

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 669.15-194.55:539.4

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ НА МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ УДАРНОМ ИЗГИБЕ ОБРАЗЦОВ ВЫСОКОВЯЗКОЙ СТАЛИ С ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ. ОБЛАСТЬ СЖАТИЯ

© 2019 г. А. Н. Морозова^{а, *}, Г. В. Шапов^б, В. А. Хотин^б,
В. М. Фарбер^б, О. В. Селиванова^б

^а Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990 Россия

^б Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

*e-mail: amorozova@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 06.11.2018 г.

После доработки 12.02.2019 г.

Принята к публикации 18.02.2019 г.

Изучены профили изломов и распределение микротвердости в отдельных участках области сжатия образцов Шарпи высоковязкой стали с волокнистой структурой, сформированной безрекристаллизационной контролируемой прокаткой с ускоренным охлаждением. Исследован механизм пластического течения в области сжатия ударных образцов с различными типами надрезов. Показано, что в области сжатия в результате интенсивного пластического течения возникают два пластических шарнира с осями, содержащими высокую плотность линий скольжения.

Ключевые слова: высоковязкая сталь, ударный изгиб, зоны разрушения, пластический шарнир, зона долома

DOI: 10.1134/S0015323019090092

ВВЕДЕНИЕ

Область сжатия – особая область изгибаемого образца (балки), деформация в которой, начинающаяся с момента приложения нагрузки, проходит согласованно с деформацией в области растяжения. При снижении вязкости металла размер области сжатия (зоны долома) уменьшается [1], как и уровень пластической деформации в ней. Даже при разрушении высоковязких образцов область сжатия в несколько раз меньше области растяжения [2], а суммарная деформация в зоне долома значительно выше.

Область сжатия примыкает к “нижней” поверхности образца, что в условиях плосконапряженного состояния определяет повышенную маневренность дислокаций даже в хрупком материале. Сравнительно легкое движение дислокаций в полосах сдвига приводит в области сжатия к возникновению растягивающих напряжений, нормальных к полосе сдвига (линиям скольжения) и раскрывающих их отдельные участки в трещины [3]. Такие трещины сдвига, окаймляющие ось пластического шарнира, начинаются от “нижней” поверхности образца и как бы переходят в линии скольжения, распространяющиеся на встречу магистральной трещине [2].

Интенсивная пластическая деформация и большие напряжения в образцах, в которых магистральная трещина (МТр) распространяется поперек поверхности слоев, приводят к существенным отличиям параметров пластического течения и трещинообразования от таковых в образцах, в которых МТр распространяется вдоль волокон. Таким образом, целью настоящей работы явилось изучение влияния направления распространения МТр на механизм разрушения высокочистой высоковязкой стали с слоистой структурой.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследования являлась сталь типа 08Г2Б промышленной выплавки следующего химического состава (мас. %): 0.08 С; ~2 Мп; 0.2 Мо; Σ (Ti-V-Nb) \approx 0.15; 0.004 N; 0.04 Al; 0.004 S; 0.007 Р. Как показано в [4], в исследованной стали в результате контролируемой прокатки и последующего ускоренного охлаждения формируется ультрадисперсная феррито-бейнитная/мартенситная структура с размером зерен 3–6 мкм, где доля продуктов низкотемпературного распада аустенита составляет 15–30%. Особенностью структуры явля-

