

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ИЗЛОМОВ ПРИ ПОМОЩИ КОНФОКАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ

© 2015

Е.Д. Мерсон, аспирант*В.А. Данилов*, магистрант*Д.Л. Мерсон*, доктор физико-математических наук, профессор
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: конфокальный лазерный сканирующий микроскоп; металлические материалы; излом; микро-рельеф; фрактография.

Аннотация: Исследование поверхности разрушения деталей является первоначальным и весьма ответственным этапом на пути выяснения причин и хронологии процесса разрушения. При этом качество и объективность фрактографического анализа во многом зависит от эффективности инструмента, применяемого для изучения излома. Основным недостатком традиционных методов, применяемых в данной области, является двухмерность получаемых изображений, что в значительной степени затрудняет количественную оценку поверхности разрушения. В этом смысле высокой перспективностью обладает метод конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ), обеспечивающий высокую точность измерения геометрии поверхности объектов в трехмерном пространстве, широкий диапазон сканирования по вертикальной оси, необходимую глубину резкости и при этом не требующий электропроводности и специальной подготовки поверхности образца, а также наличия вакуума.

В настоящем исследовании разработана и апробирована методика съемки и последующего анализа изломов ударных образцов при помощи КЛСМ. В качестве объектов исследования выбраны изломы образцов стали 20 в полностью хрупком и полностью вязком состояниях, что достигалось за счет ударных испытаний образцов, выдержанных при температурах $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Установлены оптимальные увеличение, тип объектива, шаг сканирования и способ фильтрации получаемых изображений от шумов. Кроме того, показано, что в качестве меры вязкости поверхности разрушения может быть использован такой параметр, как характеристическая площадь поверхности разрушения S_r , величина которого существенно изменяется при переходе от хрупкого излома к вязкому. Показано, что применение КЛСМ позволяет перевести анализ разрушения металлических изделий с качественного на количественный уровень, повышая объективность и точность фрактографических исследований.

ВВЕДЕНИЕ

Фрактография (анализ изломов материалов) – это один из важнейших научно-исследовательских методов, применяемых при выявлении причин разрушения и оценке качества изделий, а также используемых при изучении свойств твердых тел и механизмов их разрушения [1; 2]. В течение последних лет актуальным направлением фрактографических исследований является разработка методов количественного описания рельефа поверхностей разрушения материалов, а также их микроструктур [3–10]. Связано это с тем, что в большинстве случаев фрактографический анализ носит лишь качественный описательный характер, что негативно сказывается на объективности получаемых результатов. Так, например, распространенной задачей является определение соотношения вязкой и хрупкой составляющих в изломах сталей.

Однако в существующих на сегодняшний день стандартных методиках отсутствует какой-либо регламентированный количественный параметр, который бы описывал степень вязкости поверхности разрушения и одновременно мог бы быть легко измерен с помощью современного оборудования. Следовательно, корректность определения соответствия рельефа того или иного участка поверхности излома хрупкому или вязкому разрушению полностью зависит от опыта и навыков исследователя. Во многом данный недостаток объясняется ограниченным набором инструментов, применяемых для фрактографического анализа.

Наиболее распространенными методами исследования изломов являются световая, электронная сканирующая

и просвечивающая микроскопии. Световая микроскопия (СМ) используется в основном лишь для оценки общего вида и особенностей макрорельефа излома, где требуются небольшие увеличения. Применение же ее при больших увеличениях ограничено из-за малой глубины фокуса, которой недостаточно для исследования сильно развитых поверхностей разрушения [1]. Для применения в фрактографических целях просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) необходимо изготовление специальных тонких реплик с поверхности излома, что, во-первых, несколько искажает реальную картину, а во-вторых, является достаточно сложной и трудоемкой операцией. По этой причине ПЭМ применяется только в специфических случаях, когда необходимо достичь чрезвычайно высоких увеличений для получения информации об очень тонких элементах структуры излома.

Наибольшее распространение в фрактографическом анализе получила электронная сканирующая микроскопия (СЭМ), что обусловлено ее высокой разрешающей способностью и достаточной глубиной фокуса, а также возможностью исследования поверхности излома без изготовления реплик [11]. Вместе с тем для СЭМ требуются: электрическая проводимость объекта исследования, высокая чистота его поверхности, а также вакуум, что также зачастую затрудняет применение данного метода.

