

- летию Института металлов НАН Беларуси) / Сборник научных трудов общ. ред. Е.И. Маруковича. – Минск: Беларус. навука, 2010. – С 11-26.
2. Клубович В.В. СВС-покрытие для защиты футеровки сушильных печей / В.В.Клубович, В.В.Рубаник, В.Г.Самолетов // 50-й Международный научный симпозиум «Актуальные проблемы прочности», 27 сентября – 1 октября 2010 года, Витебск, Беларусь / Сборник материалов. – Витебск: ВГТУ – 2010. – Ч. 2. – С. 189-191.
  3. Клубович В.В. Исследование процесса стабилизации доломита при синтезе СВС-огнеупоров с ультразвуковой механоактивацией исходной смеси / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.Г. Самолётов // IV Международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» ФТИ НАН Беларуси, 14-16 сентября 2011 г. / Сборник научных трудов под общ. ред. С.А. Астапчика и др. – Минск: изд. ФТИ, 2011. – Ч. 2. – С. 325-329.
  4. Bekedorf A. Метилцеллюлоза для гипсовых штукатурок и шпатлевок / A. Bekedorf // <http://www.wolff-cellulosics.com>.
  5. Ланге В. Метилцеллюлоза Walocel M улучшает качество систем сухих строительных смесей / В. Ланге // Строительные материалы. 1999. №3. -С.38-39.
  6. Парикова Е.В. Шпатлевочные составы, модифицированные органоминеральными добавками /Е.В.Парикова // Современные материалы и технологии в строительстве. Юбилейный двадцать пятый Международный сборник научных трудов. Новосибирск: НГАУ 2003. - С.98-99.
  7. Фаликман В.Р. Новое поколение суперпластификаторов / В.Р. Фаликман, А.Я. Вайнер, Н.Ф. Башлыков // Бетон и железобетон. 2000. №5. С. 5-7.

## ФАКТОРЫ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЯЗКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Кудря А. В., Соколовская Э. А., Скородумов С. В., Траченко В. А.

НИТУ «МИСиС», Москва, РФ  
[AVKudrva@misis.ru](mailto:AVKudrva@misis.ru)

Вязкость конструкционных сталей определяется широким диапазоном масштабов структур: от наносегрегаций примесей, провоцирующих зернограничную хрупкость в улучшаемой стали, до дальних последствий ликвации (мезомасштаб структур), приводящих к изменению условий зарождения вязкого излома [1], и совместного влияния разномасштабных структур на разрушение, например, одной из причин образования шиферообразного излома в стали 16Г2АФ [2].

Однако отсутствие необходимой глубины понимания природы разрушения разнообразных структур исходя из статистики их геометрии, затрудняет оценку факторов, лимитирующих уровень вязкости, в т.ч. из-за недостаточного распространения средств и методов массового и документированного измерения структур и изломов.

В этой связи является актуальным оценка факторов неоднородности вязкости конструкционных сталей с использованием компьютеризированных средств наблюдения и измерения структур и разрушения.

В работе предлагаемые подходы апробированы для широкого класса конструкционных сталей (15Х2НМФА, 40Х2Н2МА, 38ХН3МФА, 16Г2АФ, трубные стали различной категории прочности), охватывающих широкий спектр состояний поставки: от поковок с развитой литой структурой до листа, с развитой иерархической лестницей разномасштабных структур.

Это позволило, в частности, установить закономерности косвенного влияния дендритной ликвации на колебания пластичности и вязкости широкого спектра конструкционных сталей (от поковок до листа) через дальние её последствия, в частности, нитки сульфидов вытянутые вдоль прокатки и полосчатую микроструктуру (сталь 16Г2АФ); класте-

ры зерен аустенита, границы которых ослаблены сегрегациями фосфора и других примесных элементов (сталь 40X2H2MA); чередующаяся неоднородность зерен по толщине листа, приводящая к образованию расщелов (сталь 10Г2ФБ-У), или различие в морфологии зернограницной составляющей в изломе – рассеянный характер размещения отдельных зернограницных фасеток, либо их скопления на дне макрохрупкого квадрата ударных обрывцов (сталь 15X2HMФА).

На основе развитых процедур прямого измерения строения структур и изломов [3] сталей типа 10Г2ФБУ, 15X2HMФА, 38ХНЗМФА, 40X2H2МА и др. показана определяющая роль совместного влияния разномасштабных структур на эволюцию разрушения и уровень его энергоёмкости, что является существенным для понимания причин разброса пластичности и вязкости конструкционных материалов в рамках действующих технологий. Это принципиально важно для повышения однородности качества и конкурентоспособности отечественной металлопродукции;

Используемые критерии стационарного распространения трещины, основанные на статистике геометрии неметаллических включений (размеры, объемная доля, плотность, наличие скоплений и строчек), оценке уровня напряжений и особенностей образования пор (скол или отслоя от матрицы), подтверждены для наблюдаемых в работе вязких механизмов разрушения и указывают на перспективность дальнейшего продолжения работ, направленных на разработку критериев неоднородности разнообразных структур;

Из прямого сопоставления конфигураций разномасштабных структур установлено, что их иерархическая организация в диапазоне масштабов от  $\sim 0,1 \dots 100$  мкм до поперечника изделия  $\sim 10 \dots 25$  мм в значительной мере определяется технологической наследственностью – механизмами протекания эволюции структур и дефектов в рамках широкого пучка технологических траекторий в пределах нормативного поля допусков технологии.

