

А.А. Журба, А.И. Михалёв, С.И. Губенко

АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ

Анотація. В роботі розглядаються поверхні неметалевих включень при пластичній деформації сталі та зміна фрактальних характеристик із збільшенням ступеня їх деформації. Побудовано емпіричні розподіли локальних фрактальних розмірностей неметалічних включень, а також проведений порівняльний аналіз фрактальних характеристик, отриманих класичним і модифікованим алгоритмом BOX COUNTING.

Ключевые слова: пластическая деформация стали, фрактальная размерность, неметаллические включения, фрактальное распределение, фрактальные сигнатуры, глобальное и локальные фрактальные распределения, классический и модифицированный алгоритм box counting.

Введение. Скейлинговое свойство фрактальных объектов обеспечивает постоянство их основных геометрических особенностей при изменении масштаба. К объектам, которые характеризуются фрактальными свойствами, можно отнести и металлические сплавы с неметаллическими включениями [2]. При этом известно [1], что неметаллические включения оказывают существенное влияние на пластичность и деформируемость сталей. В свою очередь, неметаллические включения являются концентраторами напряжений и деформаций. В этой связи представляет интерес исследование фрактальными методами поведения системы включение-матрица при пластической деформации сталей как в случае пластичных так и недеформируемых включений.

Целью данной работы является анализ фрактальных характеристик поверхностей неметаллических включений при пластической деформации стали, полученных классическим и модифицированным алгоритмами Box Counting.

Материалы и методики исследования. В процессе исследования анализировались фотографии поверхностного слоя образцов из

стали 08Ю, содержащей неметаллические включения после горячей деформации прокаткой при температуре 1100°C (рис. 1, 2).

Известно, что поведение неметаллических включений при пластической деформации зависит от их типа, способа деформации, температуры плавления или размягчения, температуры и степени деформации, а также от соотношения физико-механических свойств включения и стальной матрицы, которая в свою очередь определяется температурой. Неметаллические включения, окруженные деформированной стальной матрицей находятся в сложно-напряженном состоянии, определяемом схемами главных напряжений и главных деформаций при обработке стали давлением [1].

Пластичность и сопротивление деформации включений зависят от схемы главных деформаций, которые определяют характер перераспределения недеформируемых включений в пластической матрице и изменение формы пластичных включений в процессе деформирования.

В условиях высоких давлений и температур взаимодействие контактирующих поверхностей включения и матрицы происходит путем установления механического контакта и развития диффузионных процессов. Между включением и стальной матрицей развивается контактное трение, что обусловлено взаимодействием, возникающим в месте их соприкосновения и препятствующим их относительному перемещению.

Включения сульфидов и силикатов, железа, марганца пластически деформируются и с увеличением степени деформации меняют свою форму с компактной на вытянутую в направлении прокатки (рис. 1). Оксидные включения пластически не деформируются, часто хрупко разрушаются и осколки разрушенных включений, увлекаясь пластически деформирующейся стальной матрицей, перераспределяются и образуют строчки в направлении прокатки (рис. 2).

В процессе пластической деформации стали изменяется и ее микроструктурная фрактальная размерность, которая в данном случае интегрально характеризует самоподобность коэрцитивных свойств материала.



Рисунок 1 - Сталь 08Ю. Изменение формы пластичного сульфида при деформации стали 08Ю со степенью деформации ε : а) $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 20\%$; в) $\varepsilon = 35\%$; г) $\varepsilon = 60\%$



Рисунок 2 - Сталь 08Ю. Разрушение недеформируемых оксидных включений при пластической деформации стали 08Ю со степенью деформации ε : а) $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 20\%$; в) $\varepsilon = 35\%$; г) $\varepsilon = 60\%$

В процессе исследований фрактальная размерность микроструктур стали определялась двумя методами: классическим и модифицированным методами BOX COUNTING, которые могут быть применены к изображениям различной структуры и позволяют определить фрактальную размерность не строго самоподобных объектов.

