

УДК 620.186.4+539.23+539.216.1:531

**УДАРНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СТАЛИ 110Г13 И МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
В ПЛАСТИЧЕСКИХ ЗОНАХ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

Г.В.Клевцов, Н.А.Клевцова, М.В.Фесенюк, М.Р.Кашапов, О.А.Фролова, В.Ю.Задорожный*

Оренбургский государственный университет, klevtsov11948@mail.ru

** Государственный технологический университет (МИСиС), Москва*

Показано, что ударная вязкость стали 110Г13 при температуре -196°C имеет тенденцию к снижению с уменьшением среднего размера зерна от 200 до 60 мкм. При этом сталь разрушается по механизму межзеренного хрупкого разрушения. В очаге разрушения выявлена зона θ_1 длиной в 1-2 зерна с транскристаллитным хрупким разрушением. Глубина пластической зоны под поверхностью изломов примерно в пять раз меньше среднего размера зерна в стали.

Ключевые слова: ударное разрушение стали, мартенситные превращения, глубина пластической зоны

It is shown that the impact hardness of steel 110G13 at the temperature -196°C tends to decrease within the average grain diameter decreasing from 200 to 60 micron. At that the steel ruptures according to the mechanism of intergranular brittle fracture. The zone θ_1 with the length of 1-2 grains with transgranular brittle fracture is found out in the fracture nucleus. The plastic zone depth under the surface of fractures is about five times less than the average grain diameter of steel.

Keywords: impact fracture of steel, martensitic transformations, plastic zone depth

Введение

Известно, что разрушение метастабильных аустенитных сталей сопровождается мартенситными $\gamma \rightarrow \alpha$ или $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ превращениями в пластических зонах у вершины распространяющейся трещины [1]. Наличие мартенситных фаз в аустенитной матрице неоднозначно влияет на механические свойства сталей и сопротивление развитию трещине [2]. Большое значение имеет характер распределения мартенситных фаз в пластических зонах, который связан с микромеханизмом разрушения и локальным напряженным состоянием материала у вершины трещины [1,3].

Целью настоящей работы является исследование механизма ударного разрушения при температуре -196°C аустенитной стали 110Г13 с различным размером зерна и распределения мартенситных фаз в пластической зоне под поверхностью изломов.

Материал и методики исследования

В качестве исследуемого материала использовали аустенитную сталь 110Г13 со средним размером зерна 200, 120 и 60 мкм. Измельчение зерна проводили путем многократнойковки. После закалки от температуры 1100°C в воде данная сталь имела однофазную структуру γ -железа. Охлаждение ее до температуры -196°C не приводило к мартенситным превращениям.

Образцы размером $10 \times 10 \times 55$ мм с V-образным концентратором напряжения охлаждали в жидком азоте в течение 10 минут, затем перенесли на копер МК-30 и производили ударное разрушение. Полученные изломы исследовали методами макро- и микрофрактографии. Глубину пластической зоны под поверхностью изломов и распределение мартенситных фаз в данной зоне определяли рентгеновским методом. С этой целью использовали метод послойного травления излома с последующим рентгенографированием его поверхности [4]. О глубине пластической зоны под поверхностью излома судили по изменению ширины

рентгеновской дифракционной линии (311) K_α . Количество α - и ϵ -мартенсита как на поверхности изломов, так и в пластических зонах под поверхностью изломов, определяли по интегральной интенсивности дифракционных линий (111) K_α γ -фазы, (110) K_α α -фазы и (101) K_α ϵ -фазы [5].

Микрофрактографические исследования проводили в растровом микроскопе JSM-6092, рентгеноструктурный анализ изломов — на дифрактометре ДРОН-4-07.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе исследования получена нижеследующая таблица, из которой видно, что с уменьшением размера зерна ударная вязкость стали имеет тенденцию к уменьшению.

