

ОЦЕНКА СТРОЕНИЯ ИЗЛОМОВ И СТРУКТУР В КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ ПРОЦЕДУР

© 2015

А.В. Кудря, доктор технических наук, профессор кафедры «Металловедение и физика прочности»

Э.А. Соколовская, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металловедение и физика прочности»

Ле Хай Нинь, аспирант кафедры «Металловедение и физика прочности»

В.А. Траченко, аспирант кафедры «Металловедение и физика прочности»

С.В. Скородумов, кандидат технических наук, инженер 1-й категории УНЦ «Международная школа микроскопии»

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва (Россия)

К.Б. Папина, ведущий инженер лаборатории химического и структурного анализа

Московский городской центр

по исследованию физико-механических свойств конструкционных материалов ОАО «МОСГАЗ»

Чинь Хью Чыонг, студент

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва (Россия)

Ключевые слова: конструкционные стали; разномасштабные структуры; излом; компьютеризированные процедуры обработки изображений; стереофотограмметрия; трехмерная модель рельефа; полиэдры Вороного; параметры геометрии излома; механизм разрушения.

Аннотация: Отсутствие быстродействующих, документированных, объективных процедур измерения структур и изломов затрудняет сопоставление неоднородности их строения для выявления критических факторов структуры, лимитирующих разрушение. Отсюда, в частности, принимаемые с целью повышения качества металлопродукции управленческие решения нередко носят субъективный характер, что делает их малоэффективными, ограничивая их применение узким кругом задач. Использование предложенных компьютеризированных процедур обеспечило возможность проведения массовых документированных измерений изображений структур и изломов конструкционных сталей в 2D и 3D-масштабах наблюдения. Для более точной идентификации структур их наблюдали на одном и том же поле шлифа с привлечением оптической, атомно-силовой, растровой электронной микроскопии и дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD-анализа). Из массовых измерений 2D и 3D геометрии вязких изломов сталей с различными типами структур (сорбит отпуска, феррит-перлитная полосчатость, остатки дендритной структуры), схем испытания (на удар и статическое растяжение, при вырезке образцов вдоль и поперек направления прокатки, тангенциально в поковке) реконструировали рельеф излома. Это позволило выделить параметры геометрии рельефа, определяющие различия в уровне вязкости металла (глубина и диаметр ямки, толщина перемычки между смежными ямками). Для оценки неоднородности размещения ямок в изломе использована статистика полиэдров Вороного (распределение полиэдров по площадям, числу соседей и расстоянию между ямками). Накопленная статистика результатов измерения элементов строения структур и изломов, в частности, может быть полезна как для их идентификации, так и для уточнения механизмов вязкого и хрупкого разрушения в конструкционных сталях (при прямом сопоставлении неоднородности строения структур и изломов) с целью выявления факторов, лимитирующих качество металла. Это существенно для повышения объективности и эффективности управленческих решений при повышении однородности качества металлопродукции широкого назначения.

Разнообразные сценарии протекания технологической наследственности (различия в эволюции структур и дефектов в рамках технологической цепочки) в пределах нормативного поля допуска отлаженного производственного процесса приводят к образованию номинально однотипных, но отличающихся геометрией своего строения структур. Это причина различий в сопротивляемости металла разрушению и, соответственно, колебаний качества конструкционной стали.

Для выявления роли геометрии структур в разрушении необходимы массовые документированные наблюдения их строения и последующее сопоставление с результатами измерения строения изломов (наиболее доступного способа анализа разрушения). Однако существующие стандарты предполагают преимущественно качественные оценки строения структур и изломов – на основе сравнения их изображений с эталонами (картинками) или словесным описанием. Это затрудняет выявление критических параметров структур, лимитирующих вязкость конструкционных материалов, выработку объективных требований к допустимой их неоднородности.

Решение поставленной задачи невозможно без развития и использования быстродействующих компьютеризированных процедур обработки изображений структур и изломов. Существует достаточно большое количество программных продуктов, направленных на реализацию возможностей современных средств цифровой регистрации, однако эффективность имеющихся алгоритмов и решений в значительной мере зависит от глубины гипотезы о связи выбираемых признаков изображений с искомым свойством материала. Немаловажную роль в получении объективных результатов играет соответствующее метрологическое обеспечение компьютеризированных процедур, корректное использование статистики [1–3]. Полезно также использование дополнительной информации о структурах и разрушении, которые могут дать современные средства наблюдения [4–7].

Данные подходы были использованы при сопоставлении структур и изломов (образцов на удар и растяжение) широкого спектра сталей типа 08Ю, Ст3сп, 40Х2Н2МА, 38ХН3МФА, 16Г2АФ, 15Х2НМФА, 09Г2С, 10ХСНДА в различном состоянии поставки (сорт,

поковки, лист) для выявления факторов, определяющих пластичность и вязкость сталей.

При анализе изображений структур и изломов разделение информативных (однотипных) элементов обычно производится на основе сопоставления интенсивности их яркости и геометрии строения (вытянутость, площадь, периметр, разветвленность и т. д.).

Для некоторых сложных структур, например в трубных сталях класса прочности К65 (Х80) и выше, где есть известная неопределенность в идентификации отдельных структурных элементов средствами оптической микроскопии [8], может быть полезно дополнительное наблюдение структур на одном и том же поле шлифа методами атомно-силовой (АСМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ) и дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD-анализа). С целью более глубокого понимания особенностей строения элементов структуры трубных сталей (феррит, бейнит, включая границы раздела между ними) эффективным оказалось предварительное исследование морфологии их аналогов на эталонных объектах, например, зерен феррита на шлифах из листовой стали 08Ю, где, в частности, удалось показать, что смежные зерна феррита представляют собой площадки, находящиеся на различной высоте друг относительно друга (рис. 1). Такой подход позволил более объективно подойти к интерпретации структурных составляющих в высокопрочных трубных сталях и определить границы эффективного применения в этих целях оптической микроскопии, что

важно для аттестации качества трубного металла в условиях массового производства.