Для оценки фрактальной размерности классическим алгоритмом BOX COUNTING, эвклидово пространство, которое содержит изображение объекта, разделяется сеткой с ячейкой размера r и подсчитываются непустые, занятые исследуемым объектом, квадраты $N(r)$. Далее размер r уменьшается и снова подсчитывается количество непустых полей $N(r)$ (рис. 3а). Наклон графика в логарифмическом масштабе $N(r)$ от $1/r$ соответствует величине размерности (рис. 3б) [2].

При оценке фрактальной размерности модифицированным алгоритмом BOX COUNTING, в классический алгоритм вносится ряд изменений. Эвклидово пространство, которое содержит изображение объекта, разделяется сеткой с ячейкой размера r и подсчитываются непустые, занятые исследуемым объектом, квадраты $N(r)$. При этом непустыми квадратами считаются только те, которые содержат в себе

границу. Дальнейшие действия совпадают с классическим алгоритмом: размер r уменьшается и снова подсчитывается количество непустых полей $N(r)$. Наклон графика в логарифмическом масштабе $N(r)$ от $1/r$ соответствует величине размерности. Сложность реализации этого алгоритма заключается в том, что изображение содержит квадраты полностью окрашенные, которые необходимо учитывать только в том случае, если они являются граничными. Полностью окрашенный квадрат будет считаться граничным, если хотя бы один из соседних квадратов не окрашен (рисунок 4). Отличие значений, полученное для двух алгоритмов, заключается в том, что в зависимости от конфигурации границы, могут быть потеряны квадраты, которые учитывались в классическом алгоритме [3].

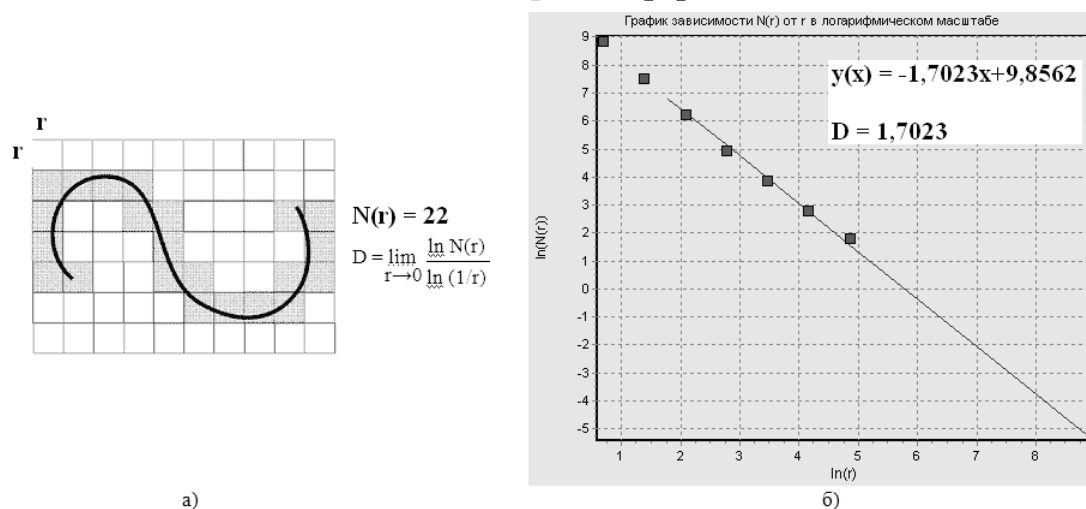


Рисунок 3 - Метод BOX COUNTING: а) пример разбиения изображения поверхности; б) график зависимости $N(r)$ от r в логарифмическом масштабе