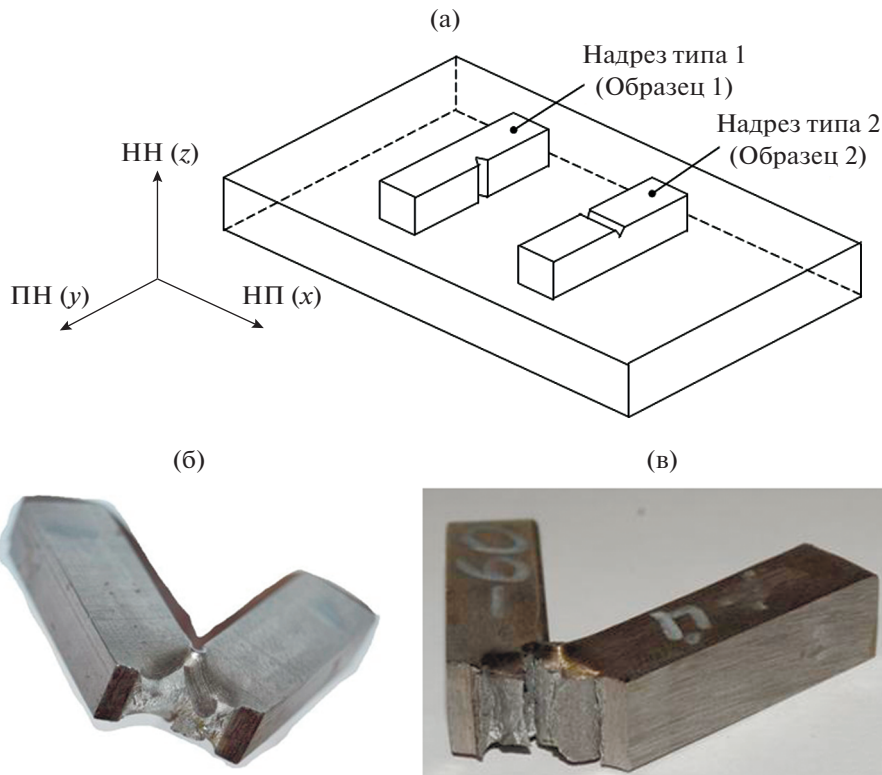


Рис. 1. Схема вырезки образцов для испытаний на ударный изгиб (а); общий вид недоразрушенного образца Шарпи после ударных испытаний, $T_{исп} = -60^{\circ}\text{C}$: с надрезом типа 1 (б); с надрезом типа 2 (в).

ется ярко выраженная полосчатость вдоль направления прокатки. Полосы шириной 3–15 мкм разделены длинными, слегка изогнутыми большеугольными границами.

Образцы Шарпи для испытаний на ударный изгиб вырезались поперек направления прокатки из середины листа; V-образный надрез по типу 2 располагался вдоль направления прокатки перпендикулярно плоскости листа (рис. 1а). Полученные данные по структуре, распределению деформации и механическим свойствам сопоставлялись с таковыми, полученными для образцов с надрезом типа 1. В дальнейшем такие образцы будут соответственно называться образцами 1 (рис. 1б) и 2 (рис. 1в).

Ударное нагружение образцов при температурах от $+20$ до -80°C проводилось на копре с падающим грузом INSTRON CEAST 9350.

Металлографический анализ проводился на разрушенных и недоломаных образцах в среднем сечении ПН(у)-НН(з), перпендикулярном поверхности излома, с использованием светового микроскопа Nikon Epihot 200 при увеличениях от 100 до 500 крат.

Измерения микротвердости пирамидой Викерса при нагрузке 9 Н с регистрацией диаграммы вдавливания проводились на микротвердомере

CSM МНТ. Согласно [5], минимально допустимое расстояние между уколами индентора должно быть не менее трех диагоналей отпечатка. Диагональ отпечатка составляла около 76 мкм. В работе микроидентирование образцов в области сжатия произведено по 11 трассам, расположенным на расстоянии 300 мкм друг от друга, каждая трасса состояла из 10 измерений, расстояние между уколами – 300 мкм. Следовательно, при микроидентировании каждый отпечаток захватывал большое количество зерен, а величина микротвердости достаточно достоверно отражает уровень наклепа локальной области образца.