При экспресс-оценке полосчатых структур полезным может оказаться использование Фурье-преобразования оптического изображения. Так, в структуре листовых сталей СтЗсп и 09Г2С два пиковых значения спектральной плотности соответствовали масштабам зерна феррита и шагу полос перлита (рис. 2). Сопоставление с результатами Фурье-преобразования 2D-изображений вязкого излома ударных образцов стали СтЗсп (в плоскости, параллельной поверхности шлифа) выявило в ряде случаев удовлетворительное соответствие строения изображений структур и изломов.

Из установленного соотношения значений периодов спектральной плотности изображений феррито-перлитной полосчатости в микроструктуре и вязких изломов стали СтЗсп ($21,4 \pm 1,4$ и $35,8 \pm 2,8$; $20,4 \pm 0,8$ и $40,3 \pm 1,1$ мкм, соответственно), в частности, вытекает наличие связи между размером зерна феррита и шагом полос перлита – с одной стороны и размером ямок и периодичности строения мезорельефа излома – с другой стороны.

Полученные результаты могут быть полезны для понимания роли масштабов полосчатости в разрушении и еще раз подтверждают важность прямого сопоставления строения разнородных структур и изломов при выявлении причин различий в энергоёмкости вязкого разрушения.

2D-изображения («плоские» снимки) изломов, получаемые с использованием сканирующей электронной

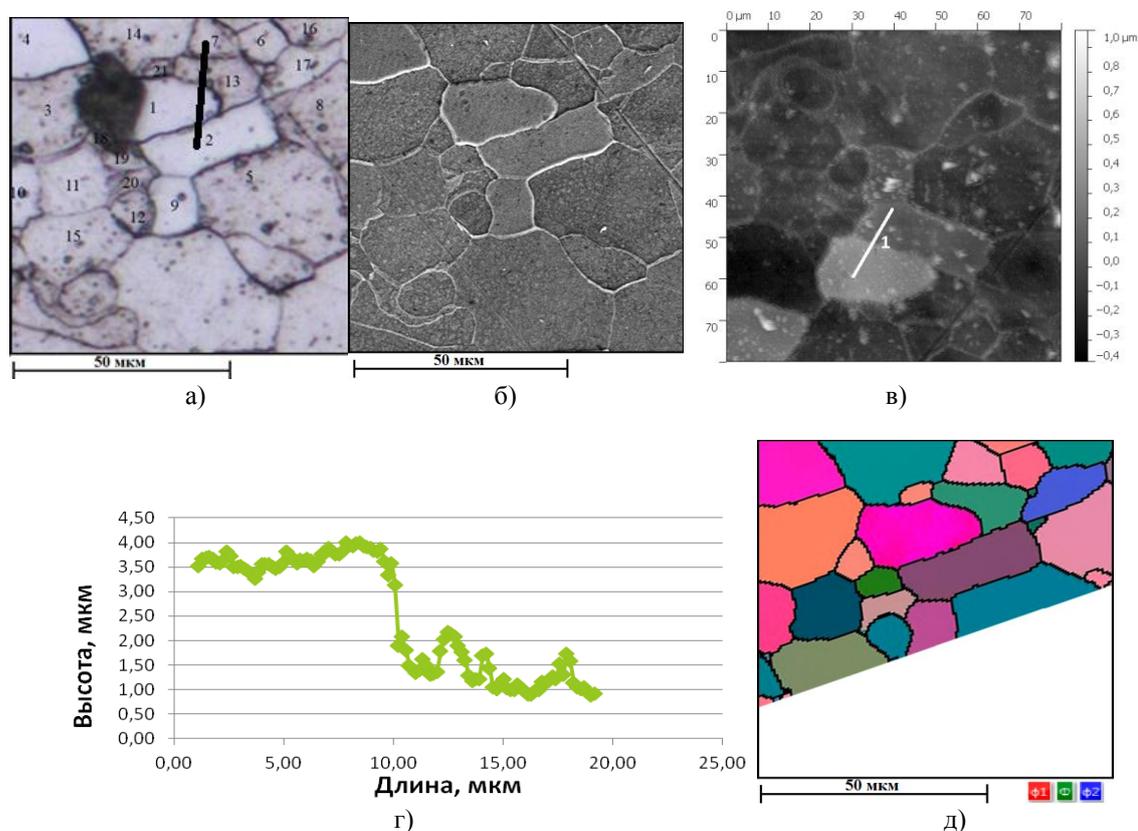


Рис. 1. Изображения структуры зерен феррита, полученные с использованием оптической (а), сканирующей (б), атомно-силовой микроскопии (в), включая профиль поверхности двух смежных зерен феррита вдоль секущей 1 (г), и EBSD-анализа (д) на одном и том же поле зрения