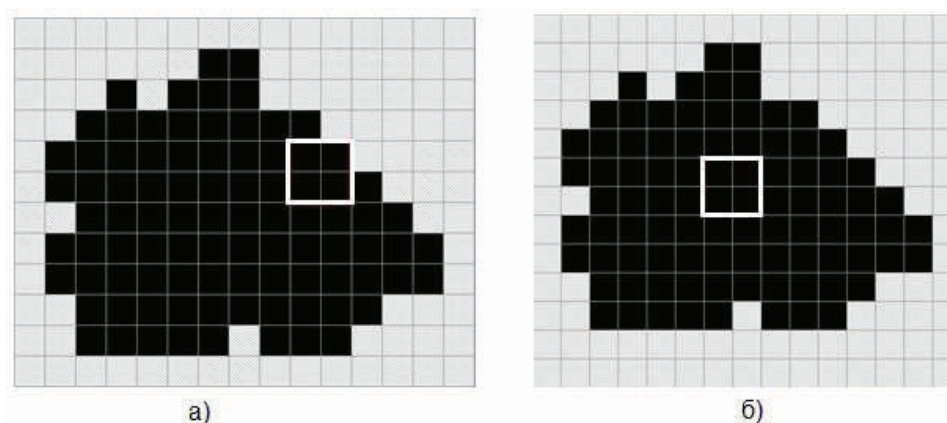


Рисунок 4 - Пример граничного (а) и не граничного (б) квадратов

Для построения фрактальных распределений использовался метод скользящего окна. Данный метод заключается в определении фрактальной размерности в пределах окна, размер которого можно задавать произвольно. Окно попиксельно перемещается по изображению. При этом на каждом шаге производится вычисление фрактальной размерности. Размер окна зависит от масштаба δ и рассчитывается из соотношения $2\delta+1$ [4]. На основании классического и модифицированного алгоритмов строились фрактальные распределения.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе пластической и упругой деформации стали неметаллические включения претерпели ряд изменений. Степень деформации ε : на первой стадии $\varepsilon=10\%$; на второй стадии $\varepsilon=20\%$; на третьей - $\varepsilon=35\%$; на четвертой - $\varepsilon=60\%$. В таблицах 1 и 2 приведены значения классической и модифицированной фрактальной размерности неметаллических включений на четырех стадиях пластической и упругой деформации.

Таблица 1

Изменение величины фрактальной размерности пластичных неметаллических включений в процессе деформации стали

Описание	Степень деформации ε , %	Пластичные включения	
		Фрактальная размерность (классический алгоритм)	Фрактальная размерность (модифицированный алгоритм)
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	10	$D = 1.8567$	$D = 0.9492$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	20	$D = 1.9281$	$D = 0.9548$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	35	$D = 1.9422$	$D = 1.0206$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	60	$D = 1.9455$	$D = 1.0675$

Изменение величины фрактальной размерности недеформируемых неметаллических включений в процессе деформации стали

Описание	Степень деформации ε , %	Недеформируемые включения	
		Фрактальная размерность (классический алгоритм)	Фрактальная размерность (модифицированный алгоритм)
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	10	$D = 1.8093$	$D = 0.8653$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	20	$D = 1.8114$	$D = 0.9157$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	35	$D = 1.8615$	$D = 1.0340$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	60	$D = 1.9417$	$D = 1.0412$

Из таблиц 1 и 2 видно, что фрактальная размерность имеет тенденцию к увеличению при увеличении степени деформации. При этом модифицированный алгоритм BOX COUNTING более чувствителен к изменению формы включений.

На рисунках 5, 6 представлены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей неметаллических включений при пластической деформации (по абсциссе отложены значения локальных фрактальных размерностей, по ординате - частота их появлений). При этом слева на рисунках представлены фрактальные распределения, построенные на основании фрактальных размерностей, которые посчитаны классическим алгоритмом BOX COUNTING, а справа - фрактальные размерности, вычисленные модифицированным алгоритмом BOX COUNTING. С другой стороны видно, что более информативными являются фрактальные распределения, построенные на основании размерностей, вычисленных при помощи классического алгоритма BOX COUNTING. Они позволяют увидеть многомодальность и различие характера распределений.