Именно проявление технологической наследственности – причина появления феррито-перлитной полосчатости, «привязанной» к ниткам сульфидов в стали 16Г2АФ, скоплений нитридов в стали 12Г2СБ, кластеров зерен аустенита, ослабленных сегрегациями фосфора и других примесных элементов в стали 15X2HMФА; скоплений субмикронных частиц сульфидов марганца на границах перегретого зерна аустенита в стали 38ХНЗМФА и др.

Учет этого обстоятельства на практике, в частности, позволил показать, что в ряде трубных сталей для снижения склонности к протяженному вязкому разрушению [4] необходим комплекс технологических мероприятий: от традиционного воздействия на неметаллические включения и охрупчивающие примеси, до создания оптимальной геометрии структуры, в частности, с учетом роли границ раздела между структурными составляющими (полоски феррита, «текстурные полосы»).

Вклад границ раздела существенен в формировании уровня вязкости и в сталях других классов. Например, в улучшаемой стали типа 38ХНЗМФА с сохранившейся дендритной структурой важно ограничить верхние пределы шага дендритов. Это может изменить соотношение двух хвостов распределения "количества соседей" (при разбиении на полиэдры Вороного изображения серного отпечатка), описывающих размер и кучность сульфидов [5], которые определяют сопротивление малым пластическим деформациям и разрушению. Установление верхнего предела по шагу целесообразно также для ограничения размеров ферритных полей в микроструктуре и сужения разброса вязкости по сечению крупных поковок из стали типа 38ХНЗМФА.

Полученные результаты принципиально важны для понимания механизмов разрушения ряда неоднородных структур. Они – основа для определения требований к допустимой неоднородности структур (при условии развития количественных подходов к их оценке), гарантирующей требуемый уровень вязкости и пластичности. Оценка кооперативного влияния разномасштабных структур на разрушение позволит сформулировать (после накопления необходимой статистики наблюдения) объективные требования к управлению технологическим процессом с целью стабилизации качества материалов на

верхнем пределе его распределения и повышения конкурентоспособности металлопродукции.

#### Список литературы

1. Штремель М.А. "Научные школы Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета). 75 лет. Становление и развитие" - М.: МИСиС. - 1997. - С. 392.
2. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Салихов Т.Ш., Пономарёва М.В., Скородумов С.В., Глухов М.Г. // Изв. вузов. Черн. мет. - 2008. - № 11. - С. 30.
3. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Сухова В.Г., Марков Е.А., Арсенкин А.М., Салихов Т.Ш. // МИТОМ. - 2009. - № 5. - С. 60-67
4. Арабей А.Б., Пышминцев И.Ю., Штремель М.А. и др. // Изв. вузов. Черн. мет. - 2009. - № 9. - С.3.
5. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч.2. Деформация. - М.: МИСиС, 1997, 528с.

### РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЯЗКОСТИ В СТАЛЯХ С РАЗНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

Кудря А. В., Соколовская Э. А., Кузько Е. И., Скородумов С. В.,  
Траченко В. А., Папина К. Б., Ле Хай Нинь

НИТУ «МИСиС», Москва, РФ  
[AVKudrya@misis.ru](mailto:AVKudrya@misis.ru)

Решение обратных задач в металловедении предполагает, что на основе сопоставления строения изломов, структур и свойств для групп сплавов или их состояний выявляются закономерности влияния параметров структуры на эти свойства [1]. Это важно для выработки объективных требований к неоднородности структур, гарантирующих заданный уровень качества сплавов. В этой связи перспективно развитие компьютеризированных процедур измерения неоднородности структур и разрушения, что позволит сформулировать содержательные гипотезы о связи свойств со структурой, обосновать числовые показатели структуры.

Накопленный опыт работы в данном направлении [2] подтвердил эффективность использования компьютеризированных процедур при сопоставлении конфигурации разномасштабных типичных структур (рисунки дендритов, серный отпечаток и микроструктура различной морфологии) и изломов конструкционных сталей. Для повышения объективности оценок были обоснованы процедуры выбора уровня бинаризации и минимально допустимой площади поля наблюдения, апробированы алгоритмы «выравнивания» интенсивности яркости в пределах кадра (и панорам, полученной их «сшивкой»).

Использование развитых процедур цифровой дилатации изображений, например, серного отпечатка по Бауману для реконструкции его первичной геометрии (в связи с повреждаемостью включений при изготовлении шлифа) позволили оценить особенности иерархической организации изображений и их связь со строением излома. Для оценки неоднородности размещения случайных элементов изображения на плоскости оценены возможности построения полиэдров Вороного.

Развитие методик измерения 2D- и 3D-изображений изломов предусматривало синтез 3D-картины из нескольких 2D-кадров (стереофотограмметрия); косвенный анализ 3D-особенностей по «плоским» снимкам (2D-кадрам) и фрактальной размерности (по измерению траектории рельефа).