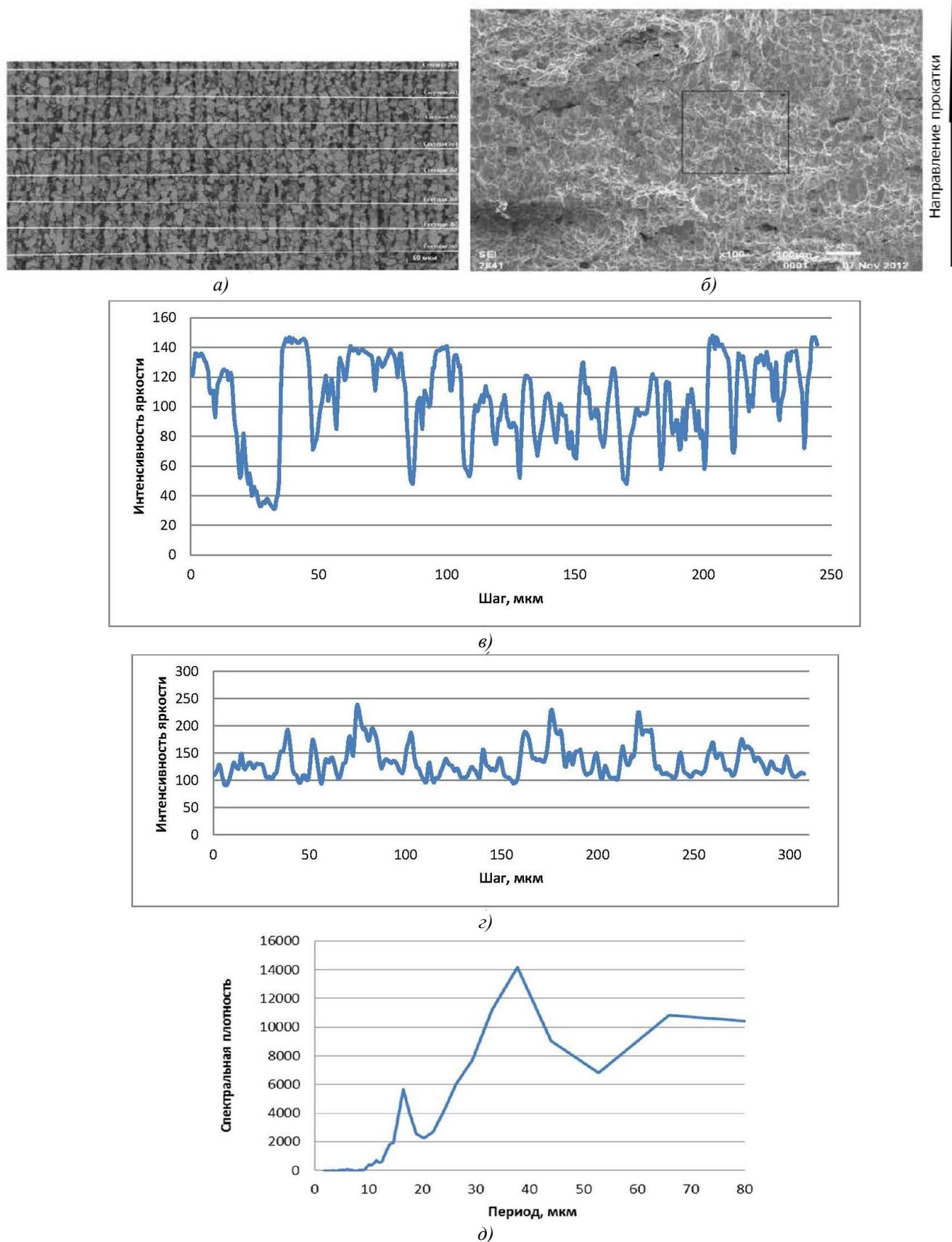


Рис. 2. Изображение феррито-перлитной полосчатости в структуре стали (а) и сопутствующее ему 2D-изображение вязкого излома ударного образца (б) СтЗсп (а) с характерным распределением интенсивности яркости в оттенках серого вдоль одной из секущих, выделенных белым цветом (в, г – в структуре и изломе соответственно), и его Фурье-преобразование (д, е, соответственно)

микроскопии, обычно используются для качественного наблюдения рельефа. 3D-реконструкция рельефа [1; 9; 10], когда стереопары, полученные в сканирующем электронном микроскопе, преобразуют в карту рельефа методами классической стереофотограмметрии, обеспечивает возможность количественных измерений геометрии излома. Ее ограничения обусловлены трудоемкостью процедуры реконструкции 3D-модели, в частности, из-за необходимости указания достаточного числа пар реперных точек, совпадающих на поле зрения, и недостатка вычислительных мощностей.

Однако современные программные продукты и рост компьютерных мощностей делают реальным построение 3D-моделей, по меньшей мере, в исследовательской практике. Нами эти возможности, в частности, были использованы для восстановления 3D-изображений (программа Photomod) вязких изломов конструкционных сталей с целью уточнения механизмов образования пор и их слияния при разрушении [11–13] в случае рас-

пространения магистральной трещины на дне макрохрупкого квадрата ударных образцов и донной трещины в образце на растяжение.

Для анализа геометрии вязкого излома выделяли его характерные элементы – ямки и перемычки между ними с последующим измерением глубин и поперечников ямок, их форм, толщин перемычек, оценкой их строения (наличие микроямок) (рис. 3).

Их распределение носит асимметричный характер, отражающий распределение неметаллических включений по размерам (рис. 4), поэтому сопоставление различных выборок ямок (по размерам) эффективнее проводить с применением критериев непараметрической статистики. В нашем случае был использован критерий Колмогорова – Смирнова [14].

Соотношение глубин ямок и их диаметров (с известными ограничениями [15]) может быть оценено как близкое к линейному. Это выполнялось для ямок вязкого излома сталей всего исследуемого в работе сортамента