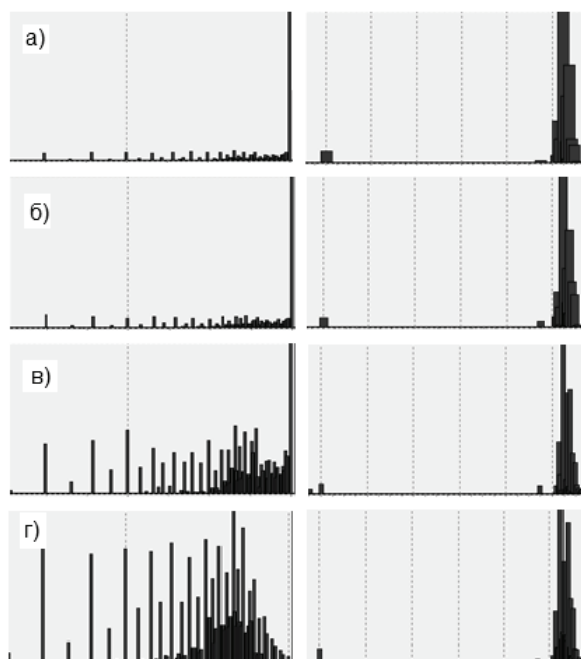


Рисунок 5 - Эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей пластичных неметаллических включений при пластической деформации стали (размер скользящего окна 15x15 пикселей), полученных классическим (слева) и модифицированным (справа) алгоритмом BOX

COUNTING: а) степень деформации $\varepsilon = 10\%$;

б) $\varepsilon = 20\%$; в) $\varepsilon = 35\%$; г) $\varepsilon = 60\%$

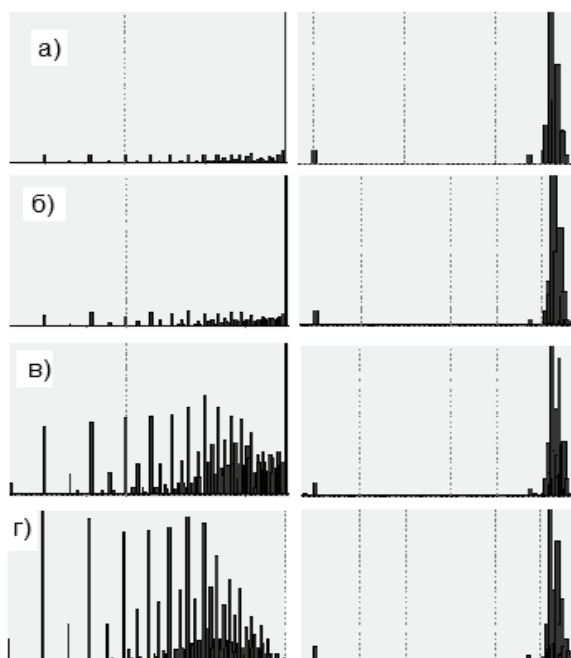


Рисунок 6 - Эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей недеформируемых неметаллических включений при пластической деформации стали (при размере скользящего окна 15x15 пикселей), полученных классическим (слева) и модифицированным (справа) алгоритмом

BOX COUNTING: а) степень деформации $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 20\%$;

в) $\varepsilon = 35\%$; г) $\varepsilon = 60\%$

Для оценки фрактальной размерности используют фрактальные сигнатуры, которые представляют собой зависимость оценок типа от масштаба наблюдения. Построив фрактальную сигнатуру можно различать самоподобные объекты и определять размер некоторых их элементов. Если изображение состоит из нескольких самоподобных структур, то различия сигнатур будут проявляться сразу в нескольких диапазонах масштабов. На рисунках 7, 8 представлены фрактальные сигнатуры пластичных и недеформируемых неметаллических включений в процессе деформации стали со степенью деформации $\varepsilon = 10\%$ и $\varepsilon = 60\%$. При этом видно, что фрактальные сигнатуры неметаллических включений при разных степенях деформации стали различны.

