

Влияние теплой прокатки на структуру и механические свойства низкоуглеродистой трубной стали

С. Н. Сергеев^{1†}, И. М. Сафаров¹, А. В. Корзников¹, Р. М. Галеев¹,
С. В. Гладковский², Д. А. Двойников²

[†]semen@imsp.ru

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, 450001, Уфа, Россия

²Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская 34, 620049, Екатеринбург, Россия

Исследовано влияние теплой прокатки на структуру и механические свойства низкоуглеродистой малолегированной стали 05Г2МФБ. Теплая прокатка приводит к формированию волокнистой ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры со средним размером зерен/субзерен 0.5 мкм в поперечном сечении и длиной вытянутых зерен/субзерен 20—30 мкм в продольном сечении. Установлено, что формирование УМЗ структуры приводит к повышению предела текучести стали в 1.5 раза по сравнению с мелкозернистой (МЗ) структурой при сохранении требуемой пластичности. Показано, что в стали с УМЗ структурой значение ударной вязкости при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше в 15 раз, чем в исходном МЗ состоянии. Установлено, что в УМЗ состоянии общая работа разрушения при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ повышается за счет увеличения работы распространения трещины по сравнению с исходным МЗ состоянием. Фрактографический анализ поверхности изломов после ударных испытаний при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ показал, что в состоянии после прокатки на поверхности разрушения наблюдается излом смешанного типа, а в исходном состоянии излом полностью относится к хрупкому типу. В обоих состояниях материала на поверхности разрушения при всех температурах испытания наблюдаются трещины-расщепления.

Ключевые слова: ультрамелкозернистая структура, низкоуглеродистая сталь, ударная вязкость, строение излома

The effect of warm rolling on structure and mechanical properties of low carbon pipe steel

S. N. Sergeev¹, I. M. Safarov¹, A. V. Korznikov¹, R. M. Galeyev¹,
S. V. Gladkovsky², D. I. Dvoynikov².

¹Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, 39 Khalturin St., 450001, Ufa, Russia

²Institute of Engineering Science of the Urals Branch RAS, 34 Komsomolskaya St., 620049, Yekaterinburg, Russia

This paper presents results of a research on the effect of warm rolling on structure and mechanical properties of the low-carbon pipe steel. The warm rolling results in formation of anisotropic ultra-fine grained (UFG) structure with average grain/subgrain size 0.5 μm in transverse direction and 20—30 μm along the rolling direction. The formation of ultra-fine grained (UFG) structure leads to 1.5 times increase in strength by comparison to fine-grained (FG) structure keeping the required level of ductility. It is shown that impact strength at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ in UFG steel is 15 times higher than that in initial FG condition. It was established that the total work of fracture at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ increases due to growth of crack propagation distance in comparison to initial (FG) condition. Fractographic analysis of the sample after the test at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ revealed that in the condition after rolling the mixed type of fracture surface is observed, and in the initial condition demonstrates completely brittle fracture. In both conditions of the materials at all temperatures tested appeared areas with the cleavage on the crack surface.

Keywords: ultrafine-grained structure, low carbon steel, impact strength, fracture morphology

Широкое использование низкоуглеродистых малолегированных сталей в районах Крайнего Севера обусловлено их экономичностью и повышенной хладостойко-

стью [1]. Однако существенным недостатком металлов с объёмно-центрированной кристаллической решеткой, а также сталей и сплавов на их основе, является

наличие в них выраженного вязко-хрупкого перехода при понижении температуры эксплуатации, проявляющегося в резком снижении характеристик ударной вязкости. Решение проблемы хладноломкости трубных сталей возможно путем создания новых сталей со сложным микролегированием [2,3], разработки новых многоступенчатых деформационно-термических режимов обработки [4,5] и получения в сталях нанокристаллической и УМЗ структуры [6—10]. Последний способ, то есть получение сталей с нанокристаллической и УМЗ структурой, позволяет не только повысить прочностные свойства, но и понизить порог хладноломкости [7].

В связи с этим представленная работа посвящается исследованию влияния теплой прокатки на структуру и ударную вязкость при низких климатических и криогенных температурах в низкоуглеродистой стали 05Г2МФБ.

