

МЕХАНИЗМ УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 10 ПОСЛЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА

Клевцов Г. В.¹, Валиев Р. З.², Клевцова Н. А.¹, Рааб Г. И.², Фесенюк М. В.¹,
Кашапов М. Р.¹

¹⁾ Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия.

²⁾ Институт физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия.

klevtsov11948@mail.ru

Целью настоящей работы является изучение механизма ударного разрушения стали 10 в исходном состоянии и после РКУ прессования в интервале вязко-хрупкого перехода.

Материалы и методики исследования. В качестве исследуемого материала была использована промышленная сталь 10 в исходном состоянии (горячекатаное состояние) со средним размером зерна 45 мкм и в субмикrokристаллическом состоянии, полученном путем равноканального углового прессования (РКУП) [1]. С этой целью заготовки в виде прутков диаметром 10 мм и длиной 350 мм были закалены от температуры 880°C в воде. Далее заготовки подвергли РКУ прессованию в следующем режиме: угол пересечения каналов инструмента составлял $\varphi = 120^\circ$, количество проходов – 4 и 6 с поворотом образца вокруг продольной оси на 90° после каждого прохода (маршрут Вс) [1], что обеспечивало знакопеременную деформацию. Температура деформации 200°C. Средний размер зерна после 4 проходов РКУП составлял 350 нм, а после 6 проходов РКУП – 300 нм.

Определение стандартных характеристик стали 10 при статическом растяжении проводили на круглых образцах диаметром 3 мм и длиной рабочей части 15 мм. Ударные испытания образцов размером 10x10x55 мм с V-образным концентратором напряжения проводили в интервале вязко-хрупкого перехода на копре МК-30.

Полученные изломы исследовали методами макро-, микрофрактографии (JSM-6092) и рентгеноструктурного анализа (ДРОН-4-07). Для определения глубины пластической зоны под поверхностью изломов использовали метод послойного травливания излома с последующим рентгенографированием его поверхности [2].

Результаты исследования и их обсуждение. В таблице 1 представлены механические свойства стали 10 в исходном состоянии и после РКУП. Видно, что после РКУ прессования твердость и прочностные характеристики стали 10 повышаются почти в 2 раза, а пластичность снижается. Следует отметить, что твердость стали после 4 и 6 проходов РКУП одинакова.

Таблица 1. Среднее значение механических свойств стали 10 в исходном состоянии и после РКУП

Состояние стали	НВ	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	δ , %
Исходное состояние*)	121	460	350	25
После РКУП, 4 прохода	235	1028	989	8
После РКУП, 6 проходов	235	1050	955	11

*) по литературным данным

На температурной зависимости ударной вязкости (KCV) стали 10 в исходном состоянии и после 4 и 6 проходов РКУП видно, что в области низких температур значения ударной вязкости стали в исходном состоянии и после РКУП практически не отли-

чаются друг от друга и остаются на уровне 0,1-0,2 МДж/м² независимо от количества проходов РКУП.

В интервале вязко-хрупкого перехода поведение стали 10 в исходном состоянии и после РКУП сильно отличается. Сталь 10 в исходном состоянии характеризуется наличием ярко выраженного интервала вязко-хрупкого перехода (примерно, от -5 до 100 °С), а после 4 проходов РКПУ – узким интервалом вблизи температуры -50 °С (рис. 1). При этом порог хладноломкости стали 10 практически не изменился.