Однако, пожалуй, основным недостатком всех перечисленных методов является двумерное представление изображения, используя которое, невозможно производить точные измерения размеров во всех трех направлениях пространства. В то же время для полного количественного описания рельефа поверхностей разрушения

такая возможность необходима. В частности, она требуется для измерения площади рельефа поверхности разрушения. Действительно, известно, что энергия, затраченная на образование новой поверхности, прямо пропорциональна площади данной поверхности. Поэтому хрупкое разрушение материала, для которого необходима минимальная энергия, сопровождается образованием практически гладких поверхностей, и наоборот, изломы вязких материалов имеют сильно развитый рельеф [1]. Следовательно, площадь поверхности разрушения может служить мерой вязкости разрушения материала. Тогда задача объективного количественного описания вязкости излома в большинстве случаев сводится к корректному измерению его рельефа и получению массива данных, содержащих трехмерные координаты каждой точки его поверхности.

Существует несколько методов, позволяющих производить такого рода измерения. Основными из них являются: атомно-силовая микроскопия (АСМ), световая интерферометрия (СИ), стереосъемка при помощи СЭМ и конфокальная лазерная сканирующая микроскопия (КЛСМ). АСМ и СИ хотя и позволяют достичь достаточно высоких значений разрешающей способности, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, но из-за малого рабочего диапазона вдоль оси Z не подходят для исследования изломов, поверхность которых часто имеет большие перепады высот. Стереосъемка при помощи СЭМ обладает всеми описанными выше недостатками метода СЭМ.

Наиболее перспективным, с точки зрения решения рассматриваемой задачи, является метод КЛСМ. Современные приборы данного типа позволяют получать трехмерные изображения поверхности с достаточно большим диапазоном сканирования вдоль оси Z, обеспечивая при этом высокую точность размеров во всех трех направлениях и разрешающую способность до 110 нм в плоскости XY и до 10 нм вдоль оси Z. В качестве источника света в КЛСМ используется лазер, следовательно, электрическая проводимость объекта не требуется, а отсутствие необходимости в вакуумной системе позволяет снизить требования к чистоте поверхности образца. Наиболее широкое применение данный вид микроскопии нашел в медицине, однако многие работы демонстрируют высокую эффективность использования данного метода и для решения материаловедческих задач [12–15]. В том числе в некоторых работах были сделаны попытки применения КЛСМ для исследования поверхностей разрушения металлических и других материалов [16–20] и отмечена высокая перспективность данного направления исследований.

Целью настоящей работы было установить возможность применения конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для *количественной* оценки вязкости поверхности разрушения низкоуглеродистой стали.

МЕТОДИКА

Стандартные образцы размером 10×10×55 мм с U-образным надрезом для испытания на ударный изгиб были вырезаны электроискровым методом из листа стали марки 20 (хим. состав в таблице 1). Испытания проводили при помощи маятникового копра JB-W300, Time Group на образцах: 1) охлажденных в жидком азоте до –196 °С и 2) нагретых до +150 °С. При этом удавалось

получить полностью хрупкий излом в первом случае и полностью вязкий во втором. Исследование изломов образцов проводилось при помощи КЛСМ Lext OLS4000, Olympus.

Принцип работы КЛСМ Lext OLS4000 основан на использовании конфокальной оптической схемы. Суть ее заключается в специальной диафрагме, расположенной между объектом, на который падает свет, и детектором отраженного излучения. Данная диафрагма, представляющая собой непрозрачный диск с отверстием маленького диаметра в центре, устанавливается таким образом, чтобы через нее могли проходить только те лучи света, которые отражаются от точек поверхности, находящихся в фокальной плоскости объектива микроскопа. В то же время попадание на детектор так называемых внефокусных лучей света, которые отражаются от областей поверхности, расположенных выше и ниже фокальной плоскости, ограничено. В качестве источника света в данном микроскопе используется полупроводниковый фиолетовый лазер с длиной волны 405 нм, что позволяет достичь разрешающей способности в плоскости XY, равной ~120 нм. Интенсивность излучения лазера определяет яркость изображения и может задаваться пользователем. Луч лазера, пройдя через систему оптических элементов, попадает на двухкоординатный XY электромагнитный сканер, после чего проходит через один из объективов и фокусируется на определенной точке поверхности образца. Отразившись от поверхности, луч проходит через объектив и с помощью дихроичного зеркала перенаправляется в конфокальную диафрагму, отсекающую внефокусные лучи света, после чего попадает в детектор (фотоумножитель), где регистрируется мгновенное значение интенсивности луча. С помощью сканера лазерный луч с высокой частотой «построчно» сканирует в горизонтальной плоскости XY поверхность объекта, находящуюся в поле зрения объектива. При этом детектор производит регистрацию значений интенсивности через равные промежутки времени и записывает их в память компьютера. Таким образом, изображение оказывается сформировано из некоторого количества точек (пикселей) с известными значениями интенсивности. Количество точек определяет разрешение получаемого изображения. Для стандартных задач оно равно 1024×1024 точек. Увеличение микроскопа регулируется путем выбора одного из пяти стандартных объективов.

