



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СКЛОННОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ К СЛОИСТО-ВЯЗКИМ И СЛОИСТО-ХРУПКИМ РАЗРУШЕНИЯМ

А. В. БЕРНАЦКИЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изложены возможности определения относительного сужения φ_z и ударной вязкости KCV_z по результатам испытаний стандартных образцов, расположенных поперек направления прокатки в плоскости листа. Введено дополнительное понятие — коэффициент слоистого растрескивания, — которое представляет собой отношение KCV_z^{max} и KCV_z^{min} во всем диапазоне переходных температур.

Ключевые слова: низкоуглеродистые, низколегированные стали, анизотропия механических свойств, относительное сужение, ударная вязкость, слоисто-вязкое, слоисто-хрупкое разрушения

По результатам экспертных оценок разрушившихся сварных соединений, узлов и конструкций, а также лабораторных исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона, установлено, что анизотропия характеристик вязкости и пластичности металлопроката оказывает существенное влияние не только на технологическую прочность сварных соединений, но и на эксплуатационную надежность и долговечность сварных конструкций вследствие образования слоисто-вязких и слоисто-хрупких трещин [1–3].

Отсутствие в отечественной практике (до конца 1990-х гг.) методов испытания стального проката в направлении толщины не позволяло даже ориентировочно судить о его пригодности для бездефектного изготовления и эксплуатации сварных конструкций, а также сдерживало выпуск сталей с нормируемыми характеристиками относительного сужения φ_z , что предопределило разработку ГОСТ 28870–90.

Основная проблема заключалась в необходимости создания отдельного документа по регламентированию допускаемой анизотропии характеристик пластичности и трещиностойкости металлопроката, включая ударную вязкость с тем, чтобы обеспечивалась сопротивляемость сварных соединений не только слоисто-вязким разрушениям при сварке, но и слоисто-хрупким при эксплуатации.

Важным критерием оценки склонности металлопроката к слоисто-вязким разрушениям является относительное сужение φ_z [4–6].

По данным зарубежных и отечественных исследователей, слоистые трещины при сварке металлоконструкций возникают при $\varphi_z < 15\%$ и практически исключаются при $\varphi_z > 25\%$ [7, 8].

Немецкие исследователи разработали балльную систему оценки различных факторов для установ-

ления требуемых значений φ_z металлопроката, которая, по мнению автора настоящей статьи, содержит некоторые не вполне корректные положения, а также утверждения дискуссионного характера. Сам подход, конкретизирующий оценку вклада различных факторов в сопротивляемость узлов и сварных соединений слоистым разрушениям с инженерной точки зрения представляет несомненный интерес. Вместе с тем требования потребителя к поставляемому металлопрокату, очевидно, должны иметь более конкретный характер.

В соответствии с разработанным ранее ГОСТ 28870–90 «Сталь. Методы испытания на растяжение толстолистового проката в направлении толщины» в зависимости от относительного сужения φ_z листовой прокат классифицируется по группам качества, обозначаемым как Z15, Z25, Z35 (табл. 1).

Группа качества Z15 является низшей, а стали, входящие в нее, непригодны для использования в конструкциях или узлах, где вероятно возникновение растягивающих усилий в направлении толщины листа. Считается, что в конструкциях, изготовленных из листового проката группы качества Z35, не могут возникать слоисто-вязкие трещины. К промежуточной группе качества Z25 относятся стали, используемые в неотчетственных сварных узлах или конструкциях.

Рекомендовано фиксировать временное сопротивление σ_b^z и предел текучести σ_t^z в случаях граничных значений относительного сужения φ_z между группами качества Z15 и Z25 (рис. 1).

Таблица 1. Классификация листового проката в зависимости от относительного сужения

Группа качества	Значения относительного сужения φ_z , не менее, %	
	средние по результатам испытаний трех образцов	отдельные
Z15	15	10
Z25	25	15
Z35	35	25