С целью оценки степени деформации ϵ в локальных областях испытанных образцов было проведено микроидентирование образцов, прокатанных с разными степенями обжатия. Полученная зависимость $HV_{\mu} = f(\epsilon)$ была аппроксимирована линейной функцией

$$HV_{\mu} = 1.3\epsilon + 260. \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показан участок излома образца, расположенный ниже нейтральной линии, и испытывающий при изгибе плавный поворот на угол

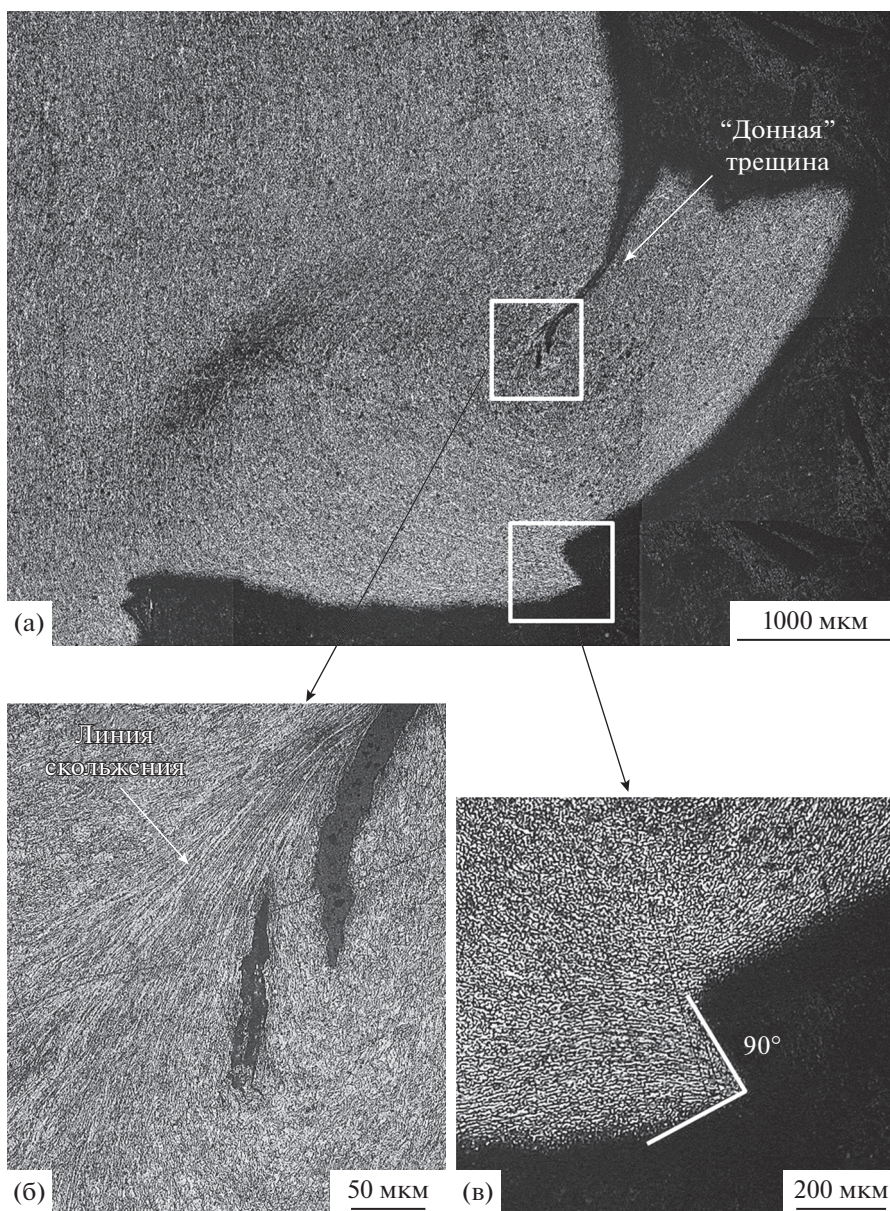


Рис. 2. Профиль и микроструктура зоны долома разрушенного образца 2 ($T_{исп} = -60^{\circ}\text{C}$).

близкий к 90° . На микроуровне поверхность изрезана вследствие раскрытия на ней пор и небольших очаговых трещин. Также на ней имеются периодически расположенные на расстоянии ~ 3 мм почти прямоугольные выступы высотой ~ 200 мкм, происхождение которых можно связать с взаимным смещением присутствующих в структуре слоев при изгибе образца. Это подтверждает направление линий скольжения (рис. 2б): они “вливаются” в выступ, тогда как в других участках они параллельны поверхности. Выступы на поверхности тела, формирующиеся при смещении полос, являются концентраторами напряжений, хотя и более слабыми, чем боковые стороны полос сдвига [3].