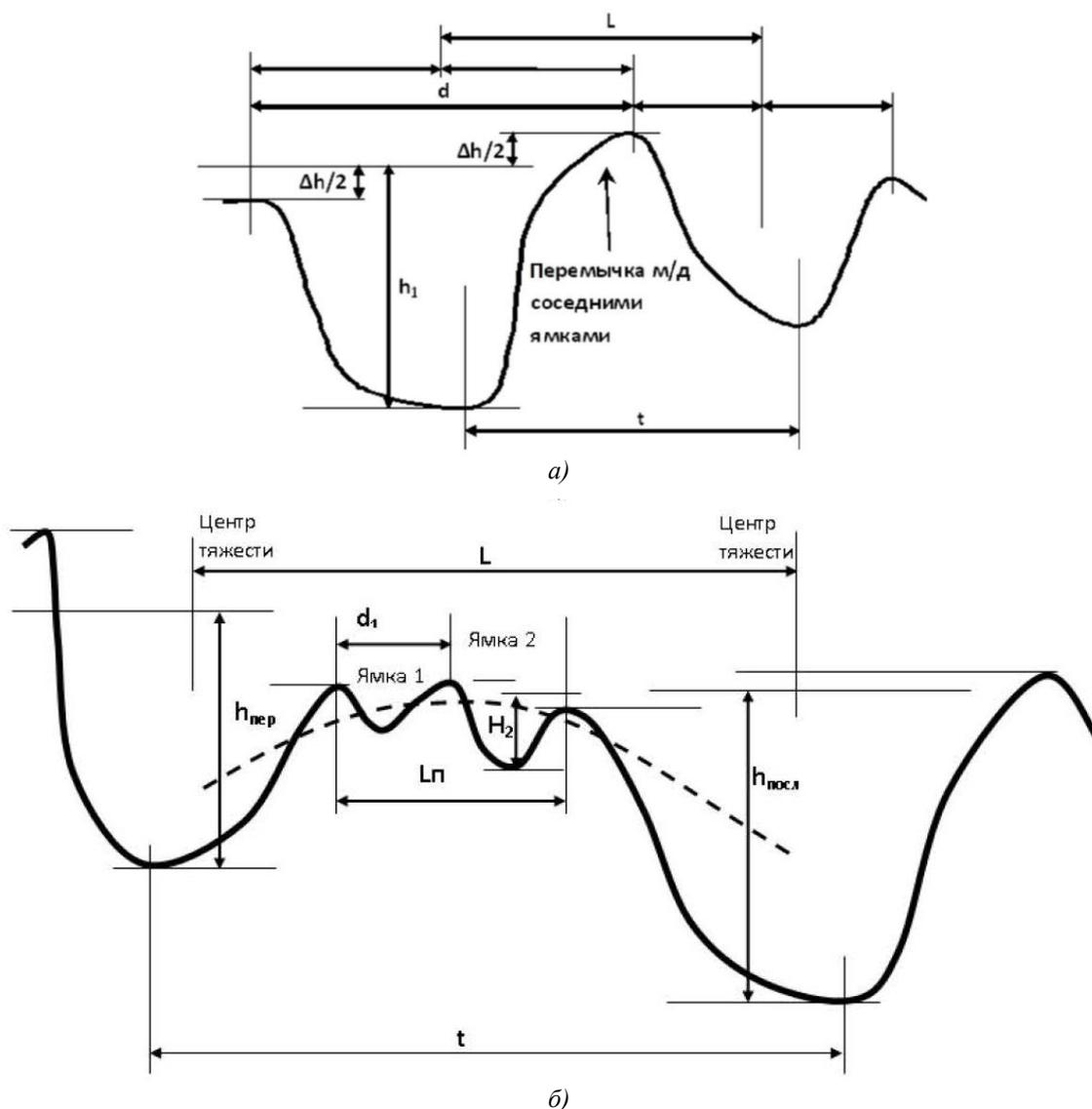


Рис. 3. Схема определения размеров ямок вязкого излома (диаметр – d , глубина – h), толщин перемычек – L_p , расстояния между смежными ямками – L , в т. ч. между точками, соответствующими их наибольшей глубине (t) (а, б – два типа перемычек между смежными ямками, без и с микроямками на них)

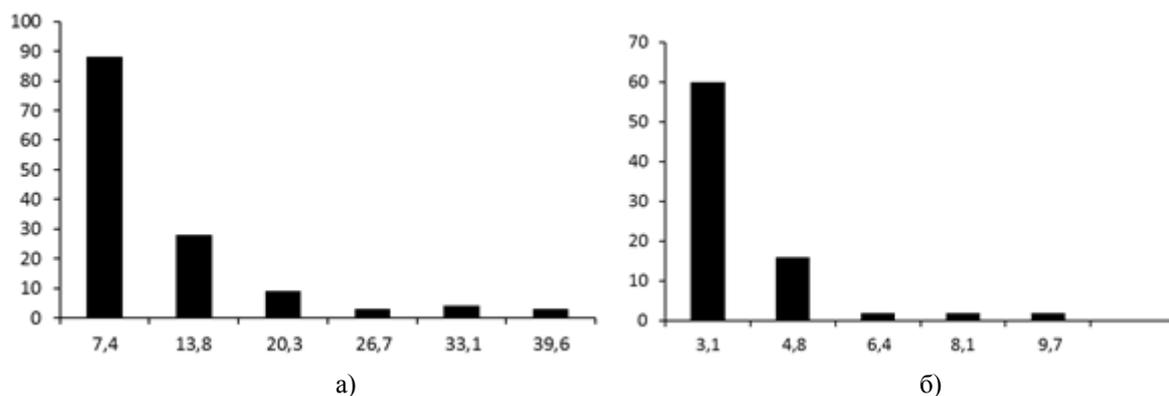


Рис. 4. Пример типичного распределения ямок по размерам (диаметр, мкм), вязкие изломы ударных образцов из сталей 09Г2С (а) и 40Х2Н2МА (б)

металлопродукции (включая лист), схем нагружения образца (на растяжение и удар) и вырезки образцов (продольные и Z-образцы на растяжение). Отсюда, в частности, вытекает возможность проведения в ряде случаев предварительного быстрого сопоставления вязких изломов по «плоским» (2D) картинкам.

Для повышения объективности оценки вязкости сталей по виду изломов существенным может оказаться измерение толщин перемычек между смежными ямками, их величина в той или иной мере должна характеризовать степень участия микропластической деформации, предшествующей слиянию пор при вязком разрушении. По-видимому, вполне закономерно, что изменение толщины перемычки L_n соответствует вариации значений расстояний между центрами смежных ямок L (их центрами тяжести по измерениям на 2D-кадре) $L_n = (-0,72 \pm 0,31) + (0,5 \pm 0,02)L$ (рис. 5). Прямыми измерениями геометрии вязкого излома также было показано, что разрушение перемычек между смежными ямками, когда вязкость максимальна, происходило по линии действия касательных напряжений (разрушение срезом). С понижением вязкости перемычка разрушалась мезоотрывом (протяженность такой мезоплощадки дос-

тигала 40–50 мкм) с образованием на ней ямок микронного размера (до 5–10 штук).

