качество и адекватность получаемых пространственных моделей**. Особенно интенсивно развиваются исследования по 3D моделированию микроскопических биологических объектов по серийным гистологическим срезам [8-10].

В данной работе исследовали пространственное строение включений компактного графита в отливках из чугунов, модифицированных магнием и церием, содержащим (%): 3,10-3,40 C; 1,20-1,60 Si; 0,10-0,40 Mn; 0,10-0,40 P; 0,025-0,040 S; 0,05-0,07 Mg; 0,02-0,03 Ce. Для стереологической реконструкции графитных включений и построения их пространственных моделей использовали микрофотографии последовательных сечений микрообъемов металла с исследуемым объектом серий параллельных плоскостей с малым шагом сошлифовывания слоев металла толщиной 2-4 мкм. При выборе микрообъемов чугуна для реконструкции графитной фазы соблюдали условие статистической представительности [2].

Для точного плоскостного совмещения изображений исследуемых включений в структуре смежных слоев на матрицу в области изучаемых объектов наносили 4-5 отпечатков алмазного индентора микротвердомера ПМТ-3. Одновременно сошлифовывали исследуемый объект и часть пирамидального углубления отпечатка алмазной пирамиды. Вследствие того, что очертания исследуемых объектов в каждом слое разные, а форма сечения отпечатка пирамиды независимо от его размеров не изменяется, точки пересечения диагоналей квадратных отпечатков использовали в качестве реперных точек в процессе стереологической реконструкции. По этим точкам осуществляли относительную угловую и линейно-плоскостную ориентации изображений последовательных сечений графита.

При совмещении изображений последовательных сечений объектов микроструктуры в горизонтальной плоскости кроме относительной ориентации использовали размеры сечений отпечатков индентора с целью определения шага сошлифовывания – фактической толщины сошлифованного слоя Δh_{ϕ} (в мкм):

$$\Delta h_{\Phi} = \frac{\Delta d}{k_n k_1 k_2},$$

где Δd — разность длин диагоналей отпечатка индентора в двух смежных сечениях образца, мкм; k_n — множитель, учитывающий угол α при вершине пирамиды индентора (при $\alpha = 136^\circ$, $k_n \approx 7$); k_1 — первичное увеличение объекта на негативе, матовом стекле микроскопа или на мониторе компьютера; k_2 — вторичное увеличение (укрупнение) объекта на микрофотографии или контурной зарисовке его сечения.

В процессе сошлифования исследуемых объемов металла, когда суммарная толщина удаленного слоя достигала глубины проникновения алмазного индентора в материал образца, реперные точки возобновляли путем нанесения дублирующих наколов индентором. Эту операцию выполняли до полного сошлифования предшествующих отпечатков, что позволяло сохранить исходную угловую и линейно-плоскостную ориентацию при 25-40 сошлифованиях слоев металла, суммарная толщина которых в несколько раз превышала средний линейный размер единичного графитного включения [5-7].

В качестве примера рассмотрим построение двух 3D моделей графитных включений, которые по форме и структуре отличаются от «идеальных» шаровидных включений. Со стандартно увеличенных микрофотографий последовательных сечений исследуемых объектов (рис. 1, б, в — поз. 1-8) снимали контурные копии одновременно с фиксированными реперными точками — прямоугольными метками в углах микрофотографий на рис. 1, б, в — поз. 9-15.

Эту процедуру выполняли с использованием программы ImageJ (рис. 2), которая является бесплатным инструментом для обработки цифровых изображений [11, 12].