Внутри области сжатия имеется сложная система линий скольжения – полос сдвига, которые создают изгиб образца и смещение слоев (рис. 2). Поскольку полосы сдвига распространяются по траектории максимальных касательных напряжений, то их расположение показывает насколько неоднородно по микрообъемам напряженное состояние, как оно меняется при приближении к “донной” поверхности образца.

“Донная” поверхность изгибаемого образца, обладающего повышенной вязкостью, является “источником” многочисленных очаговых трещин (ОчТр) протяженностью в несколько сотен микрон (рис. 2, 3). Согласно ориентировке линий

скольжения, пластическое течение по обе стороны таких трещин происходит в различных системах скольжения (рис. 2в, 3б). В результате несоместности течения возникают локальные внутренние напряжения с нормальной компонентой, вызывающей раскрытие ОчТр. Такие ОчТр, образующиеся при раскрытии полос сдвига, повторяют их изгиб, что позволяет отнести их к смешанной моде II+III. Продвижение ОчТр, в частности, происходит путем разрушения перемычек между возникшими ранее зародышевыми трещинами (рис. 2б), как показано в [2]. Возможно, это типично для любой вязкой криволинейной трещины, имеющей компоненты поперечного (мода II) и продольного (мода III) сдвига.

Сдвиговая деформация при сжатии тела приводит к возникновению нормальных напряжений, способствующих раскрытию и росту трещин сдвига [6]. Этот хорошо иллюстрирует рис. 3, где многочисленные линии скольжения вблизи “нижней” поверхности образца трансформируются в очаговые трещины смешанной моды II+III. Четыре из них попарно окаймляют оси пластических шарниров (ПШ). При функционировании ПШ его ось, оставаясь неподвижной, не деформируется (не наклепывается) [7, 8], что и было обнаружено в образце 1 [2]. В случае образца 2, внутри оси шарнира, особенно в участках, примыкающих к его боковым сторонам, присутствуют многочисленные линии скольжения.

При изгибе крайне вязкого образца деформация внутри ПШ оказалась недостаточной, и в образце 2 возникли два ПШ (рис. 3). Из возможных вариантов функционирования двух ПШ — одновременного, попеременно сменяющегося или очередного, наиболее приемлемым выглядит последний. А именно: когда под действием поля напряжений магистральной трещины работа первого большого пластического шарнира прекращается, изгиб образца продолжается при участии второго меньшего ПШ. Кстати, параметры ПШ 1 (длина окаймляющей его ОчТр $l_{тр} \approx 320$ мкм, ширина в основании $t \approx 300$ мкм) близки к таковым у ПШ в образце 1 [1], тогда как у второго ПШ они меньше ($l_{тр} \approx 200$ мкм, $t \approx 220$ мкм), что позволяет рассматривать его как дополнительный, “включающийся в работу” после первого ПШ.

Интенсивный изгиб образца вызывает выход линии скольжения за пределы осей ПШ. Под действием изгибающих напряжений они стягиваются в плотные жгуты, положение которых на рис. 3 показано стрелками (\leftrightarrow). Здесь формируются уникальные области, имеющие максимальную плотность линий скольжения (их протяженность на единицу площади), и, следовательно, экстремально большую плотность дислокаций. Подобный, наиболее протяженный жгут линий скольжения обнаружен и в образце 1 (в [2] он на-