Очевидно, что механизм роста и слияния пор, образующихся, как правило, на хрупких или пластичных частицах вследствие их разрушения или отслоения от металлической матрицы, должен также зависеть от особенностей размещения включений в матрице. Для оценки неоднородности их размещения были, в частности, оценены возможности построения полиэдров Вороного [16]. С этой целью отдельные 2D-кадры изображений вязкого излома, полученных в сканирующем микроскопе (при увеличениях до 1000 крат), были «склеены» в панорамы, отражающие типичное строение исследуемых изломов в микро- и мезомасштабах наблюдения. Их бинаризация [2] обеспечила представление изображения в виде матрицы типа «0-1», наиболее удобной для последующей обработки.

Были построены гистограммы распределения площадей полиэдров и числа их соседей (например, рис. 6), отражающие, в частности, наличие областей с повышенной плотностью ямок, что характеризует особенности зарождения вязкого разрушения [16]. Для оценки воспроизводимости получаемых результатов варьировали

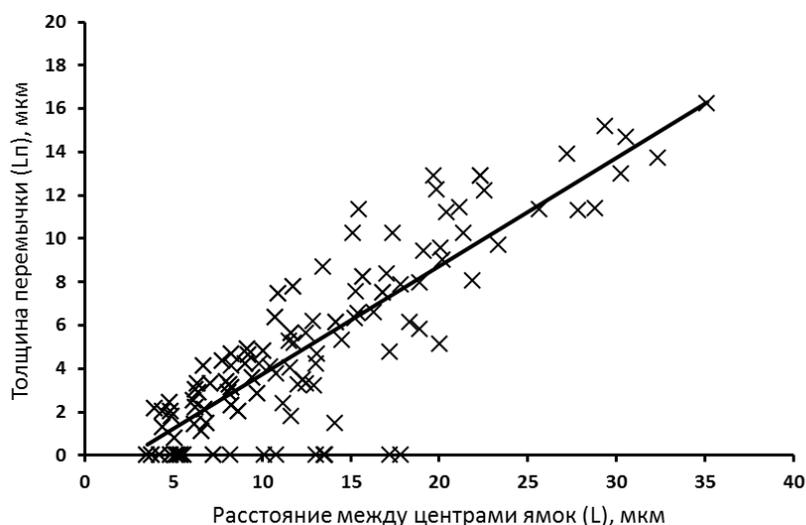


Рис. 5. Взаимосвязь между значениями толщин перемычек и расстояний между центрами смежных ямок, излом продольного ударного образца из листовой стали 09Г2С

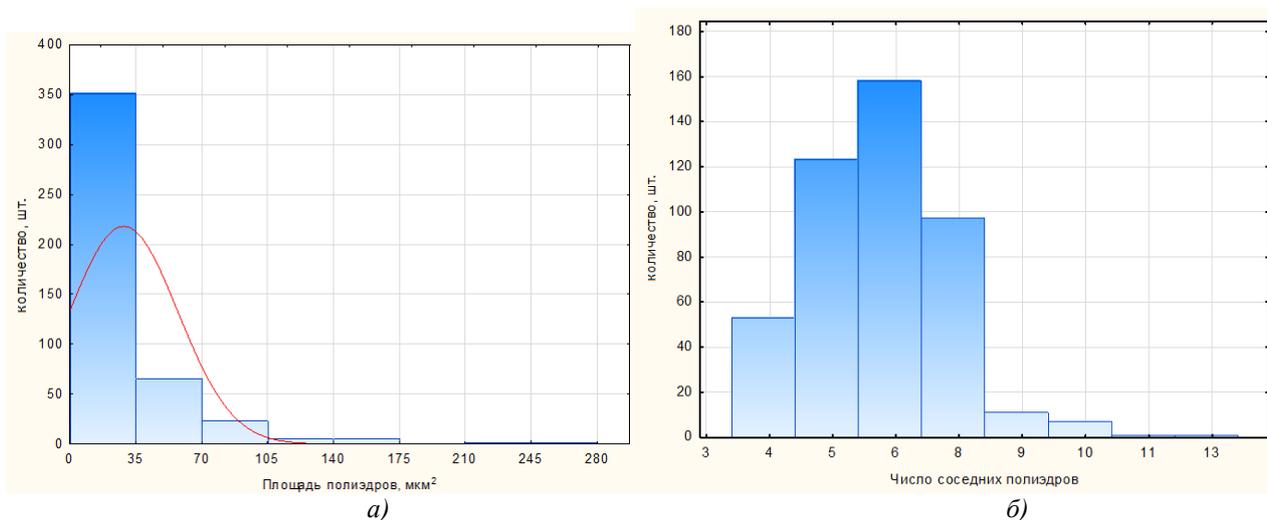


Рис. 6. Пример распределения полиэдров Вороного по площадям (а) и числу соседей (б), излом продольного ударного образца из листовой стали 09Г2С

площадь анализируемого кадра бинаризованного изображения вязкого излома и уровень порогового (минимального) значения ямки, используемого при построении полиэдров Вороного.

Очевидно, что при выборе размера анализируемой панорамы также необходимо учитывать и особенности распределения ямок по размерам. С этой целью строили как классические гистограммы распределения площадей ямок, так и их распределение, которое учитывало долю площади, занимаемой в изломе ямками каждого размерного диапазона (число разбиений гистограммы определяли как $n^{1/3}$, где n – число измерений [17]) (рис. 7).

С использованием критерия Колмогорова – Смирнова было показано (например, рис. 8), что для каждого вида излома существует своя минимально допустимая площадь наблюдения, обеспечивающая воспроизводимость получаемых результатов. Это, в частности, указывает на необходимость получения достаточной статистики результатов при решении задач, связанных с количественной оценкой строения изломов.