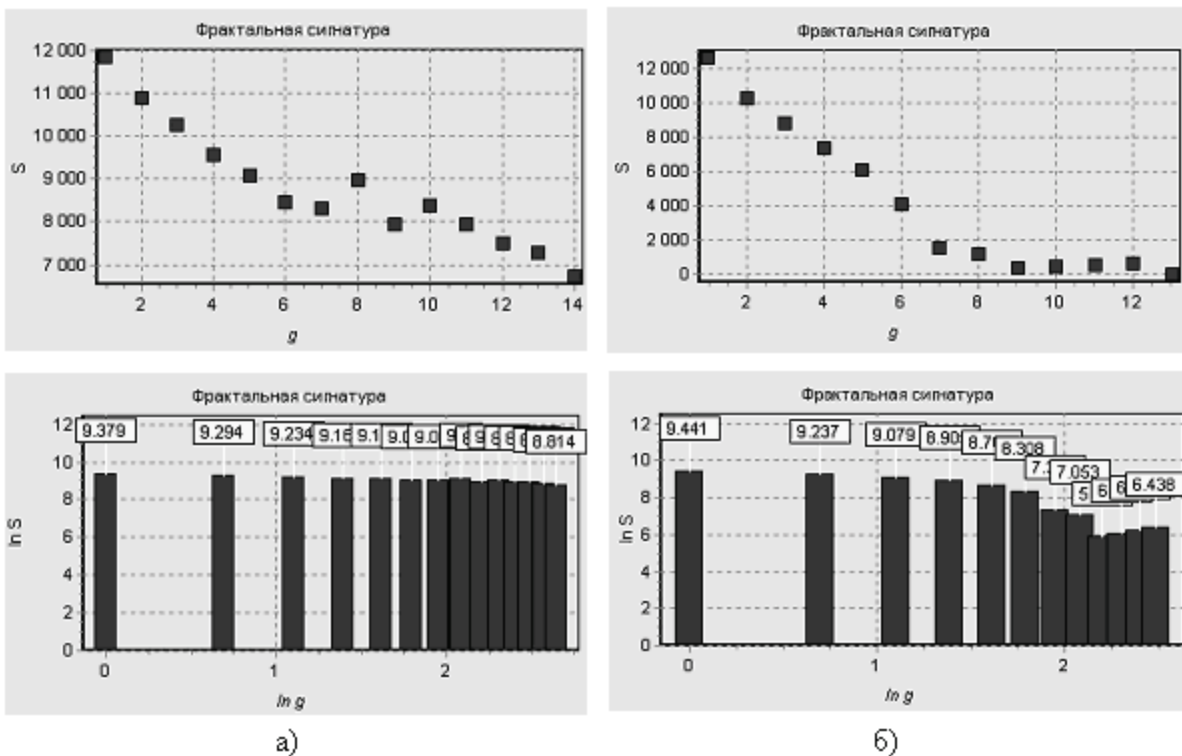


Рисунок 7 - Фрактальные сигнатуры пластичных неметаллических включений в процессе деформации стали:
 а) степень деформации $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 60\%$