Получение трехмерного изображения достигается за счет перемещения объектива в вертикальной плоскости. Высокоточный пьезопривод в сочетании с прецизионной системой контроля перемещения обеспечивает точное положение объектива вдоль оси Z, позволяя получать изображения с разрешением по вертикали до 10 нм. В процессе сканирования объектив перемещается перпендикулярно поверхности объекта с определенным шагом, заданным пользователем, при этом на каждый такой шаг, по методике, описанной выше, создается 2D-снимок (оптический срез), состоящий из 1024×1024 точек. Разрешение вдоль оси Z в данном случае определяется величиной шага. Таким образом, по окончании съемки имеется массив данных, состоящий из 1024×1024 столбцов точек, где количество точек в столбце определяется количеством пройденных шагов (количеством оптических срезов). Далее в каждом таком столбце находится

точка с максимальным значением интенсивности и соответствующая ей координата положения объектива по оси Z. Создается изображение, состоящее из 1024×1024 точек, каждая из которых имеет свое значение интенсивности и значение высоты по оси Z. В конечном результате формируются: 1) 2D-снимок с высокой глубиной резкости, без размытых областей независимо от перепадов высот различных точек поверхности объекта и 2) 3D-модель поверхности объекта с сохранением массива данных, содержащих точные координаты XYZ для каждой точки поверхности.

Полученные изображения могут содержать оптические шумы, выраженные в виде резких пиков и провалов вдоль оси Z на 3D-снимке. Происходит это в том случае, если исследуемая поверхность образца имеет сильную неравномерность отражательной способности и разброс интенсивности в пределах снимка превышает границы динамического диапазона детектора. В частности, такая ситуация возникает при съемке хрупких изломов из-за разного наклона фасеток к источнику света. В таком случае перед началом каких-либо измерений необходимо произвести фильтрацию изображения с помощью одного или нескольких фильтров, представленных в стандартном программном обеспечении, поставляемом в комплекте с микроскопом.

Программное обеспечение микроскопа позволяет производить весь комплекс геометрических измерений получаемых изображений, включая вычисление площади рельефа поверхности, а также параметров линейной и плоскостной шероховатости в соответствии с существующими стандартами. Опираясь на рассуждения, приведенные во введении, в качестве параметра, описывающего характер поверхности разрушения, была выбрана характеристическая площадь поверхности S_r – площадь рельефа поверхности, отнесенная к площади поля зрения.

Тем не менее, прежде чем перейти непосредственно к измерениям, требовалось отработать методику получения изображений, т. к. существует несколько параметров съемки, которые могут существенно влиять на окончательное значение искомых величин: 1) выбор объектива и увеличения; 2) шаг сканирования вдоль оси Z; 3) выбор фильтра для устранения оптических шумов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отработка методики съемки

Выбор объектива и увеличения. Первоначально для решения поставленных задач требовалось подобрать подходящий объектив. Поскольку микроскоп позволяет

производить панорамную сшивку изображений и размер области съемки фактически неограничен, то увеличение объектива должно было быть по возможности наибольшим, т. к. разрешающая способность при этом также максимальна. Однако существует ряд других причин, по которым применение некоторых объективов в данной работе оказалось ограничено. В стандартной комплектации микроскоп Lext OLS4000 оснащен пятью объективами. Помимо этого, в наличии имелось два дополнительных длиннофокусных объектива. Параметры всех объективов приведены в таблице 1.

Объективы MPLFLN5X и MPLFLN10X имеют достаточно низкое увеличение и, согласно инструкции, не предназначены для измерений. Действительно, изображения, полученные с помощью данных объективов, были сильно искажены вследствие большого количества шумов, полное устранение которых с помощью фильтров было невозможно (рис. 1 а). Поэтому далее эти объективы не рассматривались. Объективы MPLAPON50XLEXT и MPLAPON100XLEXT обеспечивали наибольшее увеличение и разрешающую способность (рис. 1 б), однако при этом имели очень маленькое рабочее расстояние, величина которого не позволяла использовать их для съемки сильно развитых поверхностей. Вследствие этого их применение было возможно только в случае съемки достаточно плоских изломов. Изображения поверхности изломов, полученные с помощью длиннофокусных объективов LMPLFLN20X и LMPLFLN50X, также оказались неудовлетворительными из-за большого количества шумов вследствие сильных перепадов яркости (рис. 1 в), что также сделало невозможным их применение в измерительных целях. Таким образом, удовлетворительными характеристиками обладал только один объектив – MPLAPON20XLEXT, который одновременно обеспечивал достаточные значения увеличения разрешающей способности и рабочего расстояния (рис. 1 г). Также в отдельных случаях, когда это было возможно, применялись объективы MPLAPON50XLEXT и MPLAPON100XLEXT.