Среднее значение размера зерна и ударной вязкости стали 110Г13Л при температуре -196°C

$d_{\text{ср.}}$, мкм	200	120	60
KCV , МДж/м ²	0,25	0,23	0,14

Ударные изломы стали 110Г13, полученные при температуре -196°C , имеют макрорупкое кристаллическое строение. Губы среза и утяжка у поверхности излома отсутствуют (рис.1).

Микрофрактографический анализ ударного разрушения стали 110Г13 с размером зерна 200 мкм показал, что данная сталь разрушается преимущественно по механизму межзеренного хрупкого разрушения (рис.2). В очаге разрушения можно наблюдать зону длиной 0,3-0,4 мм (назовем ее зоной θ_1), образование которой произошло по механизму микророскола (рис.2а) в отличие от обычно образующейся в очаге разрушения вязкой зоны сдвига θ [6]. В центральной части излома разрушение хрупкое межзеренное. Встречаются как сравнительно гладкие фасетки межзеренного хрупкого разрушения (рис.2б), так и с элементами вязкого микрорельефа (рис.2в). Вторичные трещины по границам зерен не наблюдаются.

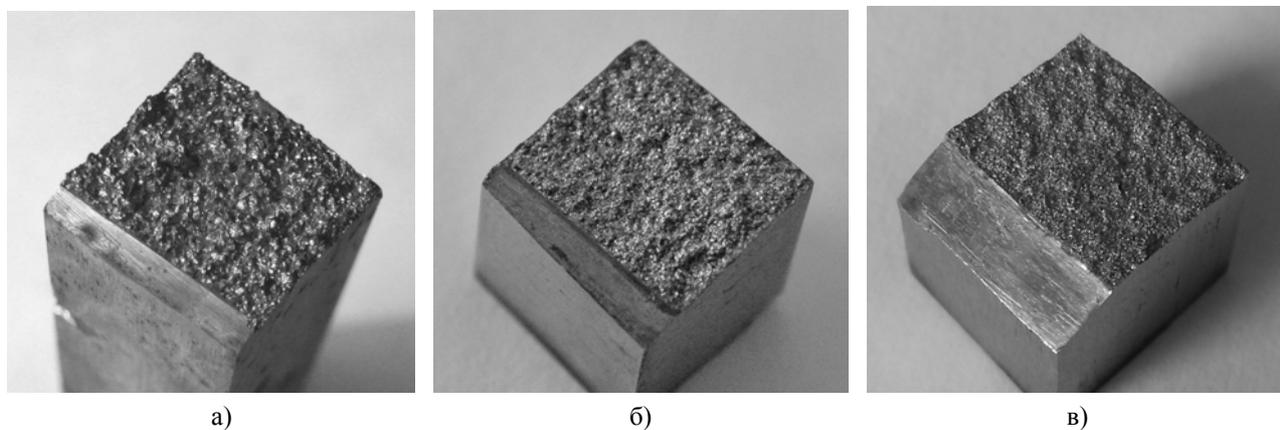


Рис.1. Общий вид ударных изломов стали 110Г13 с размером зерна 200 мкм (а), 120 мкм (б), и 60 мкм (в), полученных при температуре -196°C