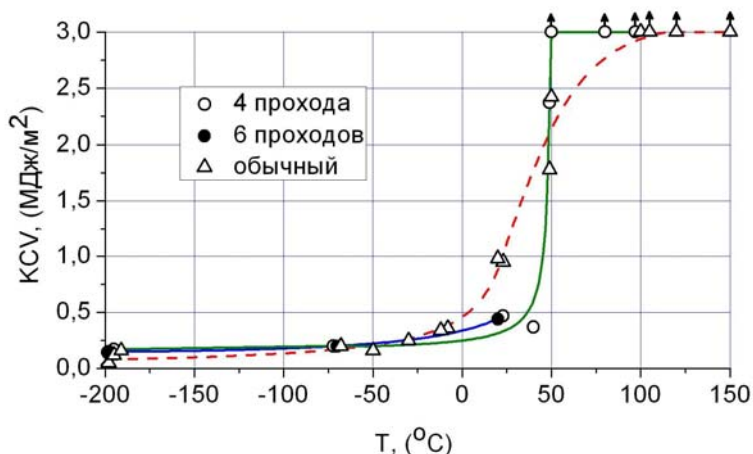
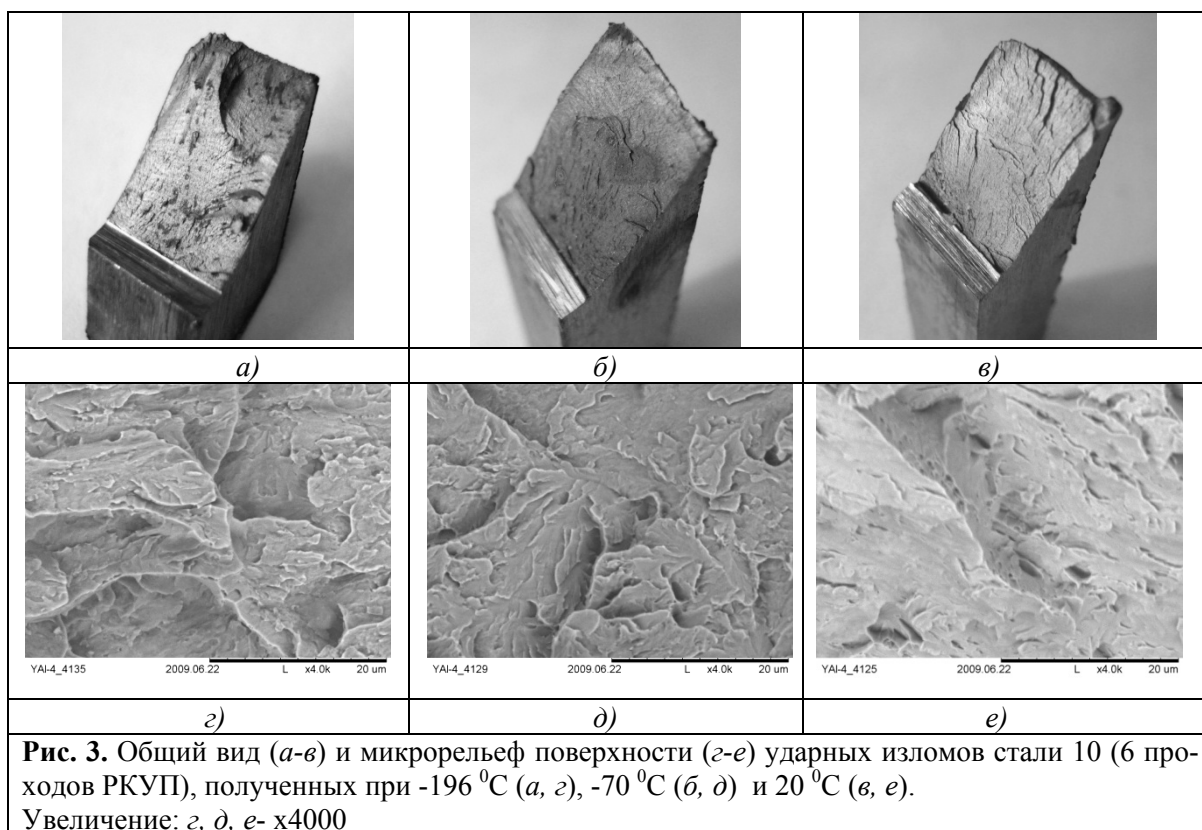
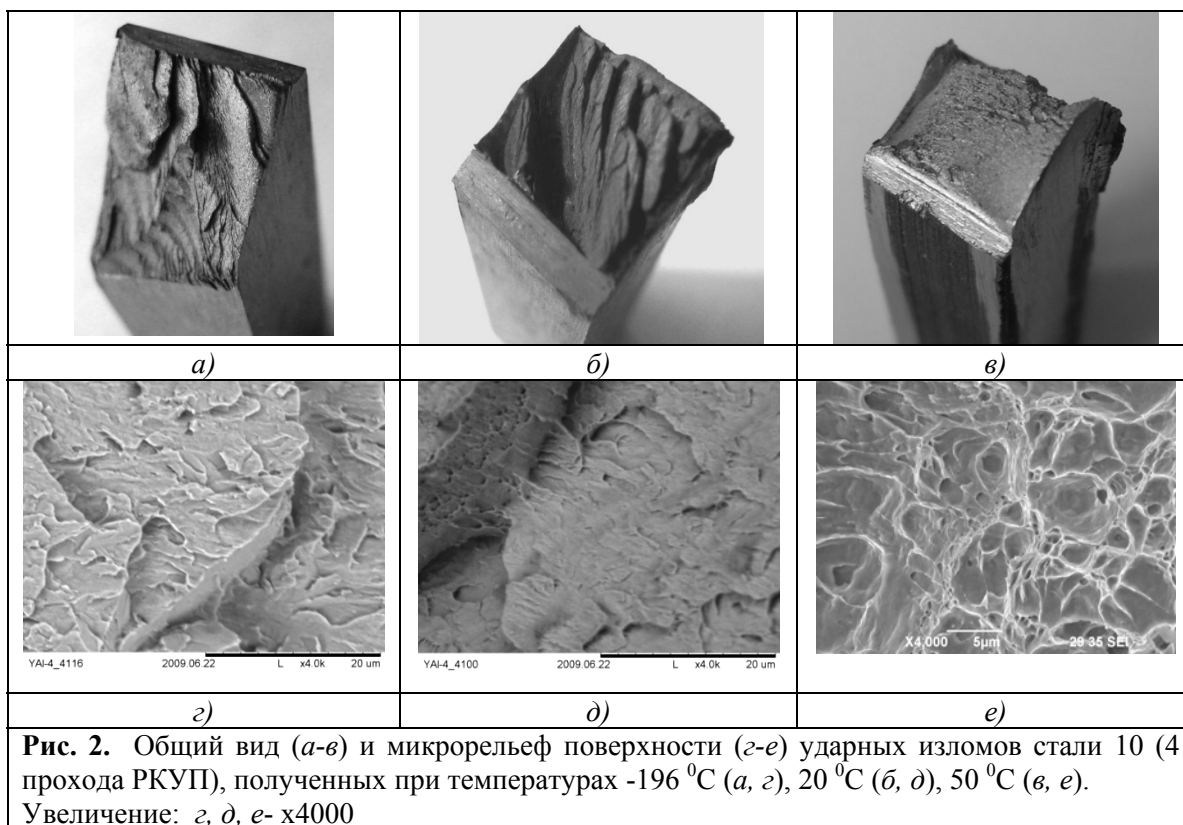