Выбор фильтра для устранения шумов. В программном обеспечении Lext OLS4000 имеется 9 различных фильтров для обработки полученных снимков, для плоских, круглых, зубчатых поверхностей, фильтры сглаживания и удаления случайных и максимальных шумов и т. д. Для выбора наиболее эффективного инструмента одно и то же изображение было обработано при помощи разных фильтров. На основе полученных результатов, представленных в таблице 2, было принято решение всю последующую обработку производить

Таблица 1. Характеристики объективов для микроскопа LEXT OLS4000

Название	Увеличение	Поле зрения, мкм	Рабочее расстояние, мм	Числовая апертура
MPLFLN5X	100x	2560x2560	20,00	0,15
MPLFLN10X	200x	1280x1280	11,00	0,30
MPLAPON20XLEXT	400x	640x640	1,00	0,60
MPLAPON50XLEXT	1000x	256x256	0,35	0,95
MPLAPON100XLEXT	2100x	128x128	0,35	0,95
Длиннофокусные				
LMPLFLN20X	400x	640x640	12,00	0,40
LMPLFLN50X	1000x	256x256	10,60	0,50

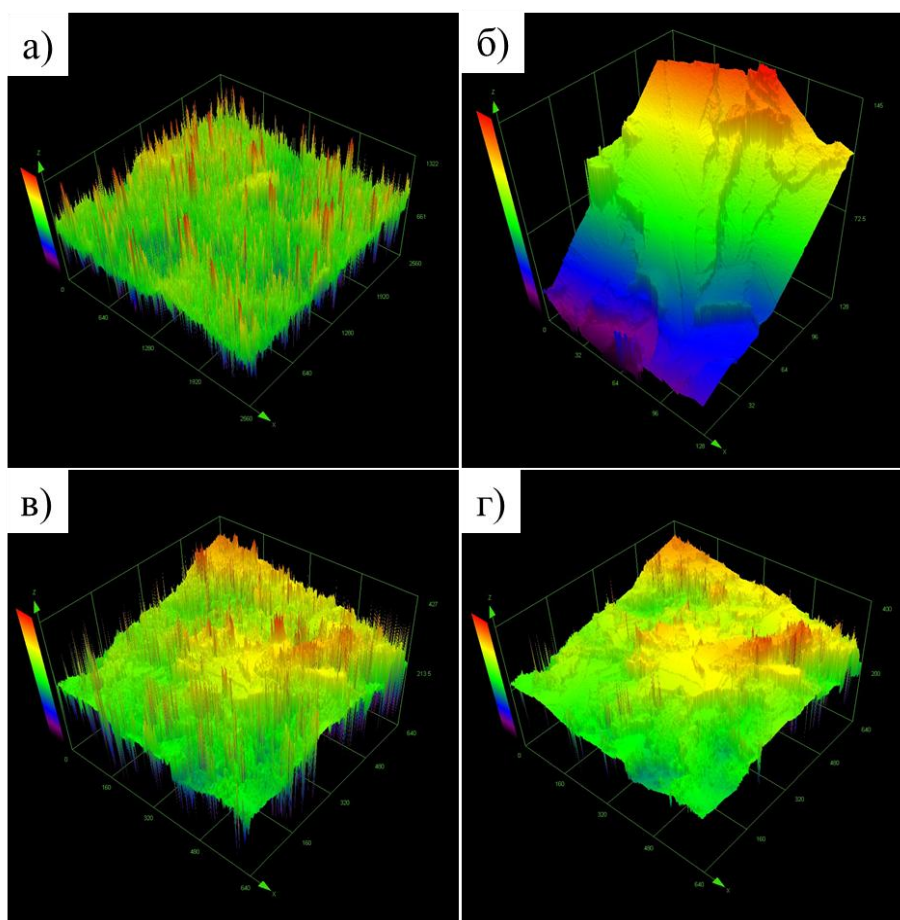


Рис. 1. Примеры изображений, полученных с помощью объективов:
 а) MPLFLN5X (увеличение 100х), б) MPLAPON100XLEXT (увеличение 2100х),
 в) LMPLFLN20X (увеличение 400х), г) MPLAPON20XLEXT (увеличение 400х)