Учет всех методических обстоятельств позволяет объективно выделить критические параметры строения излома, связанные с колебаниями вязкости и пластичности. В частности, было показано, что доля, занимае-

мая перемычками в вязких изломах, связана с уровнем ударной вязкости исследуемых в работе сталей (рис. 9 а). Это прямо указывает на существенное влияние микропластической деформации, предшествующей слиянию пор (например, при распространении трещины по дну макрохрупкого квадрата), на колебания вязкости конструкционных сталей в различном состоянии поставки. Однако действие этого фактора связано с мерой на шкале «регулярность – скученность ямок», которая вытекает из статистики расстояний между центрами ближайших частиц, распределений полиэдров Вороного по числу ближайших соседей (рис. 9 б).

Построение полиэдров Вороного в ряде случаев оказалось полезным и при оценке неоднородности структур – в связи с необходимостью объяснения закономерности формирования рисунка ямочного рельефа на 2D-панораме, например, в крупных поковках из улучшаемой стали 38ХНЗМФА с сохранившейся дендритной структурой [18], по картине распределения пятен серного отпечатка на шлифе с целью привязки мест локализации крупных ямок в изломе к геометрии размещения сульфидов.

На геометрию ямок влияет также неоднородность микроструктуры. Так, в частности, в изломах продольных

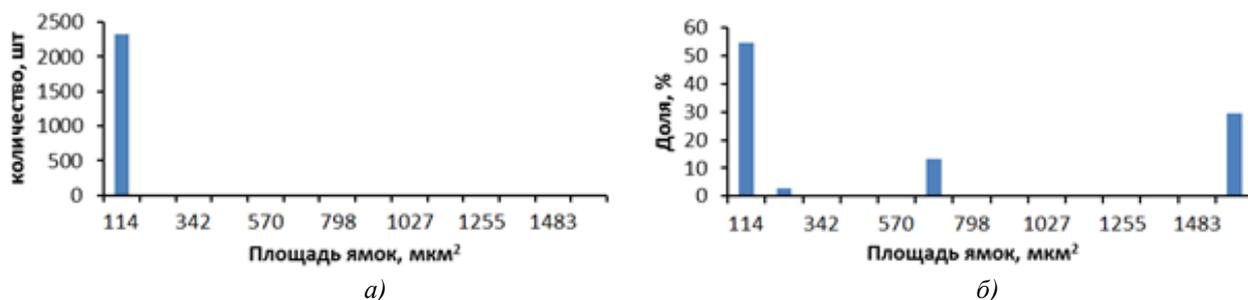


Рис. 7. Распределение ямок по размерам (площадям) в зависимости от их количества (а) и доли площади, занимаемой ямками каждого размерного диапазона (б), излом ударного образца из улучшаемой стали 40Х2Н2МА

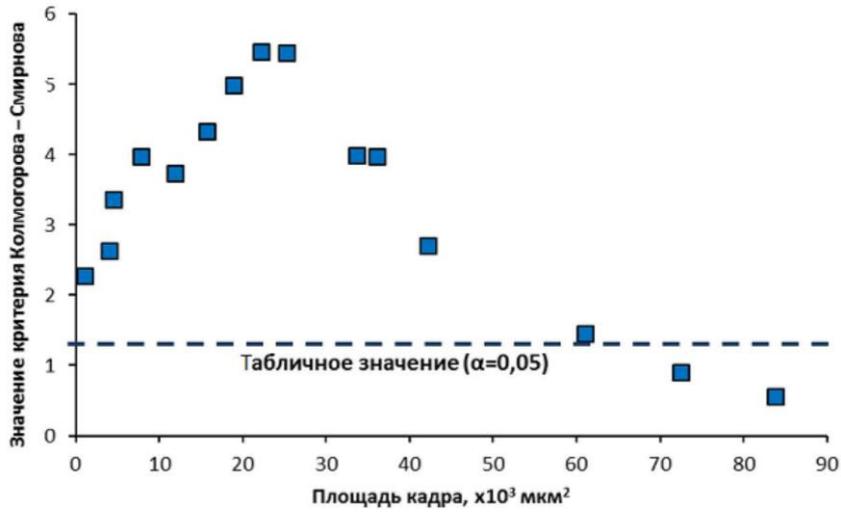
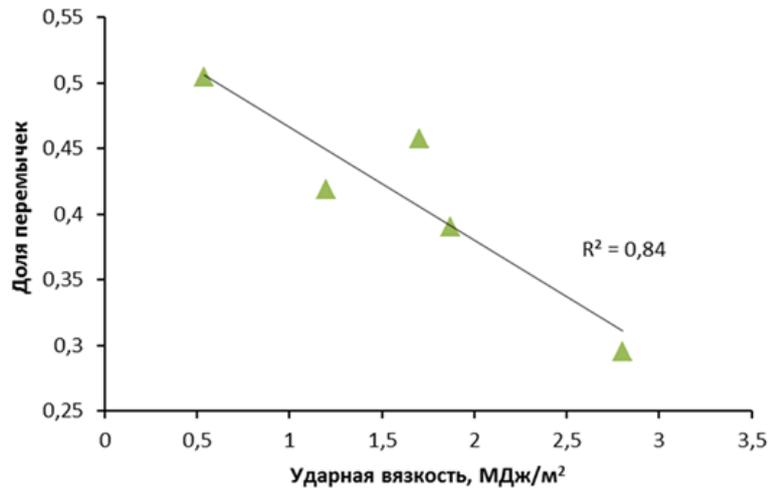
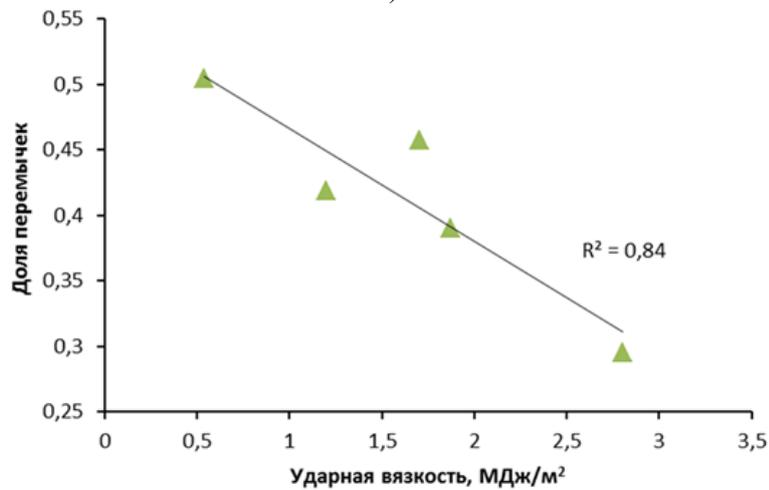