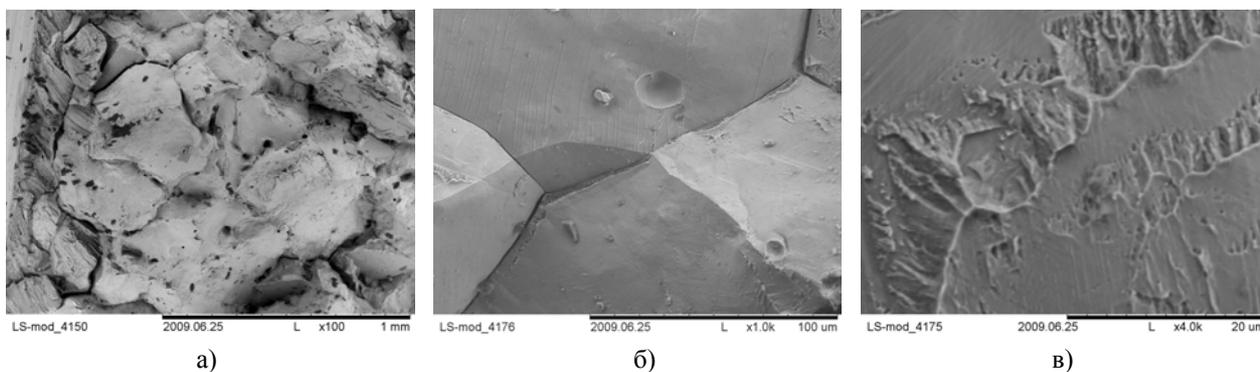
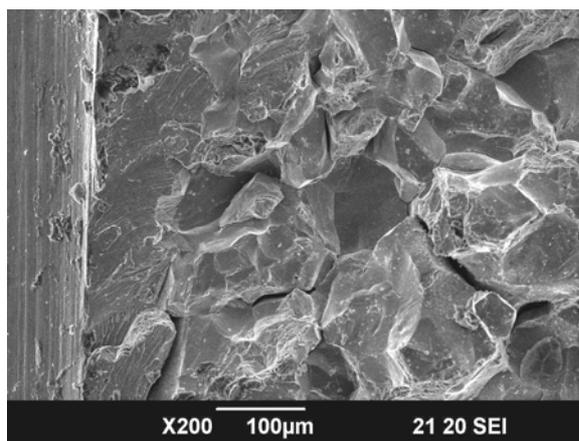
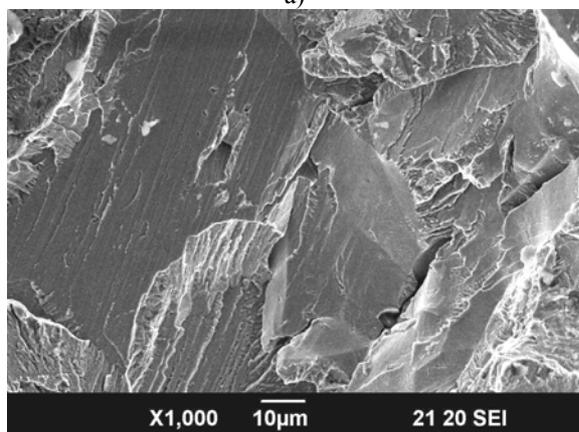


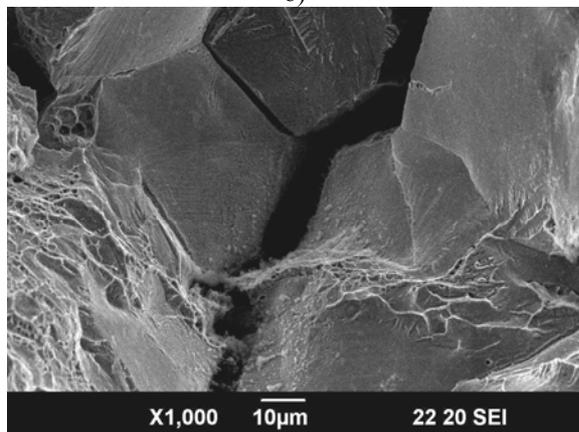
Рис.2. Микрорельеф излома стали 110Г13 с размером зерна 200 мкм в очаге разрушения (а,б) и в центральной части излома (в): а) $\times 100$; б) $\times 1000$; в) $\times 4000$



а)



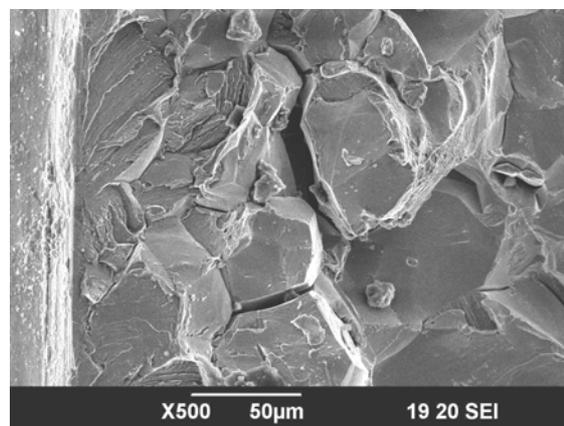
б)