Рис. 1. Температурная зависимость ударной вязкости (KCV) стали 10 в исходном состоянии (1) и после РКУП с 4 (2) и 6 (3) проходами

Ударные изломы стали 10 в исходном состоянии, полученные при низких температурах, макроразрывные. Разрушение произошло по механизму микроскола с участками межзеренного хрупкого разрушения. В интервале вязко-хрупкого перехода изломы вязко-хрупкие с сосредоточенной областью вязкого и хрупкого разрушения [2]. Область вязкого разрушения имеет ямочный микрорельеф, центральная хрупкая часть – микроскол с участками ямочного микрорельефа. Изломы, полученные в верхней области вязко-хрупкого интервала при высоких температурах, вязкие с ямочным микрорельефом.

Все ударные изломы стали 10 после 4 проходов РКУП – светлые, матовые (рис. 2 а-в). Поверхность изломов, полученных при низких температурах (-70 и -196 °С), расположена под углом примерно 45° к оси образца (рис. 2 а). На поверхности изломов можно наблюдать чередующиеся светлые и темные макрополосы (рис. 2 а). Ширина светлых полос примерно 1 мм; темных – 0,2 мм. Микрофрактографический анализ показал, что поверхность низкотемпературных изломов состоит из ступенчатого микрорельефа, образовавшегося путем квазискола (рис. 2 з). Поверхность изломов, полученных при температуре 20 °С (рис. 2 б), расположена под углом 75° к оси образца. Она состоит из глубоких, параллельно расположенных гребней, образованных, по-видимому, путем среза. Микрорельеф поверхности излома также состоит из чередующихся ступенек, однако торцы имеют ямочный микрорельеф, образованный, по-видимому, путем расслоения металла и вязкого отрыва (рис. 2 д). Изломы, полученные при 50 °С, волокнистые; имеют губы среза и утяжку (рис. 3 в). Микрорельеф изломов ямочный (рис. 3 е), аналогичный микрорельефу изломов стали 10 в исходном состоянии.