Рис. 8. Сопоставление различных выборок значений площадей полиэдров изломов сталей 40Х2Н2МА (на основе критерия Колмогорова – Смирнова), полученных при их измерении на полях зрения различного масштаба (при фиксированном увеличении)



а)



б)

Рис. 9. Соотношение доли перемычек между ямками в вязких изломах и ударной вязкостью (а), коэффициентами асимметрии распределений полиэдров Вороного по числу ближайших соседей (б)

ударных и образцов на растяжение, а также Z-образов на растяжение листовой стали 09Г2С с феррито-перлитной полосчатостью в структуре изменение соотношения глубин и диаметров ямок в диапазоне от $0,61 \pm 0,03$ до $1,34 \pm 0,08$ отражало особенности эволюции пор при повышении уровня напряжений. Увеличение толщины мягкой ферритной прослойки при локализации пластического течения в шейке Z-образца на растяжение с 30...45 до 100...170 мкм способствовало вытягиванию пор в направлении действия нормальных напряжений. В долевых же образцах вследствие дробления хрупких полос перлита при деформации смежные с ними прослойки феррита объединяются, что делает предпочтительным вытягивание пор по толщине листа с образованием крупных ямок поперечником от 8–10 мкм и более.

В целом полученные результаты позволили достаточно надежно выделить в рельефе вязких изломов особенности их строения, необходимые для уточнения механизма протекания вязкого разрушения и определения наблюдаемых различий в энергоёмкости вязкого разрушения (с привязкой к структуре). Это существенно для прогноза вязкости в связи с технологически неизбежной неоднородностью разномасштабных структур в сталях промышленного способа производства, других конструкционных материалов [19–21]. Еще раз подтверждена эффективность использования в этих целях компьютеризированных процедур наблюдения и измерения изображений в материаловедении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупин Ю.А., Сухова В.Г. Компьютерная металлография. М.: Изд. дом МИСиС, 2009. 88 с.
2. Соколовская Э.А. О воспроизводимости результатов измерений структур и изломов с использованием компьютеризированных процедур // Вопросы материаловедения. 2013. № 4. С. 143–153.
3. Кудря А.В., Штремель М.А. О достоверности анализа данных в управлении качеством // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 7. С. 50–55.
4. Клевцов Г.В., Мерсон Е.Д. О возможности использования конфокального лазерного сканирующего микроскопа для исследования микрорельефа поверхности разрушения металлических материалов // Фундаментальные исследования. 2012. № 11-5. С. 1185–1188.
5. Мерсон Е.Д., Криштал М.М., Мерсон Д.Л., Еремичев А.А., Виноградов А.Ю. Исследование стадийности процесса разрушения высокоуглеродистой стали, охрупченной водородом с применением метода акустической эмиссии // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 9. С. 41–48.
6. Ханжин В.Г., Штремель М.А. Количественная информация о процессах разрушения, получаемая при измерениях акустической эмиссии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 5. С. 53–59.
7. Кудря А.В., Марков Е.А. Количественная оценка разрушения по акустической эмиссии в различных масштабах измерения // Металловедение. 2007. № 1. С. 13–18.
8. Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Борякова А.Н. К вопросу о классификации микроструктур низкоуглеродистых трубных сталей // Металлург. 2010. № 7. С. 45–51.
9. Штремель М.А. Разрушение. Кн. 1. Разрушение материала. М.: Изд. дом МИСиС, 2014. 670 с.
10. Штремель М.А. Разрушение. Кн. 2. Разрушение структур. М.: Изд. дом МИСиС, 2015. 976 с.
11. Горицкий В.М. Диагностика материалов. М.: Металлургиздат, 2004. 408 с.
12. Фонштейн Н.М., Бронфин Б.М., Ширман А.З., Жукова Е.Н., Борцов А.Н. Количественное микрофрактографическое исследование вязкого разрушения в низколегированных сталях // Физика металлов и металловедение. 1982. Т. 53. № 1. С. 174–179.
13. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. М.: УРСС, 2002. 112 с.
14. Никитин Я.Ю. Асимптотическая эффективность непараметрических критериев. М.: Физматлит, 1995. 240 с.
15. 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.
16. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 2. Деформация. М.: МИСиС, 1997. 528 с.
17. Ченцов Н.Н. Статистические решающие правила и оптимальные выводы. М.: Наука, 1972. 524 с.
18. Кудря А.В., Соколовская Э.А. Неоднородность разномасштабных структур и вязкость конструкционных сталей // Известия Российской Академии наук. Серия физическая. 2004. Т. 68. № 10. С. 1495–1502.
19. Гудков А.А. Трещиностойкость стали. М.: Металлургия, 1989. 376 с.
20. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
21. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1983. 295 с.

