

06.4;06.5

Взаимосвязь структурно-фазового состава с механизмом разрушения высокопрочной строительной стали

© Л.П. Арефьева, В.В. Дука, И.Ю. Забияка

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: valentina.duka.92@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 ноября 2021 г.

В окончательной редакции 18 февраля 2022 г.

Принято к публикации 24 февраля 2022 г.

Методами оптической и сканирующей электронной микроскопии исследована поверхность разрушения образца стали 14Г2, имеющей после специальной термообработки слоистую феррито-мартенситную структуру. Образцы подвергались испытанию на ударный изгиб при отрицательной температуре. Для сравнительного анализа использовался образец этой же стали, имеющий однородную мартенситную структуру. Описаны особенности механизмов разрушения исследуемых образцов.

Ключевые слова: строительная сталь, слоистая структура, поверхность разрушения, вязкохрупкий механизм, ударная вязкость.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.08.52366.19093

Основным требованием к материалу строительных конструкций является высокая конструктивная прочность, под которой понимают сопротивление материала нагрузкам, имеющим место при эксплуатации сооружений (статическим, ударным, циклическим), в том числе в условиях отрицательных температур и агрессивных сред. Показатель ударной вязкости оценивает качество металла (хладноломкость) и отражает процессы, вызывающие его поведение в различных условиях нагружения, в то время как стандартные статические механические характеристики металла в состоянии хладноломкости не меняются [1–5]. Для получения необходимого комплекса физико-механических свойств строительных конструкций возможно использование композиционного материала на основе высокопрочной стали, структура которого сформирована в виде чередующихся слоев феррита и перлита. При этом определяющее влияние на механические свойства данных материалов наряду с прочностью межслойных границ оказывает структурно-фазовый состав композита.

Цель настоящей работы состоит в установлении взаимосвязи структурно-фазового состава с механизмом разрушения композита на основе высокопрочной строительной стали. Объект исследования — доэвтектоидная строительная сталь с содержанием серы и марганца на верхнем уровне марочного состава.

При прокатке такой стали со степенью обжата $\delta \geq 70\%$ с последующим охлаждением в межкритический интервал температур (МКИ) формируется слоистая структура с максимальной длиной упрочняющего волокна [6].

В работе проводилось исследование структуры излома после испытаний на ударный изгиб высокопрочной строительной стали 14Г2, имеющей после специальной обработки структуру естественного феррито-

мартенситного композита. Химический состав полученного материала уточнялся методом оптико-эмиссионной спектроскопии (Q8 MAGELLAN). Металлографический анализ проводился на оптическом микроскопе Zeiss Axio Vert. A1. Объемная доля фаз, полученных после термообработки, определялась с использованием программы цифровой обработки изображений. Испытания на ударный изгиб проводились по стандартным методикам с использованием маятникового копра МК-30 с максимальной высотой подъема маятника и *U*-образным надрезом образца. Измерение микротвердости мартенсита осуществлялось на приборе ПМТ-3, нагрузка на индентор составляла 50 г. Статистическая обработка проводилась методом Стьюдента. Изломы исследовались с помощью бинокулярного микроскопа МБС-9, а их тонкая структура изучалась на двухлучевом сканирующем электронно-ионном микроскопе Zeiss CrossBeam 340 (метод сканирующей электронной микроскопии).

В слоистых композитах на основные показатели механических, физических и эксплуатационных свойств влияют химический состав и количественное соотношение фаз. Соотношение объемных долей феррита и мартенсита, интегральная твердость (по Роквеллу) и микротвердость упрочняющей фазы зависят от температуры закалки из МКИ: с увеличением температуры толщина мартенситного слоя и интегральная твердость увеличиваются, а микротвердость упрочняющей фазы уменьшается. Уточненный химический состав образцов стали 14Г2 соответствует ГОСТ 19281–2014 [7].