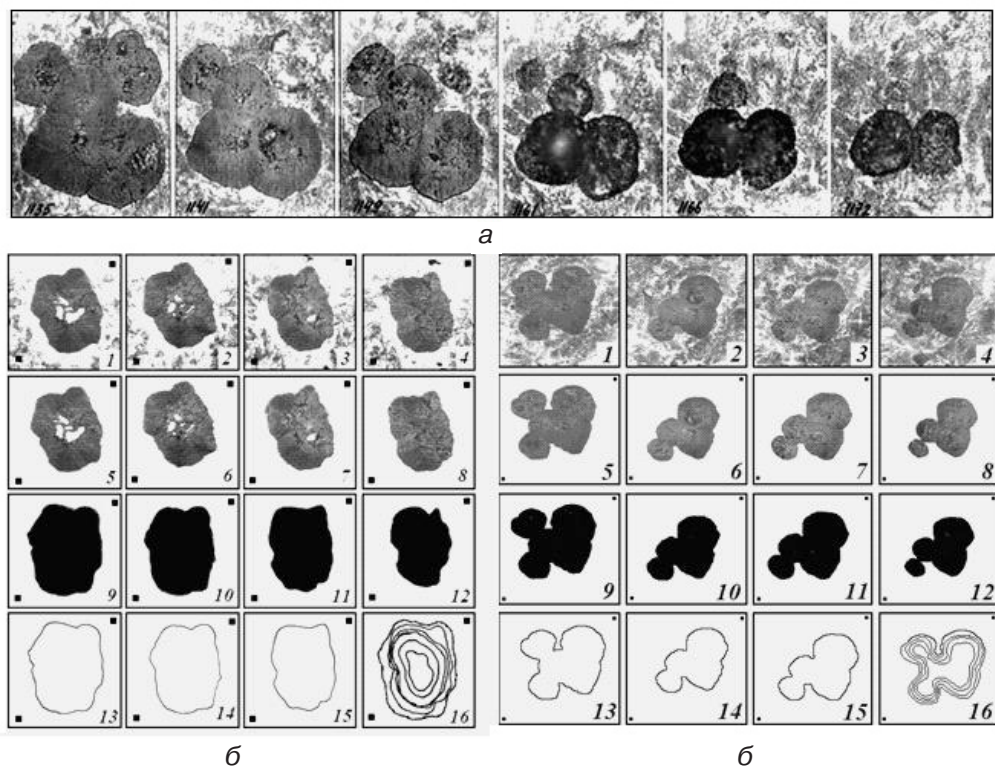


Рис. 1. Микроструктура агрегированного (а, в) и компактного (б) графитных включений в последовательных сечениях: поз. 1-4 — травлено; 5-8 — не травлено; 9-12 — бинаризовано; 13-15 — контуры; 16 — изограммы

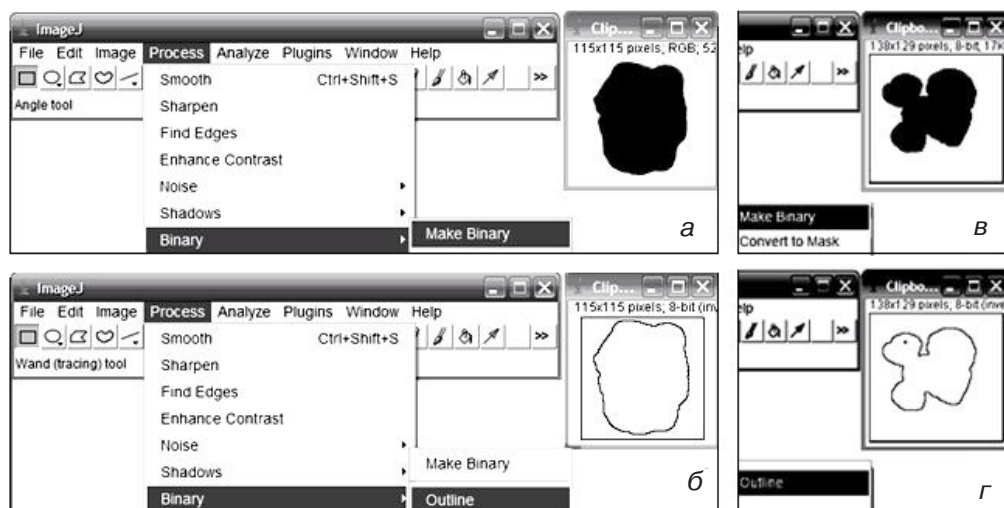


Рис. 2. Скриншоты последовательных стадий обработки микроструктуры компактного (а, б) и агрегированного (в, г) включений графита в программе ImageJ

Она может работать либо в виде онлайн-апплета, либо загружаемого приложения на любом компьютере с Java 1.4 или более поздней версией виртуальной машины.

Для загрузки в программу изображений исследуемого объекта использовали микрофотографии нетравленных шлифов (см. рис. 1, б, в – поз. 5-8), предварительно переведенных из серых полутонов в одноцветные черно-белые изображения (см. рис. 1, б, в – поз. 9-12). Эти изображения последовательно загружали в программу ImageJ, преобразовывали в 8-битовый формат (Image \Rightarrow Type \Rightarrow 8 bit), бинаризовали (Process \Rightarrow Binary \Rightarrow Make Binary) и в результате получали контурную копию исходного изображения (Process \Rightarrow Binary \Rightarrow Outline). Процедура конвертирования исходных изображений компактного (рис. 2, а, б) и агрегированного (рис. 2, в, г) включений в контурные показана на рис. 2.