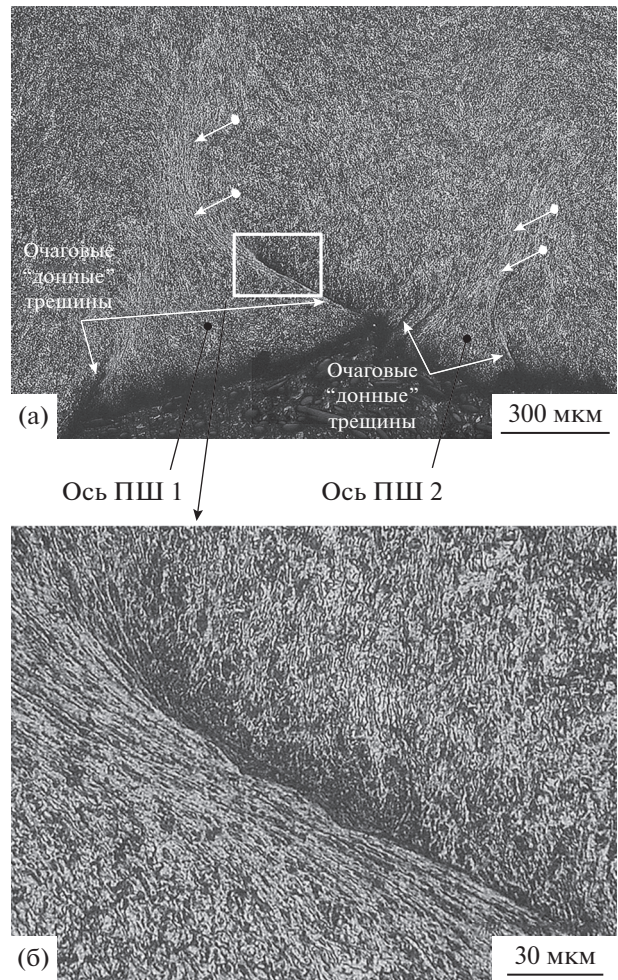
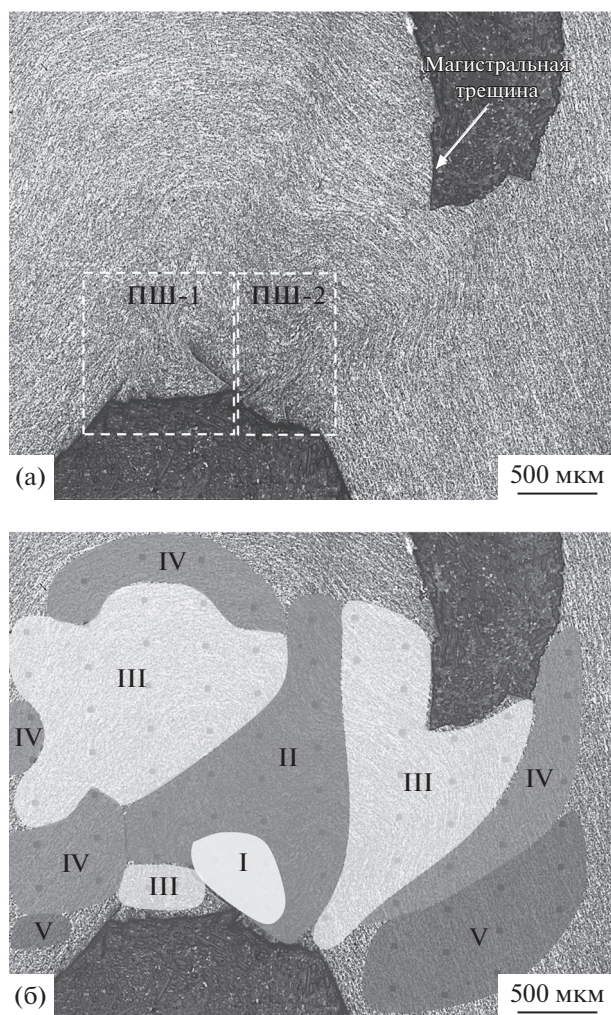


Рис. 3. Область пластических шарниров образца Шарпи с надрезом типа 2.

зван “факелом”), но в сравнении с образцом 2 он имеет меньшую плотность линий скольжения и более удален от “нижней” поверхности образца. В обоих образцах после жгута линии скольжения, приближаясь к магистральной трещине, расходятся.

Вязкая МТр (со своей областью пластической деформации), сформировавшаяся в области растяжения, войдя в зону долома, где раньше было сжатие, вносит свое поле напряжений $\sigma_{МТр}$. Линии скольжения (ЛСк) и возникшие из них ОчТр, образовавшиеся в области сжатия, имеют поле напряжений $\sigma_{ЛСк}$ противоположное по знаку $\sigma_{МТр}$. Поэтому, МТр и распространяющиеся ей навстречу линии скольжения экранируют друг друга, что тормозит их движение.