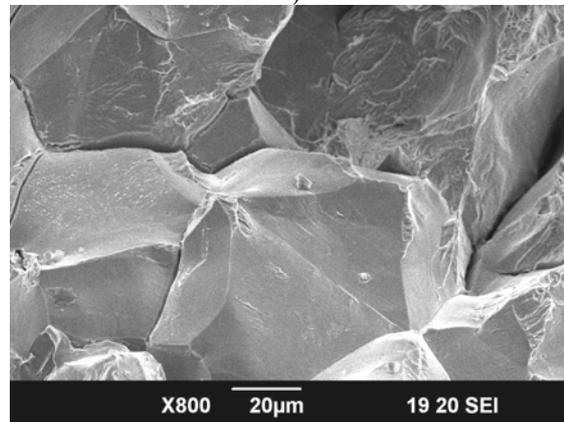
в)

В очаге разрушения стали 110Г13 с размером зерна 120 мкм также можно выделить зону θ_1 , длиной 0,15-0,25 мм (рис.3а), с хрупким разрушением по механизму скола (рис.3б). За пределами данной зоны доминирующим механизмом разрушения является межзеренное хрупкое разрушение (рис.3а). Хорошо видны вторичные трещины и небольшие участки с ямочным микрорельефом (рис.3в). Можно предположить, что границы зерен, возможно, были ослаблены, например в результате многократнойковки.

Схожий микрорельеф имеют и изломы стали со средним размером зерна 60 мкм. В очаге разрушения хорошо видна зона θ_1 длиной 0,05-0,1 мм (рис.3г). За пределами данной зоны разрушение произошло по механизму межзеренного хрупкого разрушения (рис.3д). Видны вторичные трещины, однако участки с ямочным микрорельефом практически не встречаются.



г)



д)

Рис.3. Микрорельеф излома стали 110Г13 с размером зерна 120 мкм (а,б,г) и 60 мкм (г,д) в очаге разрушения (а,б,г) и центральной части излома (в,д): а) $\times 200$; б) $\times 1000$; в) $\times 500$; д) $\times 800$

Таким образом, можно сделать вывод, что сталь 110Г13 при ударном нагружении при температуре -196°C независимо от размера зерна разрушается, в основном, по механизму межзеренного хрупкого разрушения. В очаге разрушения выявлена зона θ_1 длиной в 1-2 зерна, образовавшаяся по механизму микроскола. При разрушении стали с размером зерна 200 мкм центральная часть излома состоит из гладких фасеток межзеренного хрупкого разрушения; вторичных трещин по границам зерен не наблюдается. В центральной части изломов стали с размером зерна 120 мкм видны вторичные трещины по границам зерен и участки с ямочным микрорельефом. В центральной части изломов стали с размером зерна 60 мкм видны фасетки межзеренного хрупкого разрушения и вторичные трещины. По-видимому, вышеуказанные изменения ударной вязкости и механизма разрушения стали 110Г13 в зависимости от размера зерна связано с технологией измельчения зерна стали путем многократнойковки, приводящей к ослаблению межзеренных границ и накоплению на данных границах трещин.

На примере стали с размером зерна 200 мкм определены рентгеновским методом глубину пластической зоны h_p под поверхностью изломов и распределение мартенситных фаз в данной зоне.

Результаты исследования показали, что глубина пластической зоны под поверхностью изломов составляет примерно 40 мкм, что в пять раз меньше среднего размера зерна в стали. Принимая во внимание тот факт, что в данном случае отношение h_{\max}/t составляет $4 \cdot 10^{-3}$, т.е. $h_{\max}/t < 10^{-2}$, можно констатировать [1,2], что ударное разрушение стали 110Г13 при температуре -196°C произошло в условиях плоской деформации.