Серию из 30-ти полученных в программе ImageJ контурных изображений структуры последовательных сечений графитных включений (см. рис. 1, б, в – поз. 13-15) вставили в файл программы Word. С помощью встроенного графического редактора в контурных рисунках установили прозрачный фон внутри и за пределами контура. Затем «прозрачные» изображения последовательно копировали в графический редактор Paint, в котором строили изограмму.

Каждая контурная копия является изогипсой, характеризующей удаление соответствующего сечения объекта от плоскости исходного сечения. Совмещение реперных точек при последовательном наложении контуров очередных сечений объектов на предыдущий контур позволяет составить двумерную картину – изогипсограмму пространственного строения объектов (см. рис. 1, б, в – поз. 16). Относительная ориентация изогипс путем точного совмещения реперных точек дает двумерное представление об изменении формы и рельефа исследуемых объектов в объеме сплава.

Для получения пространственного изображения объекта (3D-модель) использовали программу SolidWorks [13], которая позволяет пользователям ПЭВМ, имеющим лишь средний уровень подготовки для работы в Windows, на практике убедиться в эффективности применения данной программы в литейном материаловедении. Хотя в материаловедении эта программа применяется еще недостаточно широко, перспективы ее практического использования для исследования и объемного моделирования пространственной структуры металлов и сплавов не вызывают сомнений.

Множество возможностей и средств, простота их освоения при конструировании объемных (3D) моделей микро- и макроструктуры металлов позволяют исследователю начать работать с простыми моделями практически сразу, не тратя время на длительное обучение. Система SolidWorks позволяет сконцентрироваться непосредственно на творческом процессе. При этом нет необходимости задумываться о том, где находится та или иная функция. Ее всегда можно найти в меню, палитре или панелях. Интерфейс программы (рис. 3 и 4) прост и интуитивно понятен: на каждой стадии проектирования моделей пользователю предлагаются именно те команды, которые используют в данный момент. SolidWorks охватывает все этапы конструирования – от построения исходного эскиза структурного объекта до создания его объемной 3D-модели и, если необходимо, чертежа.

Процедура построения 3D-модели в программе SolidWorks состояла из двух этапов. На первом этапе для загрузки файла с изогаммой (рис. 1, б, в – поз. 16) открыли графическую область программы (Файл ⇒ Новый ⇒ Деталь ⇒ Эскиз ⇒ Вид спереди). Затем в графическую область вставили точечный рисунок с изогаммой (Вставить ⇒ Объект ⇒ Точечный рисунок). Интерфейс программы после загрузки файла изогаммы показан на рис. 3, а; 4, а).