Материал и методики эксперимента

Для исследования влияния ультрамелкозернистой структуры на механические свойства была выбрана низкоуглеродистая сталь 05Г2МФБ (Fe-1,65%Mn-0,29%Si-0,07%C-0,08%V-0,05%Nb-0,008%P-0,007%S-0,0022%Mo), специально разработанная для работы в условиях Крайнего Севера [1].

В исходном состоянии полученная горячей ковкой в интервале температур 1100—950 °С с последующим охлаждением с печью структура стали состояла из зерен феррита со средним размером 6±2 мкм и 7 об. % перлита в виде колоний.

Прокатку заготовки прямоугольного сечения проводили на стане МКУ-280 с 4-х валковым калибром за несколько проходов с исходного сечения 20×20 мм до конечного сечения прутков 8×8 мм и ступенчатом понижении температуры с 750 до 550 °С. Накопленная степень деформации рассчитывалась как сумма истинных относительных сужений и составила $\varphi = 2,7$.

Исследования структуры стали после деформации проводились методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на электронном микроскопе «JEOL JEM-2000EX».

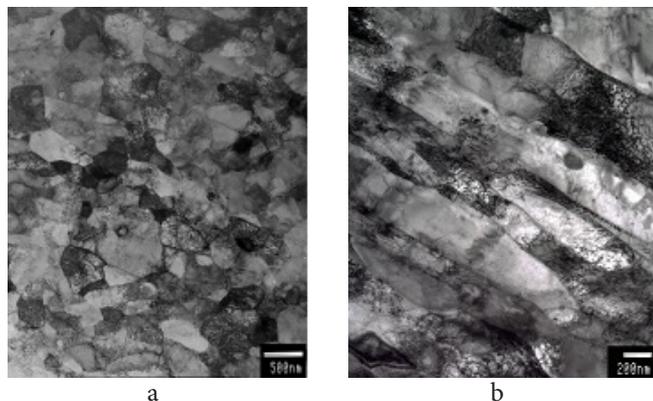


Рис. 1. Микроструктура стали 05Г2МФБ после теплой прокатки: в поперечном сечении (а), в продольном сечении (б).

Fig. 1. Microstructure of 05G2MFB steel subjected to warm rolling: in transverse section (a), in longitudinal section (b).

Механические испытания на растяжение плоских образцов проводили на универсальной испытательной машине «INSTRON-1185» при комнатной температуре с начальной скоростью деформации 10^{-3}с^{-1} по ГОСТ 1497—84.

Испытания на ударный изгиб образцов нестандартного размера 7×7×55 мм с V-образным надрезом глубиной 1,5 мм проводили на инструментированном маятниковом копре «Tinius Olsen IT542M» в интервале температур от 20 °С до -196 °С, входящего в состав оборудования ЦПК «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН». Процедура ударных испытаний регламентировалась требованиями ГОСТ 9454-78 и ГОСТ 22848-77.

Фрактографический анализ поверхности разрушения образцов проводили на растровом электронном микроскопе «TESCAN Vega 3 SBH».

Результаты исследований и их обсуждение

После теплой прокатки в стали 05Г2МФБ формируется анизотропная структура. В поперечном сечении прутка размер зерен/субзерен варьируется от 100 до 800 нм. Присутствуют рекристаллизованные зерна свободные от дефектов, субзерна с выраженной дислокационной структурой внутри. Наблюдаются участки с рыхлыми извилистыми границами свойственные для ячеистой субструктуры. В продольном сечении наблюдается волокнистая зерено-субзеренная структура, длина волокон составила 20—30 мкм. Внутри одного волокна видно чередование участков с повышенной плотностью дислокаций, определенной дислокационной структурой и участков достаточно свободных от дефектов. Электронно-микроскопические исследования показали, что в стали присутствуют как цементит, так и специальные карбиды (рис.1).

Приведенные в таб.1 результаты механических испытаний на одноосное растяжение свидетельствует о том, что формирование волокнистой УМЗ структуры после теплой прокатки позволило не только сохранить пластичность, соответствующую требованию национального стандарта РФ (ГОСТ Р ИСО 3183-2009) для магистральных трубопроводов нефтяной и газовой промышленности (класс прочности K65), но и повысить прочностные характеристики стали 05Г2МФБ.