Ударные изломы стали 10 после 6 проходов РКУП (рис. 3 а-в) более гладкие по сравнению с изломами стали 10 после 4 проходов РКУП. Угол наклона поверхности всех изломов к оси образцов составляет примерно 35°.



На поверхности низкотемпературных изломов (рис. 3 *a, б*) видны отслоения. Чередующиеся светлые и темные полосы на поверхности изломов не наблюдаются. При низких температурах сталь разрушается по механизму квазискола (рис. 3 *z, д*). Микрорельеф поверхности изломов, полученных при 20°C (рис. 3 *е*), состоит из малорельефных вытянутых участков, образованных, по-видимому, в результате среза.

Таким образом, результаты фрактографического анализа показали, что ударное разрушение стали 10 после РКУП при температурах -196 и -70 $^{\circ}\text{C}$, а, возможно, и при комнатной температуре, произошло в условиях плоской деформации (ПД). Определим глубину пластических зон под поверхностью данных изломов и рассчитаем отношение h_{max}/t (h_{max} – максимальная глубина пластической зоны под поверхностью излома, t – толщина образца), характеризующее локальное напряженное состояние материала у вершины трещины [2] в момент разрушения образцов (табл. 2).

Таблица 2. Глубина пластической зоны (h_y) под поверхностью ударных изломов стали 10 после 4 проходов РКУП и отношение h_{max}/t

Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	-196	-70	20
h_y , мкм	30	30	50
h_{max}/t	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$

Под поверхностью исследуемых изломов обнаружена одна пластическая зона, а отношение $h_{\text{max}}/t < 10^{-2}$. Это свидетельствует о том, что разрушение произошло в условиях плоской деформации (ПД) [2]. Определим значение трещиностойкости стали 10 после 4 проходов РКУП в условиях плоской деформации (K_{Ic}) по глубине пластической зоны под поверхностью изломов [2] и сравним ее со статической трещиностойкостью стали 10 в исходном состоянии. Расчет показал, что трещиностойкость (K_{Ic}) стали 10 после РКУП составляет $K_{Ic} = 31,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, в то время как статическая трещиностойкость стали 10 в исходном состоянии – $K_{Ic} = 28 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Следовательно, трещиностойкость стали 10 после РКУП не только не уменьшается, но даже несколько возрастает по сравнению с исходным состоянием.

Выводы. 1. РКУ прессование почти в 2 раза повышает твердость и прочностные характеристики стали 10 по сравнению с исходным состоянием, однако снижает пластические свойства. При этом РКУ прессование практически не изменяет порог хладноломкости стали 10, однако резко уменьшает интервал вязко-хрупкого перехода.

2. Доминирующими механизмами низкотемпературного разрушения образцов из стали 10 в исходном состоянии является микроскол, а после 4 и 6 проходов РКУП – квазискол. В интервале вязко-хрупкого перехода сталь 10 в исходном состоянии разрушается вязко-хрупко (микроскол и ямочный микрорельеф), а после РКУП – с образованием вязких гребней и ступенек (4 прохода РКУП) или малорельефных вытянутых участков (6 проходов РКУП). В верхней области вязко-хрупкого перехода сталь 10 в исходном состоянии и после РКУП разрушается вязко с образованием ямочного микрорельефа.

3. Трещиностойкость стали 10 после РКУП в условиях плоской деформации (K_{Ic}), определенная по глубине пластической зоны под поверхностью изломов, не только не уменьшается, но даже несколько возрастает по сравнению с исходным состоянием (с 28 до $31,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$).

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства.- М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.- 398 с.
2. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций.- М.: МИСиС, 2007.- 264 с.