Пока $\sigma_{МТр} > \sigma_{ЛСк}$, МТр продолжает рост, изменяет свою траекторию, стремясь обогнуть поле $\sigma_{ЛСк}$, а линии скольжения расходятся. При нарастании изгиба образца, когда $\sigma_{ЛСк} \geq \sigma_{МТр}$, магистральная трещина останавливается — образец



- I – 420–500 HV_{μ} ; $\epsilon \geq 136\%$;
 II – 380–420 HV_{μ} ; $\epsilon = 76–135\%$;
 III – 340–380 HV_{μ} ; $\epsilon = 56–75\%$;
 IV – 300–340 HV_{μ} ; $\epsilon = 35–55\%$;
 V – 280–300 HV_{μ} ; $\epsilon = 14–35\%$.

Рис. 4. Микроструктура области сжатия недоломанного образца Шарпи типа 2 (а), карта распределения в ней микротвердости HV_{μ} (степени деформации ϵ , %) (б), $T_{исп} = -60^{\circ}\text{C}$.

остается недоломанным. В сверхвысоковязком образце 2 поле $\sigma_{МТр}$ настолько велико, что магистральную трещину способны остановить поля напряжений только двух ПШ, которые стремятся окружить поле напряжений МТр.

Пластический изгиб, трещинообразование приводят к весьма неоднородному распределению деформации по микрообъемам в зоне долома, что следует из исследования методом микротвердости HV_{μ} . Границы участков, имеющих HV_{μ} в определенном диапазоне значений, приведены

на рис. 4 весьма условно, поскольку повысить точность не позволяют инструментальный фактор – недопустимость близкого расположения уколов – и целесообразность изучения значительного количества трасс. В то же время построенная карта распределения HV_{μ} дает достаточно надежные представления об уровне микротвердости и степени деформации ϵ при пересчете по уравнению (1) в наиболее интересных участках в области сжатия образца. Это в сопоставлении с микроструктурой (рис. 4а) позволяет сделать объективное заключение.

Для выявления особенностей пластического течения и трещинообразования данные по образцу 2 сопоставлены с аналогичными данными для образца 1 (рис. 5а, 5б), приведенными в [2]. При этом для обоих образцов участки с равной HV_{μ} окрашены одинаково.

Из рис. 4а, 4б следует, что сравнительно небольшой по размеру (~ 0.5 мм) участок I с экстремально высокими значениями микротвердости 420–500 HV_{μ} ($\epsilon \geq 136\%$) лежит в области между двумя образовавшимися шарнирами. Стоит отметить, что в образце 1 области с соответствующей микротвердостью отсутствуют.

Участки II (380–420 HV_{μ}) в образце 1 – это области жгутов полос скольжения (рис. 5а), в образце 2 они имеют большую площадь, в которую входят жгуты двух ПШ и область между ними (рис. 4б).