На рис. 1, *a, b* представлена микроструктура стали 14Г2 до и после проведения закалки из МКИ. После проведения закалки при температуре 760°C с охлаждением в воде и последующего низкого отпуска при 200°C была получена феррито-мартенситная структура

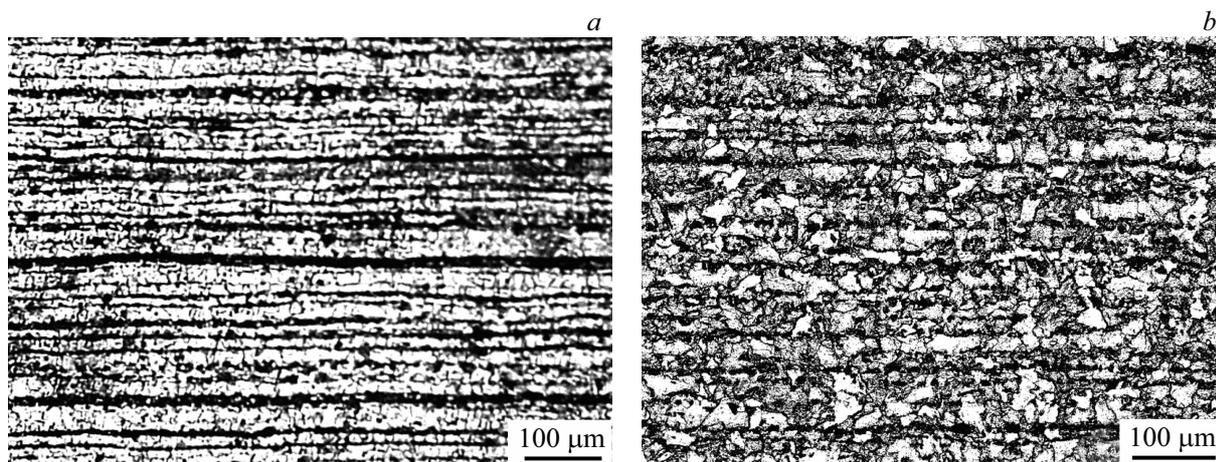


Рис. 1. Микроструктура стали 14Г2. *a* — в горячекатаном состоянии, *b* — после закалки из МКИ.

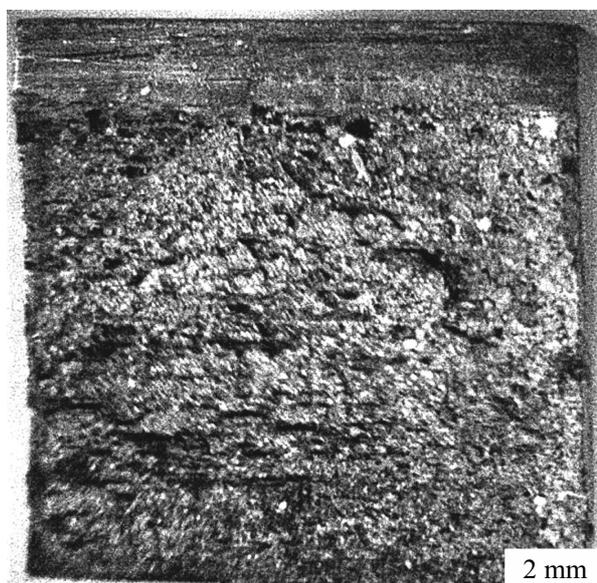


Рис. 2. Излом стали 14Г2 со слоистой феррито-мартенситной структурой после испытаний на ударный изгиб при -70°C .

с объемной долей упрочняющей фазы (мартенсита) $\sim 60\%$ (рис. 1, *b*). Микротвердость мартенсита составляла 652 HV 0.05, феррита — 103.2 HV 0.05.

Испытания на изгиб проводились при температуре -70°C , стабильность которой с точностью до 1°C обеспечивала смесь твердой углекислоты с этиловым спиртом. Композит воспринимал нагрузку перпендикулярно расположению слоев (рис. 2). Для сравнения испытанию подвергался образец из этой же стали, закаленный на мартенситную структуру.

Проведенные испытания на ударный изгиб показали, что образец со слоистой структурой имеет показатели ударной вязкости, в несколько раз превышающие показатели образца с однородной структурой (40 и

25 J/cm^2 соответственно). Это объясняется наличием в композите 40% феррита. Следовательно, предлагаемый композит имеет преимущество по механическим свойствам [8,9].

Анализ макрорельефа излома композита (рис. 2) показал наличие на поверхности разрушения участков с раскрывшейся шиферностью, имеющей слоисто-ступенчатое строение и ориентированной параллельно поверхности деформации, что нехарактерно для излома с однородной структурой. Шиферность возникает благодаря сульфидным включениям, приобретающим при горячей пластической деформации форму строчек.

При анализе излома образца методом сканирующей электронной микроскопии отталкивались от представления о моделях разрушения стали со структурой перлита, так как перлитное зерно представляет собой природный слоистый композит. Проанализированы три области поверхности излома (рис. 3): область устья надреза, центральная часть, периферийная область.