Таблица 2. Цифровые фильтры в ПО Olympus LEXT OLS4000

№	Название фильтра	Описание	Результат при фильтрации изображения излома
1.	Flat surface	Данный фильтр подходит для удаления шума на плоской поверхности образца (стекло, пластины и т. д.)	Эффективно устраняет шумы, но при этом изменяет поверхность излома
2.	Step surface	Этот фильтр применяется при удалении шумов со ступенчатых поверхностей (электроника и микроэлектроника, оптический волновод и т. д.)	Остается часть шумов, и изменяется поверхность излома
3.	Jagged surface	Фильтр подходит для удаления шума на зубчатой поверхности образца (пленки, различные неровные поверхности)	Остается небольшая часть шумов после обработки
4.	Curved surface	Фильтр подходит для удаления шума на криволинейной поверхности (подшипник, припой и т. д.)	Существенно изменяет поверхность излома
5.	Height noise removal	Устраняются шумы, вызванные недостаточной или перенасыщенной интенсивностью по высоте	Сильно искажается поверхность
6.	Spike (peak noise) removal	Удаляются максимальные пиковые значения шума на изображении	Фильтр хорошо справляется с удалением шумов, частично изменяя морфологию поверхности излома
7.	Smoothing (Removal of random noise)	Удаление случайного шума на изображении	Часть шумов остается после обработки, и изменяется поверхность
8.	Outlier removal (Pre-measurement)	Шум устраняется путем обнаружения и интерполяции выбросов неравномерности данных с поверхности	Эффективно устраняет шум, не изменяя поверхности излома
9.	Automatic surface correction	Фильтр автоматически исправляет поверхность на снимке	После обработки часть шумов остается

с помощью фильтра «pre-measurement» (РМ), поскольку данный фильтр наилучшим образом справляется с удалением шумов и в то же время минимально искажает поверхность (рис. 2).

Выбор шага сканирования вдоль оси Z. Для увеличения разрешающей способности вдоль оси Z шаг сканирования (расстояние между двумя ближайшими оптическими срезами) должен быть по возможности минимален. Однако уменьшение шага сканирования при данном диапазоне сканирования влечет за собой увеличение времени съемки. Поэтому для снижения трудоемкости необходимо было подобрать такой шаг сканирования, при котором время съемки было бы минимальным при достаточной точности измеренных величин. Для этого в изломах образцов в одной и той же области при постоянном диапазоне сканирования вдоль оси Z производили съемку с разным шагом сканирования, фиксировалось время сканирования, и вычислялась характеристическая площадь поверхности S_r до и после фильтрации изображения.

На рис. 3 видно, что при увеличении шага сканирования, как для хрупкого (рис. 3 а), так и для вязкого

(рис. 3 б) изломов, время съемки уменьшается, а величина характеристической площади поверхности S_r возрастает. При этом после увеличения шага сканирования до 0,5 мкм время съемки составляет менее 150 секунд для вязкого и хрупкого образцов и далее снижается незначительно. В то же время величина S_r до фильтрации возрастает практически монотонно на всем диапазоне шагов сканирования. Однако после фильтрации шумов при помощи фильтра РМ параметр S_r значительно уменьшается и остается практически неизменным при любой величине шага сканирования, не превышающей 1 мкм. Таким образом, для данного диапазона сканирования съемку целесообразно производить при шагах сканирования от 0,5 до 1 мкм. Тем не менее следует учитывать, что увеличение диапазона сканирования будет увеличивать время съемки.

Сравнение рельефов вязкого и хрупкого изломов

По методике, скорректированной в соответствии с описанными выше результатами, была произведена съемка и фильтрация 50 кадров из произвольных областей хрупкого и вязкого изломов. Для них была рассчитана характеристическая площадь поверхности S_r и построены распределения ее значений (рис. 4).

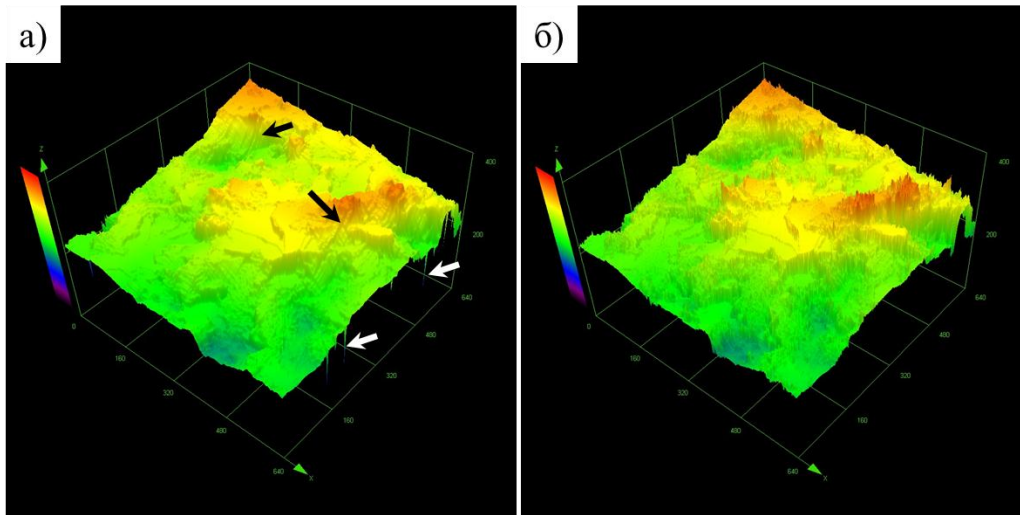


Рис. 2. Изображение на рис. 1 г, обработанное с помощью фильтров «Step surface» – а и «Pre-measurement» – б. Черными стрелками показаны области поверхности, искаженные после фильтрации, белыми стрелками отмечены оставшиеся шумы