При проведении серии испытаний на ударный изгиб получены необычные результаты, которые представле-

Таблица 1. Механические характеристики стали 05Г2МФБ
 Table 1. Mechanical characteristics of the 05G2MFB steel

Режим обработки	Исходное МЗ состояние	После прокатки
Treatment conditions	Original FG condition	Rolled
$\sigma_{0,2}$, МПа	520±45	860±65
$\sigma_{\text{в}}$, МПа	620±45	930±65
δ , %	21±2	16±2
ψ , %	57±3	63±3

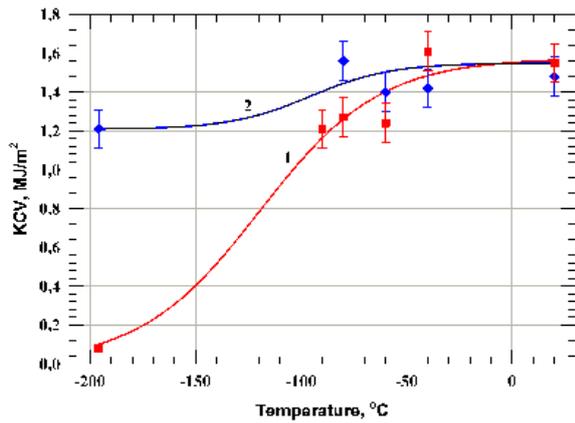


Рис. 2. Температурная зависимость ударной вязкости KCV стали 05Г2МФБ: (1)- исходное МЗ состояние, (2) – УМЗ состояние.

Fig. 2. Temperature dependences of the impact strength KCV of the 05G2MFB steel: (1) original FG condition; (2) UFG condition.

ны на рис.2. Так, с понижением до температуры $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения ударной вязкости в обоих состояниях стали 05Г2МФБ практически не изменяются. Однако с дальнейшим понижением температуры испытаний в исходном состоянии наблюдается типичное снижение ударной вязкости с 1,55 до 0,08 МДж/м², что сопровождается сменой механизма разрушения с вязкого на хрупкий. В состоянии с УМЗ структурой реализуется совсем другой эффект. При температуре испытания $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение ударной вязкости остается на том же уровне, что и при более высоких температурах, т. е. $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина ударной вязкости снижается всего лишь на 20% от её значения при комнатной температуре.

Более детальный анализ и обработка диаграмм ударного нагружения по ГОСТ 22848—77 позволили разделить общую работу разрушения образцов на составляю-

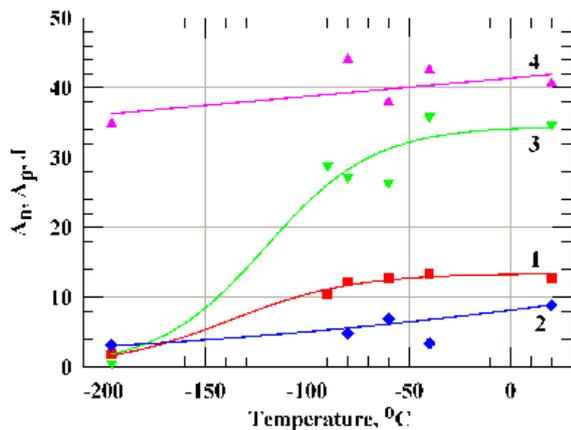


Рис. 3. Температурная зависимость A_n и A_p стали 05Г2МФБ: (1) - значения A_n в исходном МЗ состоянии; (2) – значения A_n после теплой прокатки в УМЗ состоянии; (3) - значения A_p в исходном МЗ состоянии; (4) – значения A_p после теплой прокатки в УМЗ состоянии.

Fig. 3. Temperature dependences of the crack nucleation work (A_n) and crack propagation work (A_p) for the 05G2MFB steel: (1) A_n for initial state of FG steel; (2) A_n for warm rolled UFG steel; (3) A_p for initial state of FG steel; (4) A_p for warm rolled UFG steel.

щие — работу на зарождение трещины (A_n) и работу на ее распространение (A_p), а также построить зависимости работы зарождения и распространения трещины от температуры испытаний (рис.3). Из рис.3 видно, что для стали 05Г2МФБ в МЗ состоянии с пластинчатым цементитом при температурах испытания ниже $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдалось плавное понижение работы зарождения и распространения трещины. В то время как при температуре жидкого азота происходит резкое снижение значений A_n и A_p до минимальных значений. Полученные результаты полностью согласуются с современными представлениями о природе вязко-хрупкого перехода.