REFERENCES

1. Krupin Yu.A., Sukhova V.G. *Kompyuternaya metallografiya* [Computer metallography]. Moscow, MISiS Publ., 2009. 88 p.
2. Sokolovskaya E.A. On the results reproducibility of structures and fractures measurements using computerized procedures. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 4, pp. 143–153.
3. Kudrya A.V., Shtremel M.A. Reliability of data analysis in quality control. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2010, no. 7, pp. 50–55.
4. Klevtsov G.V., Merson E.D. On the possibility of confocal laser scanning microscopy for investigation of metallic materials fracture surfaces. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2012, no. 11-5, pp. 1185–1188.
5. Merson E.D., Krishtal M.M., Merson D.L., Eremichev A.A., Vinogradov A.Yu. The study of stages of destruction of high-carbon steel embrittled by hydrogen using the method of acoustic emission. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2012, no. 9, pp. 41–48.
6. Khanzhin V.G., Shtremel' M.A. Quantitative information on fracture processes obtained by measurement of acoustic emission. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2009, no. 5, pp. 53–59.
7. Kudrya A.V., Markov E.A. Quantitative evaluation of destruction according to the acoustic emission in various

- measuring scales. *Materialovedenie*, 2007, no. 1, pp. 13–18.
8. Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Y., Boryakova A.N. Classification of low-carbon pipe steel microstructures. *Metallurgist*, 2010, no. 7-8, pp. 444–454.
 9. Shtremel M.A. *Razrushenie. Kniga 1. Razrushenie materiala* [Destruction. Book 1. Material destruction]. Moscow, MISiS Publ., 2014. 670 p.
 10. Shtremel M.A. *Razrushenie. Kniga 2. Razrushenie struktur* [Destruction. Book 2. Structures destruction]. Moscow, MISiS Publ., 2015. 976 p.
 11. Goritsky V.M. *Diagnostika materialov* [Materials diagnostics]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2004. 408 p.
 12. Fonshteyn N.M., Bronfin B.M., Shifman A.Z., Zhukova Ye.N., Bortsov A.N. Quantitative microfractographic analysis of ductile fracture in low alloyed steels. *Physics of Metals and Metallography*, 1982, vol. 53, no. 1, pp. 157–162.
 13. Tarasevich Yu.Yu. *Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy* [Percolation: theory, applications, algorithms]. Moscow, URSS Publ., 2002. 112 p.
 14. Nikitin Ya.Yu. *Asimptoticheskaya effektivnost neparametricheskikh kriteriev* [Asymptotic efficiency of distribution-free tests]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1995. 240 p.
 15. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Arsenkin A.M. The efficiency of application of N-dimensional observation tools for the analysis of ductile fracture morphology of heat treatable steels. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2010, no. 1, pp. 38–44.
 16. Shtremel M.A. *Prochnost spлавov. Chast' 2. Deformatsiya* [Alloys strength. P. 2. Deformation]. Moscow, MISiS Publ., 1997. 528 p.
 17. Chentsov N.N. *Statisticheskie reshayushchie pravila i optimalnye vyvody* [Decision functions and effective conclusions]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 524 p.
 18. 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.
 19. Gudkov A.A. *Treshchinostoykost' stali* [Resistance of steel to cracking]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 376 p.
 20. Matvienko Yu.G. *Modeli i kriterii mekhaniki razrusheniya* [Patterns and criteria of fracture mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 328 p.
 21. Cherepanov G.P. *Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [Fracture mechanics of composite materials]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 295 p.

EVALUATION OF FRACTURES AND STRUCTURES MORPHOLOGY IN CONSTRUCTION STEELS USING THE COMPUTERIZED PROCEDURES

© 2015

- A.V. Kudrya**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Physical Metallurgy and Physics of Strength”
E.A. Sokolovskaya, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Physical Metallurgy and Physics of Strength”
L.H. Ninh, postgraduate student of Chair “Physical Metallurgy and Physics of Strength”
V.A. Trachenko, postgraduate student of Chair “Physical Metallurgy and Physics of Strength”
S.V. Skorodumov, PhD (Engineering), engineer of the first category, Academic center “International school of microscopy”
National University of Science and Technology MISiS, Moscow (Russia)
K.B. Papina, leading engineer of Laboratory of chemical and structural analysis
Moscow city center
for study of physical and mechanical properties of structural materials of OAO «MOSGAZ», Moscow (Russia)
T.H. Chuong, student
National University of Science and Technology MISiS, Moscow (Russia)

Keywords: construction steels; different-scale structures; fracture; computerized procedures of image processing; stereophotogrammetry; three-dimensional model of relief; Voronoi polyhedra; fracture geometry parameters; fracture mechanism.

Abstract: The absence of fast-acting, documented, objective procedures for structures and fractures measurement makes it difficult to compare inhomogeneity of their structure for identifying structure critical factors limiting the destruction. Therefore, the administrative decisions taken to improve the quality of metal products are often subjective what makes them ineffective, limiting their applying by the narrow circle of tasks. The application of suggested computerized procedures made it possible to perform bulk documented measurements of the construction steels structures and fractures images made in 2D and 3D examination scales. For more accurate identification of structures, they were observed within the same field using the optical, atomic-powered, scanning electron microscopy and electron backscatter diffraction (EBSD - analysis). The fracture relief was reconstructed from the bulk measurements of 2D and 3D geometry of tough fractures of steels with different types of structures (secondary sorbite, ferrite-perlite banded orientation, the residual portion of the fir-tree structure), testing schemes (drop-weight test, static tension test, and test when trepanning throughout the rolling directions, tangentially in forging). It allowed identifying the relief geometrical parameters determining the differences in the metal viscosity levels (a pit depth and diameter, the web thickness between the adjacent pits). To estimate the inhomogeneity of pits distribution in fracture the authors used the statistics of Voronoi polyhedra (the polyhedra distribution by areas, the number of neighbors and the distance between pits). The statistics of measurement results of the structures and fractures elements may be useful both for their identification and for updating the mechanisms of ductile and brittle fracture in structural steels (during the direct comparison of structures and fractures) in order to identify the factors limiting the quality of metal. It is essential for the promotion of administrative decisions objectivity and efficiency while improving the consistent quality of multipurpose metal products.