

КООПЕРАТИВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАЗНОМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР ПРИ РАЗРУШЕНИИ

Кудря А. В.

НИТУ "МИСиС", Москва. РФ,
AVKudrya@misis.ru

Из геометрии кристаллической решётки может последовать два элементарных способа образования новых поверхностей (разрушение): либо поэтапный разрыв атомных связей, как правило, по некоторой кристаллографической плоскости – скол, либо скольжение вдоль некоторой плоскости – пластический сдвиг (срез). Если при разрыве связей расходятся и «берега» трещины, пластическая деформация не обязательна, поэтому скол – это хрупкое разрушение. Когда образование новых поверхностей происходит в результате скольжения, разделение на части наступает после большого пластического сдвига, чему сопутствует большая работа пластической деформации, поэтому срез – разрушение вязкое.

Два элементарных акта разрушения (образование новой поверхности в масштабах решетки, начиная от 1...100 нм) - скол и срез в сложном взаимодействии дают наблюдаемое множество микроскопических процессов разрушения, обусловленное разнообразием микроструктур материала. Взаимодействие многих элементарных очагов разрушения (мезоскопический масштаб явления) в среде с неоднородной структурой последовательно выводит разрушение к его конечному макроскопическому результату – трещине.

Скол необратим, прямые наблюдения на односторонней фольге с излома [1] показали, что зеркально гладкий при низких температурах скол монокристалла молибдена – правильная лестница с наноступеньками (высотой 10...20 нм), перпендикулярными фронту трещины. Это следы скольжения, а правильные ряды сформировавшихся их дислокаций наблюдаются на глубине 2...20 мкм под поверхностью скола. В изломе скол представляет собой скопление, как правило, упорядоченных (по определённой кристаллографической плоскости) фасеток, на поверхности которых видны следы выхода дислокаций (речной узор). Размер фасеток скола связан со структурой сложным образом [2], например, в нашем случае увеличение поперечника зерна аустенита не всегда соответствовало увеличению масштабов фасеток.

В том случае, когда пластическая деформация минимальна, скол трансформируется в квазискол, он характеризуется большим (на порядок и выше) разбросом размеров фасеток, расположенных менее упорядочено, без признаков речного узора на их поверхности.

У скола есть альтернатива – хрупкое зернограничное разрушение из-за зернограничных сегрегаций в пределах твёрдого раствора в моноатомном слое, охрупчивающем уже при его заполнении на 5 % [3]. Существуют критерии выбора между вскрытием зернограничной фасетки и сколом зерна в смешанном изломе [4] и распространением трещины, если не все фасетки охрупчены.

Развитие хрупкого разрушения возможно, когда есть очаговая трещина критического размера $d_{кр} \geq \pi(K_{IC}/\sigma_T)^2 / 2$, где K_{IC} – вязкость разрушения; σ_T – предел текучести. В условиях хладноломкости при одинаковой доле ζ зернограничной составляющей в изломе, там, где наблюдаются скопления зернограничных фасеток величина $d_{кр}$ достигается быстрее (по сравнению с рассеянным характером их распределения). Это, в частности, позволило объяснить, почему температурная зависимость доли зернограничной составляющей $\zeta(T)$ в изломах ударных образцов стали 15X2НМФА, прямо не связана с падением ударной вязкости при понижении температуры испытания [5]. Различ-

ная география и морфология хрупкой составляющей в изломе от образца к образцу отражает неоднородность структур ликвации и сопутствующий этому разброс вязкости.

Отличие вязкого разрушения от хрупкого - в масштабах пластической деформации (на 2–3 порядка и более). Пластическая деформация в объеме образца достигая своего предельного значения становится неустойчивой и локализуется в шейке. Её последующее вязкое разрушение определяется присутствием в материале субмикронных (0,1...1 мкм) частиц: оксидов, нитридов, силикатов, сульфидов. В их окрестности накапливается «критическая масса» дислокаций, достаточная либо для скалывания самих частиц, либо скола по поверхности раздела фаз (отслоение их от металла) вследствие чего образуются поры. Они в процессе последующей деформации вытягиваются, перемычки между соседними порами утоняются, образуя после разрушения срезом ямки, которые сливаются в единую наклонную трещину пилообразного излома [6].

При случайном расположении включений ямки обычно подразделяют на равноосные сферические и параболические [7]. Прямые измерения геометрии представительной выборки ямок вязких изломов нескольких групп сталей показали [8], что в простейшем (квадратичном) приближении ямка – это параболоид вращения $y = c(x^2 + z^2)$, «обрезанный сверху» плоскостью мезоступени пилообразного излома, наклоненной под углом $\alpha = \arctg(H/V)$, где H и V – ее высота и ширина.

Ямки становились более плоскими и приобретали линзообразную форму с увеличением их диаметра. Уменьшение величины коэффициента в уравнении параболы, описывающей вертикальное сечение ямки, при переходе от мелких к крупным ямкам, отражает нарушение закона геометрического подобия. Чем больше отношение глубины ямок к их ширине, тем больше раскрытие от среза их бортов и выше уровень вязкости разрушения [9].