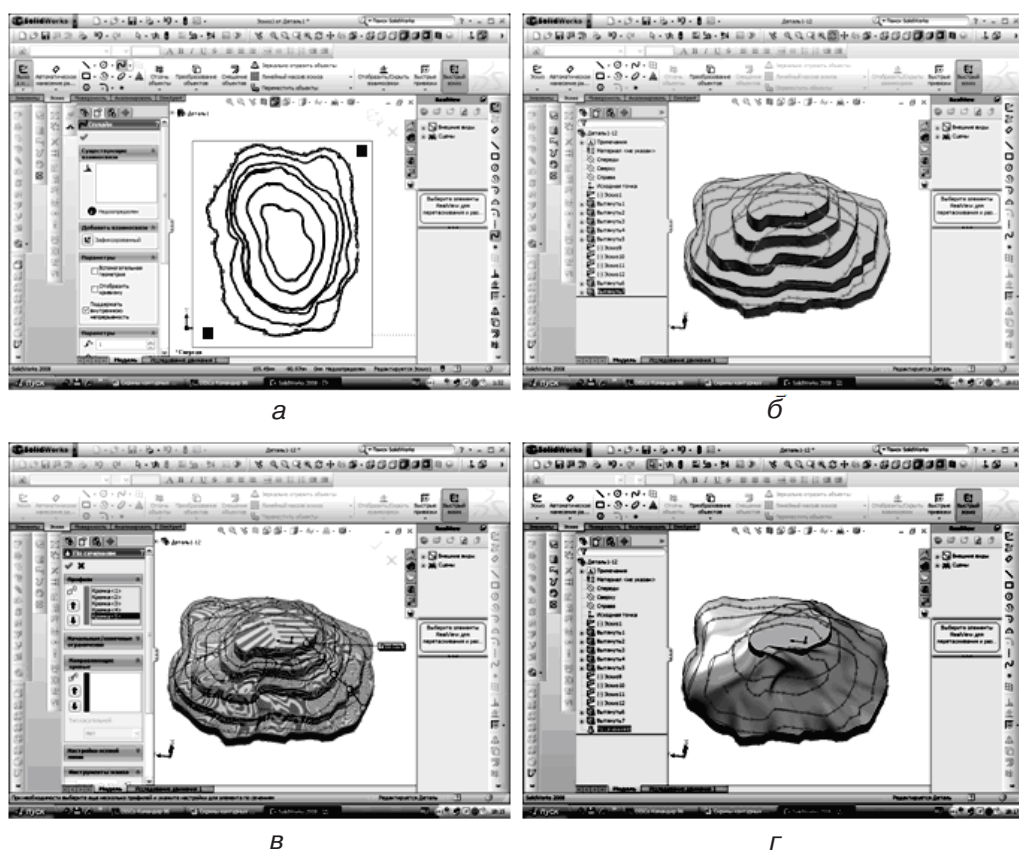


Рис. 3. Скриншоты последовательных стадий процесса реконструкции компактного включения графита в программе SolidWorks: а – изогамма; б – ступенчатая модель; в – сглаживание поверхности; г – реконструированная модель включения

Выбрав в меню программы инструмент сплайн, щелчками мыши обрисовывали все контуры изогаммы и сохраняли полученное изображение в виде эскиза для будущей модели объекта. Затем выделяли исходный точечный рисунок и удаляли

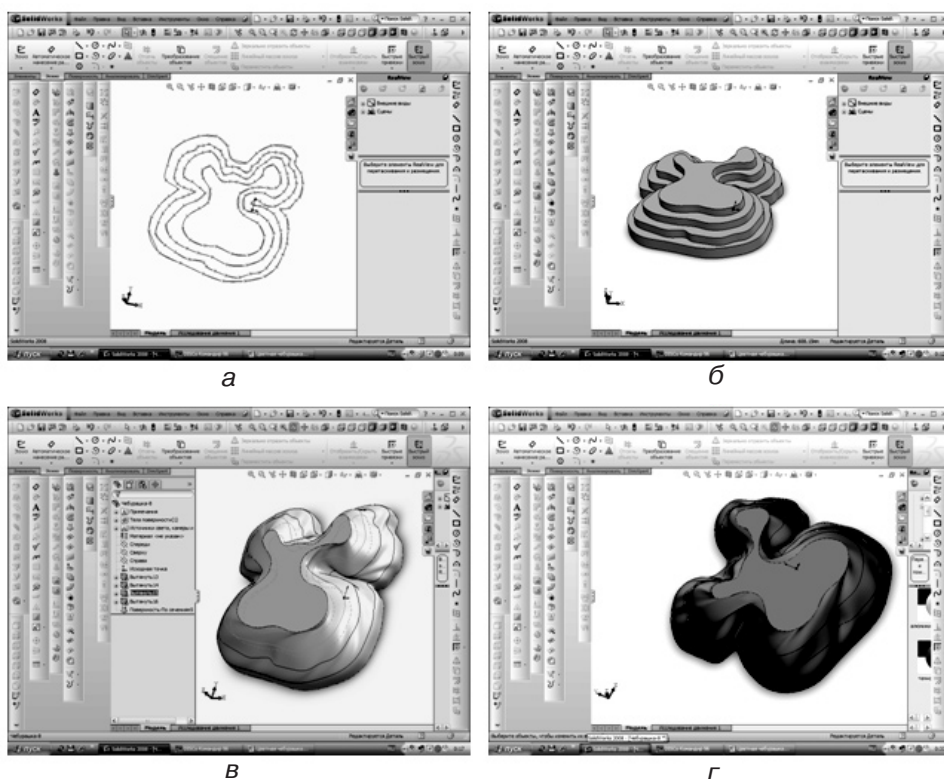


Рис. 4. Скриншоты последовательных стадий процесса реконструкции агрегированного включения графита в программе SolidWorks: а – изограмма; б – ступенчатая модель; в – сглаживание поверхности; г – реконструированная модель включения

его из программы. При этом изображение изограммы остается в графической области программы для последующей работы.