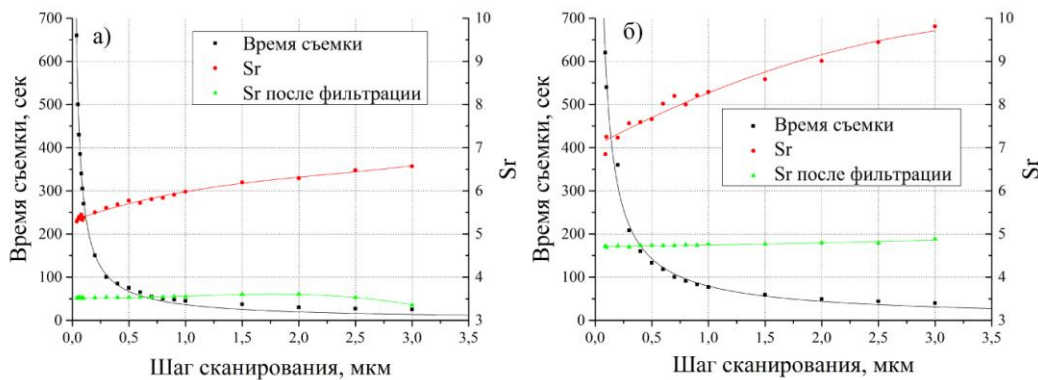


Рис. 3. Зависимость времени съемки и характеристической площади поверхности S_r до и после РМ-фильтрации для хрупкого – а и вязкого – б изломов

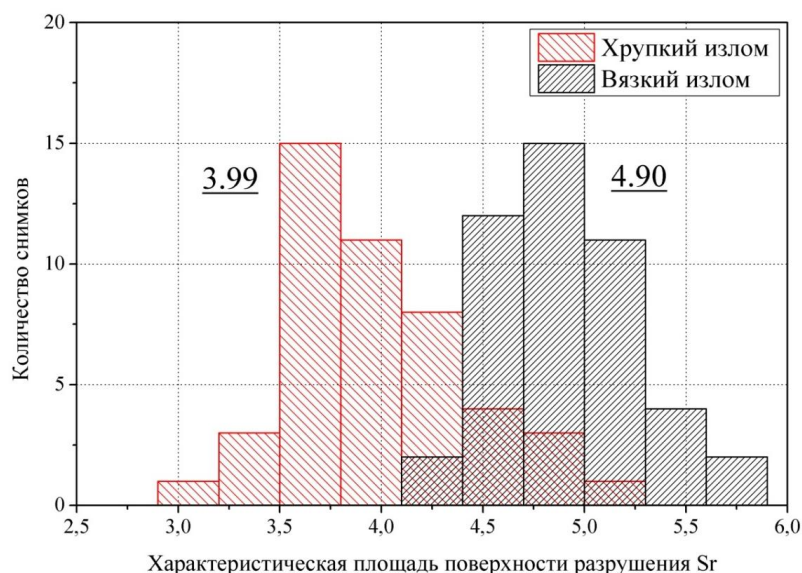


Рис. 4. Распределение значений характеристической площади поверхности хрупкого и вязкого изломов для выборки из 50 снимков. На гистограмме указаны средние значения S_r

Из гистограммы, приведенной на рис. 4, следует, что, хотя распределения значений S_r для вязкого и хрупкого изломов имеют небольшую зону перекрытия, пиковые значения распределений четко разделяются. При этом среднее значение S_r для хрупкого излома на 1 меньше, чем для вязкого. Действительно площадь поверхности должна уменьшаться при уменьшении работы разрушения, связанной с затраченной энергией. Следовательно, параметр S_r может быть использован для описания степени вязкости излома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование позволило разработать и апробировать методику съемки изломов стальных ударных образцов при помощи КЛСМ, позволяющую получать трехмерные изображения поверхности разрушения металла, пригодные для ее дальнейшего количественного анализа.