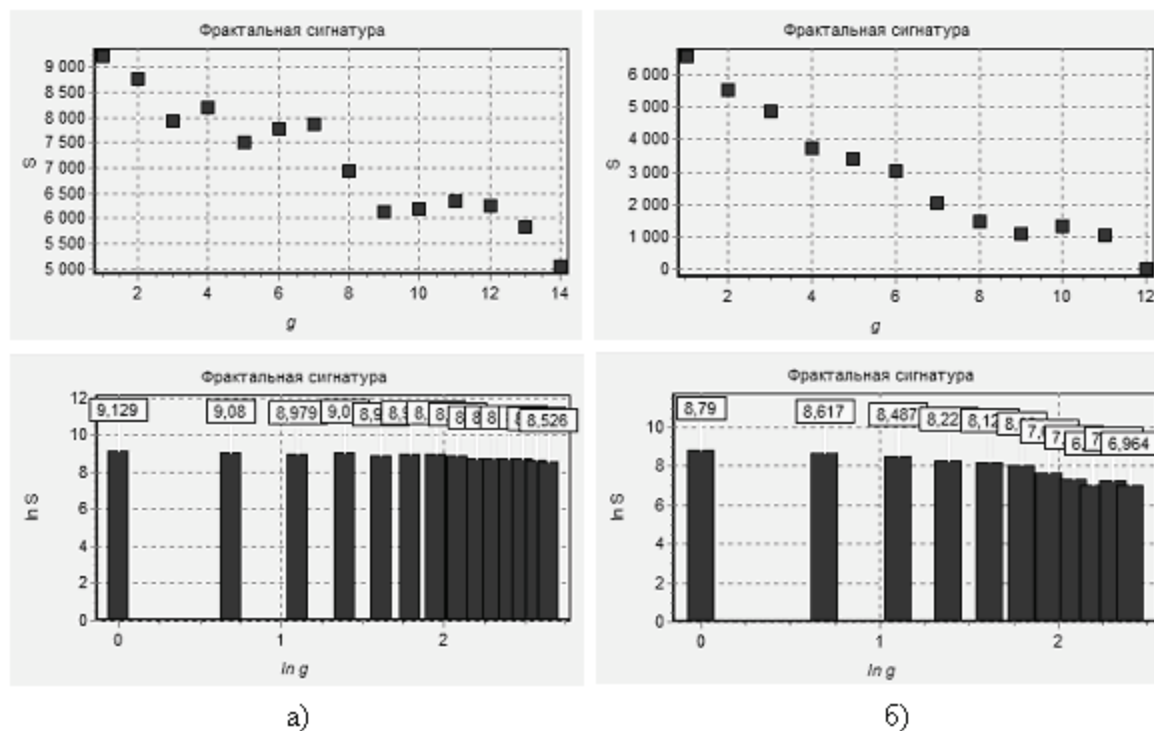


Рисунок 8 - Фрактальные сигнатуры недеформируемых неметаллических включений в процессе деформации стали:

а) степень деформации $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 60\%$

Выводы

В данной статье были рассмотрены поверхности неметаллических включений при пластической деформации стали и изменение их фрактальных характеристик с увеличением степени деформации. Были построены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей неметаллических включений, а также произведен сравнительный анализ фрактальных характеристик, полученных классическим и модифицированным алгоритмом BOX COUNTING. Разработан программный продукт, позволяющий оценивать фрактальную размерность и строить распределение локальных фрактальных размерностей.

В процессе пластической деформации стали изменяется форма неметаллических включений, а, следовательно, и их фрактальная размерность. Выявлено, что значение фрактальной размерности растет с увеличением степени деформации. Значение фрактальной размерности неметаллических включений при пластической деформации стали со степенью деформации $\varepsilon = 60\%$, полученное классическим алгоритмом BOX COUNTING, в среднем на 6% больше фрактальной размерности неметаллических включений при степени деформации

$\varepsilon=10\%$. Для модифицированного алгоритма эта цифра составляет в среднем 15-16%, что говорит о большей чувствительности данного метода к изменению формы включений.

При пластической деформации стали с изменением степени деформации, меняет свое значение не только фрактальная размерность, но изменяется и характер фрактального распределения. Выявлено, что фрактальные распределения, построенные на основании размерностей, вычисленных при помощи классического алгоритма BOX COUNTING, являются более информативными и позволяют увидеть однородность неметаллических включений при степени деформации $\varepsilon=10\%$ и $\varepsilon=20\%$, а также многомодальность при степени деформации $\varepsilon=35\%$ и $\varepsilon=60\%$. Распределения, построенные с помощью модифицированного алгоритма BOX COUNTING, не меняют характер в зависимости от степени деформации.

Построение фрактальной сигнатуры позволяет различать самоподобные объекты и определять размер некоторых элементов, что позволяет оценивать их фрактальную размерность. Оценка фрактальных сигнатур неметаллических включений показала, что при разных степенях деформации стали они различны.

В заключение можно отметить, что модифицированный алгоритм BOX COUNTING целесообразно использовать для определения фрактальной размерности при отслеживании изменений границ объектов, но построение фрактальных распределений на его основе не имеет смысла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губенко С.И., Парусов В.В., Дервянченко И.В. Неметаллические включения в стали. – Д.: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
2. Журба А.А., Михалёв А.И., Губенко С.И., Черноиваненко Е.А. Анализ изменений фрактальной размерности и ее распределения в процессе формирования композитной структуры быстрорежущей стали // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4(81). – Дніпропетровськ, 2012. – С.155-164.
3. Журба А.О., Михальов О.І. Особливості визначення фрактальної розмірності методом BOX COUNTING у задачах металознавства // Інформатика та системні науки (ІСН-2012): матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Полтава, 1-3 березня 2012р. – с.109-111.
4. Потапов А.А., Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Пахомов А.А., Потапова В.А.. Новейшие методы обработки изображений. / Под ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.