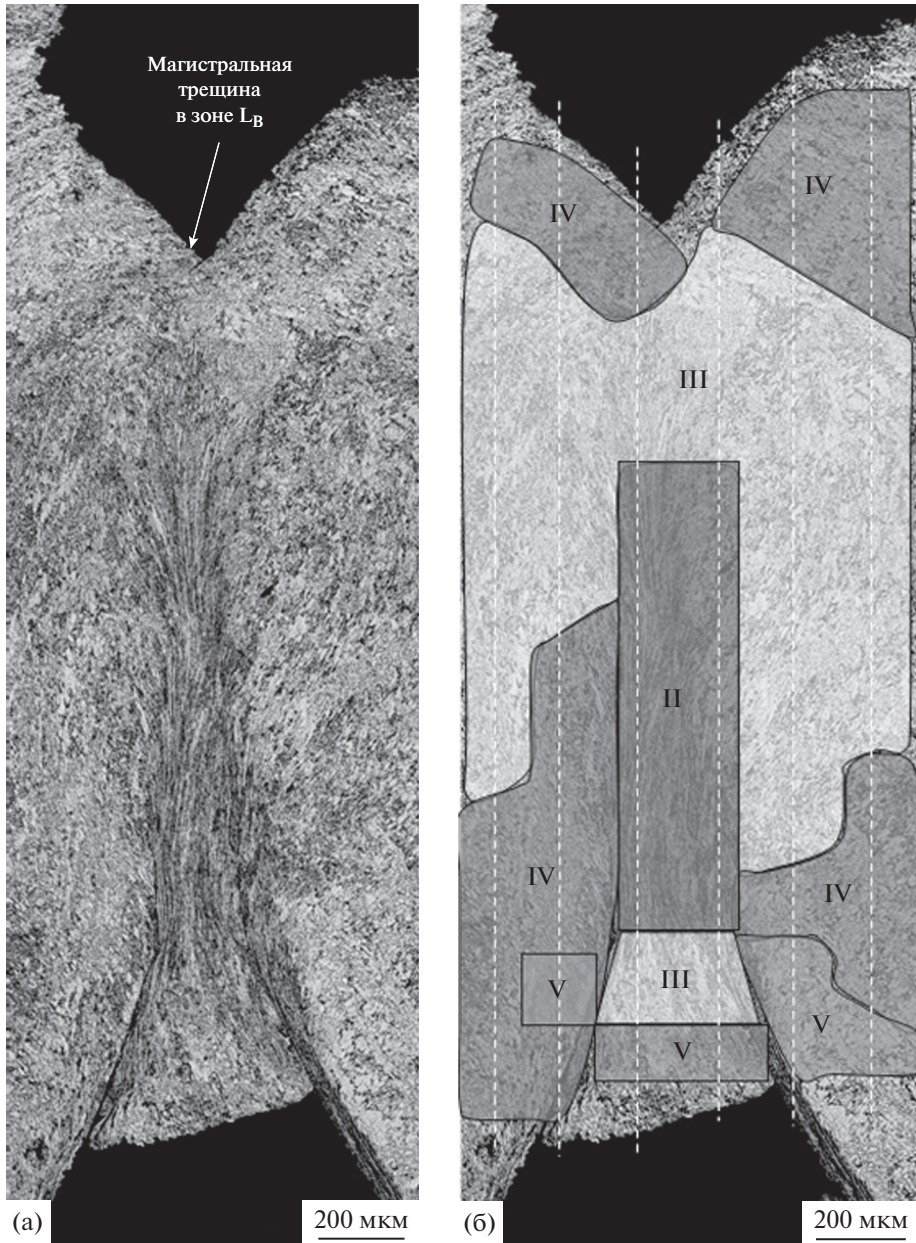
В обоих образцах участки III (340–380 HV_{μ}), во-первых, локально окружают МТр, во-вторых, они смежны с более сильно наклепанными участками II. В образце 2 участок III также занимает еще ось ПШ-1. Площадь участков III в образце 2 заметно больше, чем в образце 1, что отражает общую тенденцию – большую степень деформации в образце 2 (рис. 4б, 5б).

Участки IV (300–340 HV_{μ}) с меньшей микротвердостью в образце 2 располагаются в виде отдельных областей на периферии пластических шарниров.

Участки V (280–300 HV_{μ}) в образце 1 – это ось ПШ и близкие к ней участки вблизи “нижней” поверхности (рис. 5б). В образце 2 участки с такой микротвердостью, соответствующей HV_{μ} образца до ударного изгиба, расположены вдали от области пластических шарниров (рис. 4б).

Итак, из анализа карт распределения микротвердости следует, что в образце 2 в сравнении с образцом 1 большие значения имеют следующие параметры:

- HV_{μ} в аналогичных микрообъемах образцов (в жгутах линий скольжения, в областях, примыкающих к МТр, “нижней” поверхности и др.);
- площадь S высокопрочных участков, например I;



II – 380–420 HV_{μ} ; $\epsilon = 76–135\%$;
 III – 340–380 HV_{μ} ; $\epsilon = 56–75\%$;
 IV – 300–340 HV_{μ} ; $\epsilon = 35–55\%$;
 V – 280–300 HV_{μ} ; $\epsilon = 14–35\%$.