Показано, что характеристическая площадь поверхности разрушения S_r является количественным параметром, который может быть легко найден при использовании изображений, полученных с помощью КЛСМ, и использован для оценки вязкости излома.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-02-31052.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСиС, 2007. 264 с.
2. Балтер М.А., Любченко А.П., Аксенова С.И. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
3. Кудря А.В. Роль разномасштабных структур в обеспечении пластичности и вязкости структурно-неоднородных сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. № 5. С. 18–23.
4. Кудря А.В., Соколовская Э.А. Неоднородность разномасштабных структур и сопротивление разрушению конструкционных сталей // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2004. Т. 68. № 10. С. 1495–1502.
5. Кудря А.В., Марков Е.А. Количественная оценка разрушения по акустической эмиссии в различных масштабах измерения // *Материаловедение*. 2007. № 1. С. 13–18.
6. Кудря А.В., Штремель М.А. О достоверности анализа данных в управлении качеством // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 7. С. 50–55.
7. Кудря А.В., Соколовская Э.А. Информационные технологии в обеспечении качества металлопродукции // *Электрометаллургия*. 2010. № 12. С. 35–43.
8. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Арсенкин А.М. Эффективность применения средств наблюдения различной размерности для анализа морфологии вязкого излома улучшаемых сталей // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. № 1. С. 38–44.
9. Соколовская Э.А. О воспроизводимости результатов измерений структур и изломов с использованием компьютеризированных процедур // *Вопросы материаловедения*. 2013. № 4. С. 143–153.
10. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Траченко В.А., Ле Хай Нинь, Скородумов С.В., Папина К.Б. Измерение неоднородности разрушения в конструкционных сталях с разнородной структурой // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 4. С. 12–18.
11. Beachem C.D., Pelloux R.M.N. Electron Fractography – A Tool for the Study of Micromechanisms of Fracturing Processes // *Fracture Toughness Testing and its Applications*. Chicago, 1965. P. 210–244.
12. Tata B.V.R., Raj B. Confocal laser scanning microscopy: Applications in material science and

- technology // *Bull. Mater. Sci. Springer India*. 1998. Vol. 21. № 4. P. 263–278.
13. Hovis D.B., Heuer A.H. The use of laser scanning confocal microscopy (LSCM) in materials science // *J. Microsc.* 2010. Vol. 240. № 3. P. 173–180.
 14. Skálová L., Staňková H., Mašek B. Possible Application of Laser Scanning Confocal Microscopy in Material Science // 8th Multinat. Congr. Microsc. 2007. P. 199.
 15. Исходжанова И.В., Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Лаптева М.А. Применение метода конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для исследования коррозионных повреждений // *Труды ВИАМ*. 2015. № 4. С. 11.
 16. Wendt U., Stiebe-Lange K., Smid M., Tonnie K. Quantification of Fracture Surface Topographies based on Confocal Laser Scanning Microscopy // *Microscopy and Microanalysis*. 2003. Vol. 9. P. 370–371.
 17. Staňková H., Skálová L., Jacková K., Mašek B. Utilisation of laser confocal microscope Olympus LEXT for the analysis of the fracture area of fine grain steel // *Focus on Microscopy 2007*. Valencia, 2007. P. 144.
 18. López-Cepero J.M., Arellano-López A.R. de, Quispe-Cancapa J.J., Martinez-Fernandez J. Confocal Microscopy for Fractographical Surface Characterization of Ceramics // *Microscopy and Analysis*. 2005. № 9. P. 13–15.
 19. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Морозова Л.В. Исследование усталостного разрушения конических шестерен редуктора центрального привода газотурбинного двигателя, изготовленных из стали 20Х3МВФ // *Деформация и разрушение материалов*. 2014. № 7. С. 18–26.
 20. Udupa G., Singaperumal M., Sirohi M., Kothiyal M.P. Characterization of surface topography by confocal microscopy: I. Principles and the measurement system // *Measurement Science and Technology*. 2000. Vol. 11. № 3. P. 305–314.
 6. Kudrya A.V., Shtremel M.A. Reliability of data analysis in quality control. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2010, no. 7, pp. 50–55.
 7. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A. Information technologies in quality assurance of metal products. *Elektrometallurgiya*, 2010, no. 12, pp. 35–43.
 8. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Arsenkin A.M. Effectiveness of using watch facilities of various dimensions to analyze the fracture morphology of upgraded steels. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2010, no. 1, pp. 38–44.
 9. Sokolovskaya E.A. On the results reproducibility of structures and fractures measurements using computerized procedures. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 4, pp. 143–153.
 10. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Trachenko V.A., Le Hai Ning, Skorodumov S.V., Papina K.B. Measurement of nonuniformity of fracture in structural steels with heterogeneous structure. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2015, no. 4, pp. 12–18.
 11. Beachem C.D., Pelloux R.M.N. Electron Fractography – A Tool for the Study of Micromechanisms of Fracturing Processes. *Fracture Toughness Testing and its Applications*. Chicago, 1965, pp. 210–244.
 12. Tata B.V.R., Raj B. Confocal laser scanning microscopy: Applications in material science and technology. *Bull. Mater. Sci. Springer India*, 1998, vol. 21, no. 4, pp. 263–278.
 13. Hovis D.B., Heuer A.H. The use of laser scanning confocal microscopy (LSCM) in materials science. *J. Microsc.*, 2010, vol. 240, no. 3, pp. 173–180.
 14. Skálová L., Staňková H., Mašek B. Possible Application of Laser Scanning Confocal Microscopy in Material Science. *8th Multinat. Congr. Microsc.*, 2007, pp. 199.
 15. Iskhodzhanova I.V., Orlov M.R., Grigorenko V.B., Lapteva M.A. Application of the confocal laser imaging microscopy method for corrosive damages study. *Trudy VIAM*, 2015, no. 4, p. 11.
 16. Wendt U., Stiebe-Lange K., Smid M., Tonnie K. Quantification of Fracture Surface Topographies based on Confocal Laser Scanning Microscopy. *Microscopy and Microanalysis*, 2003, vol. 9, pp. 370–371.
 17. Staňková H., Skálová L., Jacková K., Mašek B. Utilisation of laser confocal microscope Olympus LEXT for the analysis of the fracture area of fine grain steel. *Focus on Microscopy 2007*. Valencia, 2007, p. 144.
 18. López-Cepero J.M., Arellano-López A.R. de, Quispe-Cancapa J.J., Martinez-Fernandez J. Confocal Microscopy for Fractographical Surface Characterization of Ceramics. *Microscopy and Analysis*, 2005, no. 9, pp. 13–15.
 19. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Naprienko S.A., Morozova L.V. Research of fatigue failure of conic gear wheels of reducer of the central drive of the gas turbine engine, made of steel 20X3MVF. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2014, no. 7, pp. 18–26.
 20. Udupa G., Singaperumal M., Sirohi M., Kothiyal M.P. Characterization of surface topography by confocal microscopy: I. Principles and the measurement system. *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 3, pp. 305–314.