В целом характер разрушения образца вязкохрупкий, о чем свидетельствует наличие на изломе областей вязкого ямочного разрушения (рис. 3, *a*), образованных по механизму слияния микропор, а также отдельных фасеток хрупкого разрушения сколом, образующихся в результате растрескивания мартенситных пластин под действием высоких локальных напряжений. На границе раздела мартенсит-феррит между фасетками внутривязкого скола встречаются перемычки вязкого разрушения (рис. 3, *b*). Размеры фасеток скола соответствуют размерам мартенситных слоев, что коррелирует с данными работ [10–12]. На изломе также видны отдельные вторичные раскрытые трещины, свидетельствующие о растрескивании в направлении, перпендикулярном главной плоскости разрушения (рис. 3, *c*). Выявленные особенности разрушения объясняются соотношением размеров слоев мартенсита и феррита, а также высокой прочностью мартенситной составляющей.

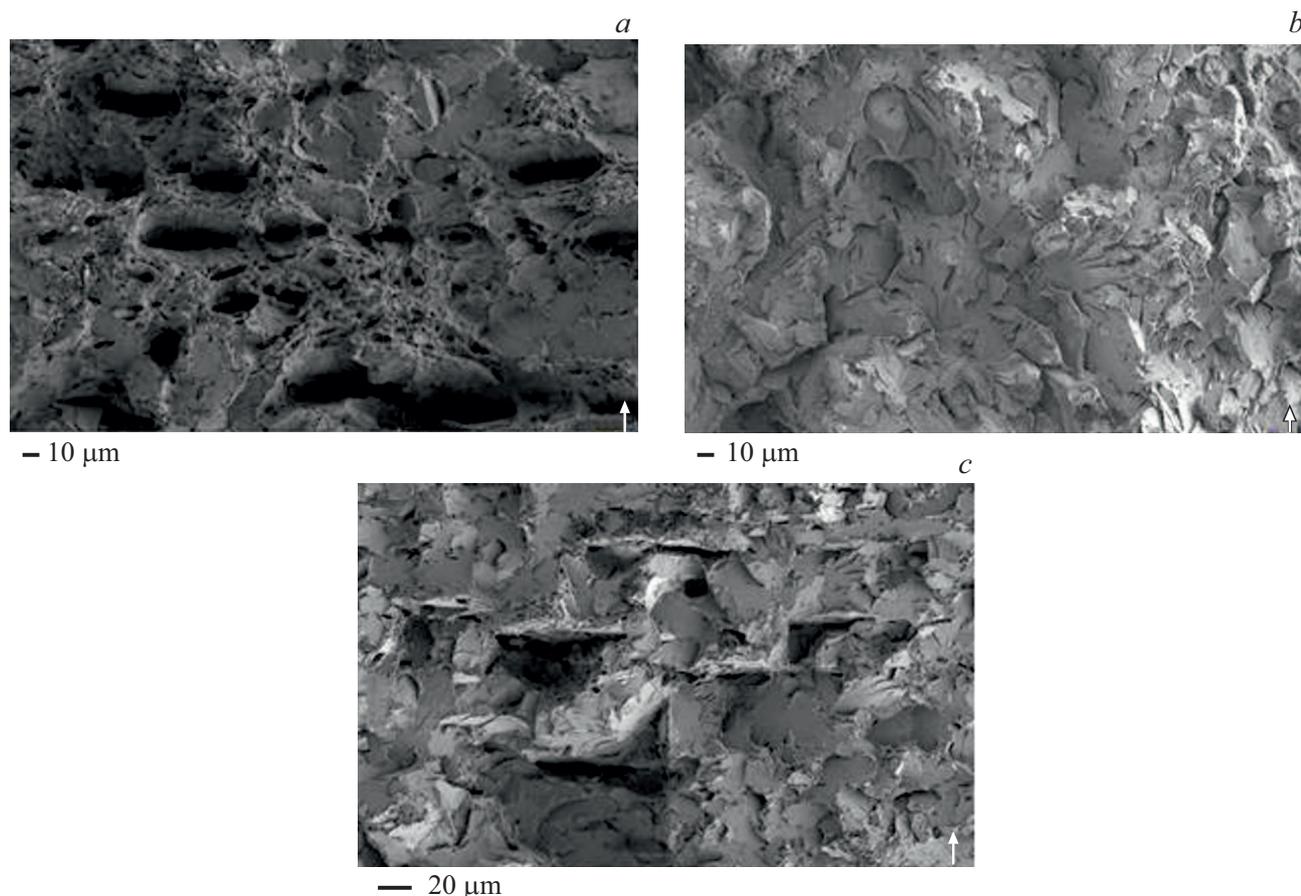


Рис. 3. Электронные микрофотографии поверхности разрушения стали 14Г2 со слоистой структурой (стрелкой обозначено направление приложения нагрузки при испытаниях). *a* — область устья надреза, *b* — центральная часть, *c* — периферийная область.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.М. Чернов, Б.К. Кардашев, К.А. Мороз, *ЖТФ*, **86** (7), 57 (2016). [V.M. Chernov, B.K. Kardashev, K.A. Moroz, *Tech. Phys.*, **61** (7), 1015 (2016). DOI: 10.1134/S1063784216070070].
- [2] С.А. Атрошенко, С.С. Майер, В.И. Смирнов, *ЖТФ*, **91** (9), 1363 (2021). DOI: 10.21883/ЖТФ.2021.09.51215.72-21 [S.A. Atroshenko, S.S. Maier, V.I. Smirnov, *Tech. Phys.* (2022). DOI: 10.1134/S1063784221090024].
- [3] С.А. Атрошенко, А.Ю. Григорьев, Г.Г. Савенков, *ФТТ*, **61** (10), 1738 (2019). DOI: 10.21883/ФТТ.2019.10.48242.476 [S.A. Atroshenko, A.Yu. Grigor'ev, G.G. Savenkov, *Phys. Solid State*, **61** (10), 1690 (2019). DOI: 10.1134/S106378341910007X].