На втором этапе каждый контур изограммы последовательно выделяли курсором и с помощью инструмента вытягивали бобышку на толщину слоя сошлифования. В результате получали объемные ступенчатые изображения искомых моделей (см. рис. 3, б; 4, б). Для превращения моделей объектов со ступенчатой структурой в объекты со сглаженной поверхностью использовали инструмент бобышка по сечениям. Выполняя последовательно щелчки мышью на каждом уступе ступенчатых моделей (см. рис. 3, в; 4, в), получали искомые сглаженные 3D-модели с видимыми контура-

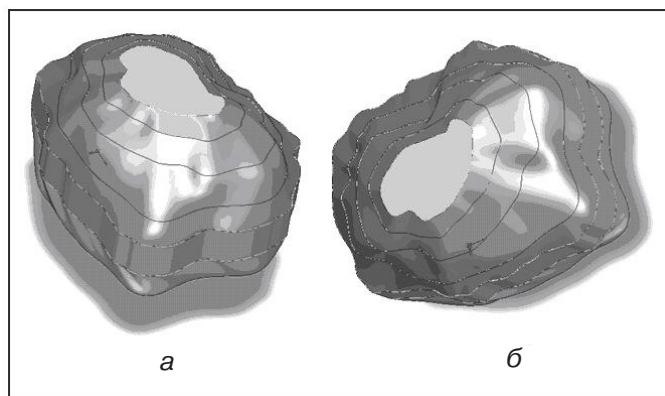


Рис. 5. Реконструированная модель компактного включения графита: а – вид с боку; б – вид сверху

ми изогипса (см. рис. 3, г; 4, г). На невидимой стороне модели, соответствующей максимальной контуре изограммы, по аналогичной процедуре создают другую – «теневую» часть модели. Используя инструменты *вращения*, полученные 3D-модели можно рассматривать под любым углом (рис. 5) и анализировать при разных эффектах освещения и с различной текстурой поверхности моделей (рис. 6).

Выводы

- Применение программы ImageJ дает возможность выполнять предварительную подготовку объектов микроструктуры для получения их точных контурных изображений и построения изограммы.

- Использование программы SolidWorks позволяет по предварительно подготовленным изограммам объектов микроструктуры создавать их пространственные 3D-модели.

- Изучение пространственного строения микроструктурных объектов по компьютерным 3D-моделям существенно расширяет возможности исследователя для анализа морфологии и вероятного механизма их формирования.

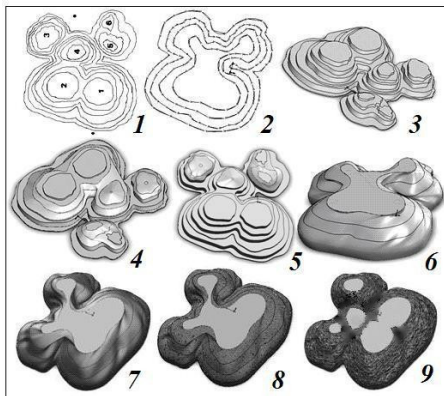


Рис. 6. Детализированные стадии процесса реконструкции агрегированного включения графита: 1-2 – изограммы; 3-5 – ступенчатые модели; 6 – сглаженная модель; 7-8 – промежуточные модели с разной текстурой поверхности; 9 – готовая модель включения



Список литературы

1. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 375 с.
2. Чернявский К. С. Стереология в металловедении. – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.
3. Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н. Основы металлографии чугуна. – М.: Металлургия, 1969. – 416 с.
4. Таран Ю. Н., Мазур В. И. Структура эвтектических сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 312 с.
5. Соценко О. В. Пространственное распределение графита в отливках из ВЧШГ // Литейн. пр-во. – 1983. – № 11. – С. 4-6
6. Соценко О. В. Особливості формування кулястого графіту в половинчастому чавуні // Металознавство та обробка металів. – 1999. – № 4. – С. 3-8
7. Соценко О. В. Аномальні форми кулястого графіту в валковому чавуні // Теорія і практика металургії. – 1999. – № 4. – С. 16-18
8. Туркевич Н. Г. Реконструкция микроскопических объектов по гистологическим срезам. – М.: Медицина, 1967. – 175 с.
9. Пространственная реконструкция биологических объектов с помощью компьютерного моделирования / И. В. Твердохлеб, И. С. Хрипков, Л. А. Романенко и др. // III науч. конф. «Карповські читання». – Дніпропетровськ, 2006. – С. 57-59.
10. Твердохлеб І. В. Просторова реконструкція біологічних об'єктів за допомогою комп'ютерного моделювання // Морфологія. – 2007. – Т. 1, № 1. – С. 135-139.
11. Image J. Image Processing and Analysis in Java // Режим доступа: <http://rsb.info.nih.gov/ij> - Загл. с экрана.
12. ImageJ 1.43m. Processing and Analysis in Java. – Режим доступа: http://portablew07.ucoz.ru/news/imagej_143m/2009-12-09-1637 - Загл. с экрана.
13. Дударева Н. Ю., Загайко С. А. Solid Works 2007 на примерах. – Петербург, 2007. – 528 с.

Поступила 12.01.2011