REFERENCES

1. Klevtsov G.V., Botvina L.P., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fraktodiagnostika razrusheniya metallicheskih materialov i konstruksiy* [Fractodiagnostics of Fracture of Metallic Materials and Structures]. Moscow, MISiS Publ., 2007. 264 p.
2. Balter M.A., Lyubchenko A.P., Aksenova S.I. *Fraktografiya – sredstvo diagnostiki razrushemykh detaley* [Fractography is a tool for the damaged parts diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 184 p.
3. Kudrya A.V. The role of structures of different size in plasticity and toughness of structurally inhomogeneous steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2005, no. 5, pp. 18–23.
4. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A. Non-uniformity of different scaled structures and fracture toughness of structural steels. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii nauk. Seriya fizicheskaya*, 2004, vol. 68, no. 10, pp. 1495–1502.
5. Kudrya A.V., Markov E.A. Quantitative evaluation of destruction according to the acoustic emission in various scale measurements. *Materialovedenie*, 2007, no. 1, pp. 13–18.

**THE QUANTITATIVE ANALYSIS OF FRACTURE
USING THE CONFOCAL LASER SCANNING MICROSCOPY**

© 2015

E.D. Merson, postgraduate student

V.A. Danilov, graduate student

D.L. Merson, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor
Togliatti state University, Togliatti (Russia)

Keywords: confocal laser scanning microscope; metallic materials; fracture; microrelief; fractography.

Abstract: The study of the parts fracture surface is the basic and important part of determination of the fracture process causes and chronology. The quality and objectivity of fractographic analysis depends largely on the effectiveness of tools used for the fracture study. The main disadvantage of traditional methods used in this area is the two-dimensionality of images that greatly complicates the quantitative analysis of the fracture surface. In this context, the method of confocal laser scanning microscopy (CLSM) is one of the prospective techniques providing a high-quality measuring accuracy of the objects surface geometry in three-dimensional space, a wide scanning range along the vertical axis and the necessary depth of field. Moreover, CLSM method does not require the electrical conductivity and special specimen surface preparation, as well as the presence of vacuum.

In this study, the authors developed and tested the technique of exposure and further impact specimen fractures analysis using the CLSM. To be the subject of research, the authors selected the fractures of fully brittle and fully ductile fracture surfaces of 20 grade steel, the fractures of which were obtained during impact tests of the specimens hold at the temperatures of -196°C and $+150^{\circ}\text{C}$, respectively. During the research, the optimal amplification, the lens type, the scanning pitch and the image noise filter were determined. The research showed that to measure the fracture surface ductility it is possible to use such parameter as the characteristic fracture surface area S_r , which value changes significantly while going from ductile to brittle fracture. The research showed that the CLSM application allows converting the qualitative analysis of metal products fracture into quantitative one improving the objectivity and accuracy of fractographic analysis.