- [4] А.В. Макаров, Р.А. Саврай, В.М. Счастливец, Т.И. Табачникова, Л.Ю. Егорова, *ФММ*, **104** (5), 542 (2007). <https://elibrary.ru/item.asp?id=9553642> [A.V. Makarov, R.A. Savrai, V.M. Schastlivtsev, T.I. Tabatchikova, L.Yu. Egorova, *Phys. Metals Metallogr.*, **104** (5), 522 (2007). DOI: 10.1134/S0031918X07110129].
- [5] С.В. Гладковский, С.В. Кутенева, И.С. Каманцев, С.Н. Сергеев, И.М. Сафаров, *ФММ*, **117** (10), 1105 (2016). DOI: 10.7868/S0015323016100065 [S.V. Gladkovsky, S.V. Kuteneva, I.S. Kamantsev, S.N. Sergeev, I.M. Safarov, *Phys. Metals Metallogr.*, **117** (10), 1070 (2016). DOI: 10.1134/S0031918X16100069].
- [6] В.Н. Пустовойт, Ю.М. Домбровский, А.В. Желева, М.В. Зайцева, *Способ получения естественного феррито-мартенситного композита*, патент RU 2495141 (Донской гос. техн. ун-т, заявл. 11.05.12, опубл. 10.10.13). Бюл. № 28.
- [7] *Прокат повышенной прочности: общие технические условия*, ГОСТ 19281–2014 (Стандартинформ, М., 2015).
- [8] В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев, Ю.М. Домбровский, В.В. Дука, *МиТОМ*, № 6 (780), 15 (2020). [V.N. Pustovoi, Y.V. Dolgachev, Y.M. Dombrovskii, V.V. Duka, *Met. Sci. Heat Treat.*, **62** (5-6), 369 (2020). DOI: 10.1007/s11041-020-00570-9].
- [9] В.В. Дука, Л.Р. Арефева, В.Н. Пустовойт, Д.А. Киселева, Ю.М. Домбровский, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **680** (1), 012023 (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/680/1/012023

- [10] Ю.М. Домбровский, В.В. Мультчин, В.В. Пустовойт, Изв. вузов. Чер. металлургия, № 2, 42 (2008). <https://elibrary.ru/item.asp?id=9942924> [Yu.M. Dombrovskii, V.V. Mul'chin, V.N. Pustovoi, Steel Transl., **38** (2), 105 (2008). DOI: 10.3103/S0967091208020034].
- [11] В.В. Дука, Л.П. Арефьева, В.Н. Пустовойт, Д.А. Киселёва, Письма о материалах, **10** (4), 445 (2020). DOI: 10.22226/2410-3535-2020-4-445-450
- [12] V.V. Duka, L.P. Aref'eva, V.I. Mitrin, V.N. Pustovoi, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., **1029** (1), 012059 (2021). DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012059