Рис. 5. Микроструктура области сжатия недоломанного образца Шарпи типа 1 (а), карта распределения в ней микро- твердости HV_{μ} (степени деформации ϵ , %) (б), $T_{исп} = -60^{\circ}\text{C}$ [2].

– средняя микротвердость HV_{μ}^{cp} в исследован- ной области сжатия образцов Шарпи, найденная по правилу аддитивности:

$$HV_{\mu}^{(cp)} = (HV_{\mu}^{(I)}S^{(I)} + HV_{\mu}^{(II)}S^{(II)} + HV_{\mu}^{(III)}S^{(III)} + HV_{\mu}^{(IV)}S^{(IV)})/S_{\Sigma}, \quad (2)$$

где HV_{μ}^i и S^i – соответственно, средняя микро- твердость и площадь i -го участка; S_{Σ} – площадь исследованной поверхности образца в области сжатия.

Для образца 2 $HV_{\mu}^{(cp)} \approx 370$ ед. ($\epsilon \approx 86\%$), а в об- разце 1 на 30% меньше, что показывает энергоем-

кость пластического течения в исследованных объемах области сжатия данных образцов.

Из рис. 4, 5 видно, что деформация при изгибе изученных образцов в основном сосредоточена в области полос сдвига, выходящих из пластических шарниров и противостоящих МТр. Сила сопротивления движения МТр, пропорциональна величине наклепа ($HV_{\mu}^{(cp)}$) этих областей и существенно больше в образце 2.

В совокупности, вышеприведенные данные свидетельствуют о существенно большем масштабе пластического течения — накопленной энергии деформации — в области сжатия в образце 2, чем в образце 1, что является откликом на большую деформацию в области растяжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных, полученных при разрушении динамическим изгибом образцов высоковязкой стали 08Г2Б со слоистой структурой, показал, что распространение магистральной трещины (заданное надрезом образца Шарпи) в образцах 2 перпендикулярно к поверхности слоев видоизменяет и интенсифицирует большинство процессов пластической деформации и разрушения по сравнению с аналогичными процессами в образце 1, где магистральная трещина распространяется вдоль слоев. В образце 2 видоизменяются следующие значимые параметры: в области сжатия в результате интенсивного пластического течения возникают два пластических шарнира с осями, содержащими высокую плотность линий скольжения.

Судя по микротвердости в образце 2 резко возрастает наклеп (плотность дислокаций) в локаль-

ных участках — выступах на поверхности разрушения вблизи пластических шарниров, где достигаются экстремально высокие значения (до $500 HV_{\mu}$), и общий наклеп всего образца: средняя микротвердость металла в области сжатия составляет $400 HV_{\mu}$ (в образце 1 — $350 HV_{\mu}$), причем в образце 2 пластическое течение (наклеп) испытывают все участки области сжатия.

Данная работа выполнена в рамках темы “Структура” (№ АААА-А18-118020190116-6) при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект № 18-10-2-39).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
2. Фарбер В.М., Хошинов В.А., Морозова А.Н., Селиванова О.В., Полухина О.Н., Карабаналов М.С. Исследование области долома в образцах Шарпи высоковязкой стали 08Г2Б // МиТОМ. 2018. № 6. С. 11–15.
3. Штремель М.А. Разрушение. Книга 1. Разрушение материала. М.: МИСиС, 2014. 670 с.
4. Фарбер В.М., Хошинов В.А., Беликов С.В., Селиванова О.В., Лежнин Н.В., Морозова А.Н., Карабаналов М.С., Жиликов А.Ю. Расщепления в сталях, испытывавших контролируемую прокатку и последующее ускоренное охлаждение // Физика металлов и металловедение. 2016. № 117. С. 422–436.
5. www.csm-instruments.com Инструкция для прибора The CSM Micro-Hardness tester, 24.07.2018.
6. Штремель М.А. Разрушение. Книга 2. Разрушение структур. М.: МИСиС, 2015. 976 с.
7. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970. 443 с.
8. Hertzberg R.W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. NJ: John Wiley & Sons Inc., 1996. 786 p.