На рис.4 видно, что максимальное количество α -мартенсита образуется на поверхности излома, а затем непрерывно уменьшается вглубь излома. Распределение ε -мартенсита отличается тем, что на поверхности излома он отсутствует, затем его количество увеличивается, достигая максимума на некоторой глубине под поверхностью излома, где искажение кристаллической структуры меньше, чем на поверхности. Затем количество ε -мартенсита вновь убывает по глубине и на границе пластической зоны становится равным нулю.

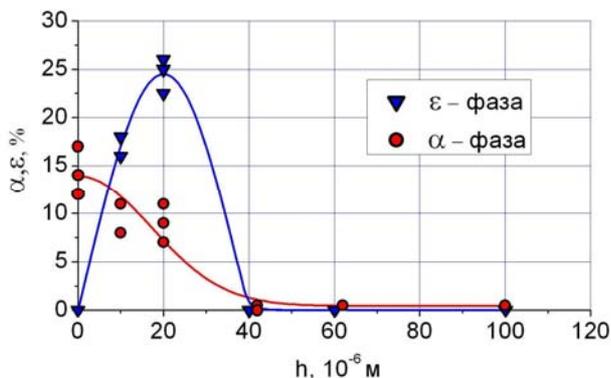


Рис.4. Распределение количества α - и ε -мартенсита в пластических зонах под поверхностью изломов стали с размером зерна 200 мкм

Такое распределение α - и ε -мартенсита в пластических зонах под поверхностью изломов уже наблюдалось при вязком и смешанном разрушении аустенитных сталей, в которых мартенситные превращения происходят по механизму $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ [1]. По-видимому, при межзеренном хрупком разрушении стали на распределение мартенситных фаз в пластической зоне оказывают влияние те же факторы, что и при вязком или смешанном разрушении.

Выводы

1. Ударная вязкость стали 110Г13 при температуре испытания -196°C имеет тенденцию к снижению с уменьшением среднего размера зерна.

2. Независимо от размера зерна сталь 110Г13 разрушается, в основном, по механизму межзеренного хрупкого разрушения. При разрушении стали с размером зерна 200 мкм центральная часть излома состоит из гладких фасеток межзеренного хрупкого разрушения, вторичных трещин по границам зерен не наблюдается. В центральной части изломов стали с размером зерна 120 мкм видны вторичные трещины по границам зерен и участки с ямочным микрорельефом. В центральной части изломов стали с размером зерна 60 мкм — фасетки межзеренного хрупкого разрушения и вторичные трещины.

3. В очаге разрушения стали 110Г13 выявлена зона θ_1 длиной в 1-2 зерна с транскристаллитным хрупким разрушением.

4. Глубина пластической зоны под поверхностью изломов стали 110Г13 с размером зерна 200 мкм примерно в пять раз меньше среднего размера зерна в данной стали.

5. Рентгеновским методом исследовано распределение α - и ε -мартенсита в пластических зонах под поверхностью изломов. Максимальное количество α -мартенсита обнаружено на поверхности изломов, затем его количество непрерывно уменьшается от поверхности вглубь излома. Максимальное количество ε -мартенсита обнаружено на некоторой глубине под поверхностью излома, где искажение кристаллической структуры меньше, чем на поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (проект АБЦП № 1383).

1. Клевцова Н.А., Фролова О.А., Клевцов Г.В. Разрушение аустенитных сталей и мартенситные превращения в пластических зонах. М.: Изд-во Академии Естественных наук, 2005. 155 с.
2. Сагарадзе В.В., Уваров А.И. Упрочнение аустенитных сталей. М.: Наука, 1989. 270 с.
3. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСиС, 2007. 264 с.
4. Р 50-54-52-88. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение глубины зон пластической деформации под поверхностью разрушения. М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1988. 24 с.
5. Р 50-54-52/2-94. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение характеристик разрушения металлических материалов рентгеновским методом. М.: ВНИИНМАШ Госстандарта России, 1994. 28 с.