В состоянии с УМЗ структурой плавное снижение A_n и A_p наблюдается во всем температурном интервале исследования, минимальные значения составили 1,5 и 36 Дж соответственно. Следует отметить, что разница между значениями A_p и A_n в мелкозернистом состоянии меньше (30 Дж), чем в УМЗ состоянии (40 Дж) при комнатной температуре. С понижением температуры в УМЗ состоянии эта разница остается постоянной, а в исходном состоянии — она снижается за счет более быстрого уменьшения величины работы распространения трещины. Повышение A_p в стали с волокнистой УМЗ структурой связано с наличием большего количества эффективных барьеров (границ зерен) и повышенной плотностью дислокации по сравнению с МЗ структурой. Особенно эффективно затрудняется распространение трещины за счет множественного торможения магистральной трещины на продольных границах [7]. Трещина, распространяясь вдоль продольных границ, переходит из трещины нормального разрыва в трещину поперечного сдвига. Поскольку вязкость разрушения сдвигом, как правило, выше вязкости разрушения отрывом, то на расщепление расходуется больше энергии.

Фрактографический анализ поверхности разрушения показал, что для данной стали характерно наличие расщеплений изломов, как в МЗ, так и в УМЗ состоянии. Из приведенных фрактограмм видно, что в стали с МЗ структурой наблюдается полностью хрупкий излом, характеризующийся наличием фасеток квазискола (рис.4а).

На поверхности излома стали, находящейся в УМЗ

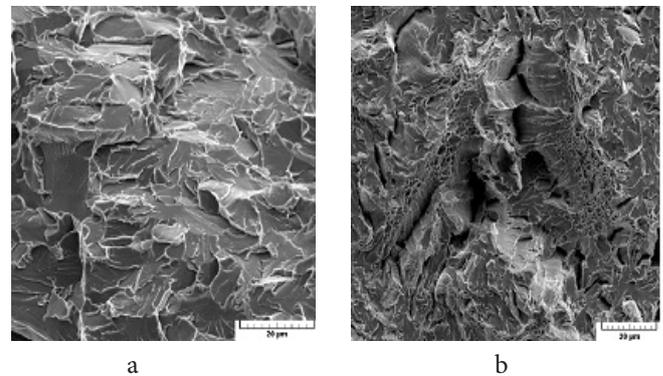


Рис. 4. Фрактограммы изломов образцов стали 05Г2МФБ, испытанных при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$: (а) с МЗ структурой; (б) с УМЗ структурой.

Fig. 4. Fracture patterns of the 05G2MFB steel specimens, tested at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) FG condition; (b) UFG condition.

состоянии, напротив, наблюдается значительное количество трещин-расщеплений различной длины (рис.4б). При этом излом ударного образца относится к смешанному типу, в котором одновременно присутствуют мелкие вязкие ямки и элементы хрупкого разрушения.

Таким образом, формирование УМЗ структуры волокнистого типа в низкоуглеродистой стали 05Г2МФБ способствует сохранению преимущественно вязкого механизма разрушения и высоких значений ударной вязкости и ее составляющих при температуре -196°C .

Выводы

1. Теплая прокатка низкоуглеродистой стали 05Г2МФБ приводит к формированию волокнистой УМЗ структуры со средним поперечным размером зерен/субзерен 0,5 мкм и длиной волокон 20-30 мкм.

2. Сталь 05Г2МФБ с волокнистой УМЗ структурой при комнатной температуре отличается более высокой прочностью, удовлетворительным уровнем пластичности и ударной вязкости в сравнении с исходным МЗ состоянием.

3. При понижении температуры испытаний до -196°C в стали с МЗ структурой происходят резкое снижение характеристик ударной вязкости и смена механизма разрушения от вязкого к хрупкому, в то время как формирование УМЗ структуры способствует сохранению повышенного уровня сопротивления низкоуглеродистой трубной стали хрупкому разрушению вплоть до криогенных температур.