Развитие вязкого разрушения определяется также особенностями геометрии размещения неметаллических включений. Частный случай неоднородности их размещения - скопления субмикронных частиц по границам перегретого зерна аустенита мезомасштаба (поперечником ~ 100...300 мкм и выше). В изломе им отвечают грубые зернограничные фасетки с микровязким строением поверхности.

Прямые измерения геометрии ямок выявили [8] различия в их строении в центре и на периферии зернограничной фасетки. Также было показано, что морфология ямок зависит от ориентации зернограничного кластера частиц макроплоскости излома (с увеличением угла наклона площадки, на которую действуют внешние механические напряжения, повышается доля касательных напряжений и вклад микропластической деформации в разрушение). Это позволило предложить возможный сценарий вскрытия вязкой межзеренной фасетки: последовательное зарождение и слияние пор на субмикронных частицах, от центра кластера по направлению к его периферии.

Совместное участие в разрушении всего масштаба структур явление достаточно распространённое. Так, например, наносегрегация фосфора по границам зерна аустенита $d \sim 10-30$ мкм в улучшаемой стали приводит к вскрытию зернограничных фасеток. Межосевые скопления сульфидов и ферритные поля (поперечником 60-120 мкм и выше) в микроструктуре вследствие дендритной ликвации – к изменению условий зарождения вязкого излома [9]. Дальние последствия ликвации – причина транскристаллитного разрушения по поверхности грубых пластин цементита (~ 100 – 500 мкм) в верхнем бейните, ослабленных сегрегацией серы (~ 10 нм), вытесняемой при их росте.

Оттеснение серы в межосья при кристаллизации слитка после прокатки даёт нитки сульфидов. Прилегающий к ним слой металла обогащен марганцем и туда втягивается углерод. Это при охлаждении после горячей прокатки даёт здесь полосы перлита. Под напряжением, на границе ниток сульфидов с перлитом последовательно образуются цилиндрические поры (в различных плоскостях), они, сливаясь, приводят к шиферообразному строению излома (и сопутствующему снижению вязкости стали до 1,5 раз) [11].

Совместное действие неоднородной структуры (например, бейнитная прослойка в середине толщины листа на фоне феррито-перлитной полосчатости) и «грязного» слоя в осевой зоне приводит к расслоям при испытании падающим грузом и к снижению пластичности в Z-направлении, где разрушение «самоорганизуется» по грязному слою.

Таким образом, исследование механизмов совместного взаимодействия и конкуренции разномасштабных структур позволяет углубить представления о закономерностях протекания разрушения в среде с неоднородной структурой. Это имеет важное практическое значение: для выявления причин разброса качества металлопродукции и повышения его однородности.

Работа выполнена в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/2085) и благодаря финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-03-00995-а).

Список литературы

1. Штремель М.А., Беляков Б.Г., Беломытцев М.Ю. // ДАН СССР. 1991. № 1. С. 105.
2. Горицкий В.М. Тепловая хрупкость сталей М.: Metallurgizdat, 2007.
3. Штремель М.А. «Научные школы Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета). 75 лет. Становление и развитие». М.: МИСиС. 1997. С. 392 – 397.
4. Штремель М.А. // ФММ. 1982. Т. 53. № 4. С. 807.
5. Кудря А.В., Никулин С.А., Николаев Ю.А., Арсенкин А.М., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Чернобаева А.А., Кузько Е.И. // Изв. вузов. Чёрн. металлургия. 2009. № 9. С. 62.
6. Штремель М.А., Кудря А.В., Бочарова М.А., Пантелеев Г.В. // ФММ. 2000. №5. С.102.
7. Броек Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
8. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Арсенкин А.М. // ДиРМ.2010. № 1. С. 38.
9. Штремель М.А. // ФММ. 2005. Т. 99. № 4. С. 16-25.
10. Кудря А.В., Соколовская Э.А. // Изв. РАН. Сер. "Физическая". 2004. Т. 68. № 10. С. 1495.
11. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Салихов Т.Ш., Пономарёва М.В., Скородумов С.В., Глухов М.Г. // Изв. Вузов. Черная металлургия. 2008. № 11. С. 30.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ ПРОЦЕДУР ИЗМЕРЕНИЯ СТРУКТУР И ИЗЛОМОВ

Соколовская Э. А.

*НИТУ "МИСиС", Москва, РФ,
sokolovskaya@misis.ru*

Масштаб структур, встречающихся в конструкционных материалах весьма широк: от нано- до макроразмеров. Их конечный рисунок отражает особенности эволюции структур и дефектов в рамках длинной технологической цепочки, например, в чёрной металлургии [1,2].

Процессы разрушения – это совместное эффективное взаимодействие дефектов решетки со структурой материала (на разных масштабах наблюдения) [3]. Понимание механизмов разрушения различных структур, их взаимодействия при деформации и разрушении определяет успех при определении причин провалов вязкости, поиске оптимальных структур под требуемые свойства. При быстром протекании разрушения в металле (для стали со скоростью ~ 5÷6 км/с [4]) обычно наблюдается только его конечный результат (излом), это объясняет широкий интерес к изучению топографии поверхности разрушения [5].