Литература / References

1. Yu. I. Matrosov, D. A. Litvinenko, and S. A. Golovanenko, Steel for Main Pipelines. (in Russian) [Ю.И. Матросов, Д.А. Литвиненко, С.А. Голованенко. Сталь для магистральных трубопроводов. М. Металлургия, 1989. — 288с.]
2. I. Yu. Pyshmintsev, A. M. Maltseva, M. A. Smirnov, A. V. Korznikov. Steel. **2**, 75—81 (2011) (in Russian) [И.Ю. Пышминцев, А.М. Мальцева, А.М. Гервасьев, М.А. Смирнов, А.В. Корзников. Сталь. **2**, 75—81 (2011).]
3. V. M. Schastlivtsev, T. I. Tabatchikova, I. L. Yakovleva, S. Y. Klyueva, A. A. Kruglova, E. I. Khlusova, V. V. Orlov. Phys. Met. Metallogr. **113** (5), 507—516 (2012). (in Russian) [В.М. Счастливец, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, С.Ю. Ключева, А.А. Круглова, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов. Физика металлов и металловедение. **113** (5), 507—516 (2012).]
4. I. V. Gorynin, V. V. Rybin, V. V. Malyshevsky, E. I. Khlusova, E. V. Nesterova, V. V. Orlov, G. Yu. Kalinin. The questions of materials science. **2**, 7—19 (2008). (in Russian) [И.В. Горьнин, В.В. Рыбин, В.А. Мальшевский, Е.И. Хлусова, Е.В. Нестерова, В.В. Орлов, Г.Ю. Калинин. Вопросы материаловедения. **2**, 7—19 (2008).]
5. V. V. Rybin, V. V. Malyshevsky, E. I. Khlusova, V. V. Orlov, Y. Kh. Shakhpazov, Iu. D. Morozov, S. Yu. Nastich, M. Yu. Matrosov. The questions of materials science. **3**, 127—137 (2009). (in Russian) [В.В. Рыбин, В.А. Мальшевский, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов, Е.Х. Шахпазов, Ю.Д. Морозов, С.Ю. Настич, М.Ю. Матросов. Вопросы материаловедения. **3**, 127—137 (2009).]
6. I. M. Safarov, A. V. Korznikov, S. N. Sergeev, S. V. Gladkovskii, E. M. Borodin. Phys. Met. Metallogr. **113** (10), 1055—1060 (2012).] (in Russian) [И.М. Сафаров, А.В. Корзников, С.Н. Сергеев, С.В. Гладковский, Е.М. Бородин. Физика металлов и металловедение. **113** (10), 1055—1060 (2012).]
7. I. M. Safarov, A. V. Korznikov, R. M. Galeev, S. N. Sergeev, S. V. Gladkovskii, E. M. Borodin. I. Yu. Pyshmintsev. Phys. Met. Metallogr. **115** (3), 315—323 (2014). (in Russian) [И.М. Сафаров, А.В. Корзников, Р.М. Галеев, С.Н. Сергеев, С.В. Гладковский, Е.М. Бородин, И.Ю. Пышминцев. Физика металлов и металловедение. **115** (3), 315—323 (2014).]
8. S. N. Sergeev, I. M. Safarov, A. V. Korznikov, R. M. Galeev, S. V. Gladkovskii, E. M. Borodin. Letters on Materials. **2** (3), 117—120 (2012). (in Russian) [С.Н. Сергеев, И.М. Сафаров, А.В. Корзников, Р.М. Галеев, С.В. Гладковский, Е.М. Бородин. Письма о материалах, **2** (3), 117—120 (2012).]
9. E. G. Astafurova, G. G. Zakharova, E. V. Naydenkin, G. I. Raab, S. V. Dobatkin. Phys. Met. Metallogr. **111** (1), 64—73 (2011). (in Russian) [Е.Г. Астафурова, Г.Г. Захарова, Е.В. Найденкин, Г.И. Рааб, С.В. Добаткин. Физика металлов и металловедение. **111** (1), 64—73 (2011).]
10. I. M. Safarov, S. N. Sergeev, A. V. Korznikov, R. M. Galeev, S. V. Gladkovskii. Letters on Materials. **3** (1), 3—6 (2013). (in Russian) [И.М. Сафаров, С.Н. Сергеев, А.В. Корзников, Р.М. Галеев, С.В. Гладковский. Письма о материалах, **3** (1), 3—6 (2013).]