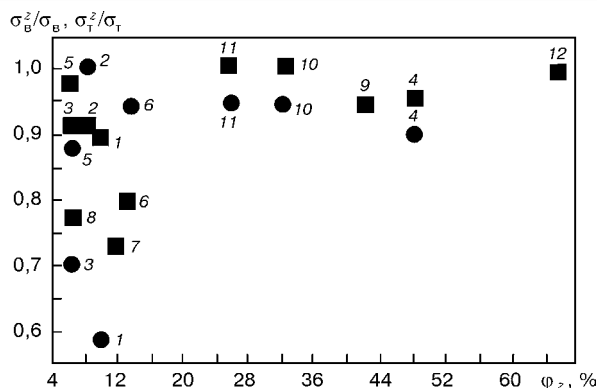


Рис. 1. Зависимость соотношения прочностных характеристик испытываемых образцов (σ_b^z/σ_b и σ_t^z/σ_t) от относительного сужения ϕ_z в направлении толщины (средние значения): 1 – Ст3, толщиной 70 мм; 2 – 16Г2АФ, 20; 3 – 16Г2АФ, 40; 4 – 14Г2АФ, 40; 5 – 14Г2АФ, 40; 6 – 14Г2АФ, 36; 7 – 14Г2АФ, 36; 8 – 16Г2АФ, 40; 9 – 16Г2АФ-Ш, 40; 10 – 09Г2С, 15; 11 – 14Г2АФ, 50; 12 – 12ХГДАФ, 50 мм; ● – σ_b^z/σ_b ; ■ – σ_t^z/σ_t

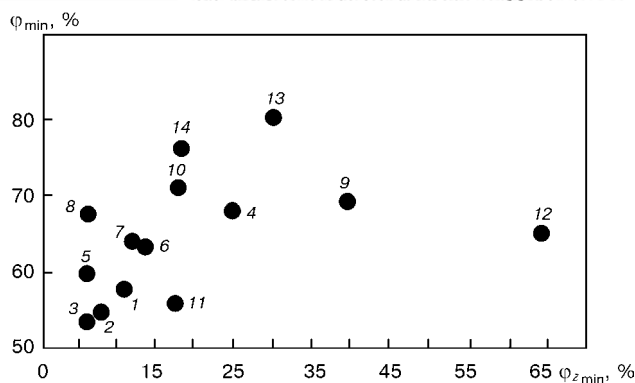


Рис. 2. Зависимость относительного сужения в направлении толщины ϕ_{min} от относительного сужения в плоскости прокатки $\phi_{z\ min}$. Обозначения поз. 1–12 здесь и на рис. 4, как на рис. 1; 13 – 09Г2С-Ш, 50; 14 – 09Г2С, 35 мм

С инженерной точки зрения, было заманчиво разработать механизм определения относительного сужения ϕ_z по результатам испытаний стандартных образцов, расположенных в плоскости листа ϕ . Используя результаты испытаний низкоуглеродистых и низколегированных сталей, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона, можно построить графическую зависимость ϕ_{min} от $\phi_{z\ min}$ (рис. 2).

С помощью полученной зависимости по относительному сужению $\phi < 60\%$ можно определить принадлежность испытываемой марки стали к группе качества Z15 (табл. 1), а в ряде случаев ($\phi > 60\%$) к Z25 и Z35.

Другими словами, по результатам сдаточных испытаний на растяжение в условиях массового производства строительных и конструкционных сталей можно приближенно оценивать склонность стального листа и его сварных соединений к слоисто-вязким разрушениям.

Как отмечается в работе [3], определение ϕ_z является необходимым, но недостаточным условием для оценки склонности листа или сварного соединения к слоисто-вязким и особенно к слоисто-хрупким разрушениям. Так, в ряде случаев удовлетворительные значения ϕ_z не всегда соответствуют необходимому уровню трещиностойкости металла в вязком и особенно в хрупком состоянии.

В табл. 2, 3 и на рис. 3 приведены результаты испытаний на растяжение и ударный изгиб стали марки 09Г2С толщиной 15 мм.

Таблица 2. Результаты механических испытаний на растяжение стали марки 09Г2С толщиной 15 мм

Расположение образцов	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ϕ , %
Поперек направления прокатки	352...360	482...509	34...40	71...75
	356	495,5	36	73
Направление Z	359...381	465...475	18...33	24...40
	370	470	25,5	32

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4 в числителе указан разбег значений, в знаменателе – среднее значение.

Вопреки предварительным прогнозам, основанным на значениях относительного сужения в направлении толщины $\phi_z = 24...40\%$, ударная вязкость KCV_z (рис. 3, кривая 3а), оказалась недопустимо низкой во всем диапазоне температур. Следует отметить, что ударные образцы с надрезом, расположенным в направлении толщины (2а) и «с поверхности листа» (2б), также показали весьма невысокие значения ударной вязкости, что указывает на возможность развития разрушений, в том числе с поверхности листа. В дальнейшем этот показатель (условно KCV_B) может быть использован для получения дополнительной информации.

Использование образцов для испытаний на ударную вязкость металлопроката в направлении толщины (3а) было рекомендовано в проекте стандарта. Это встретило категорические возражения

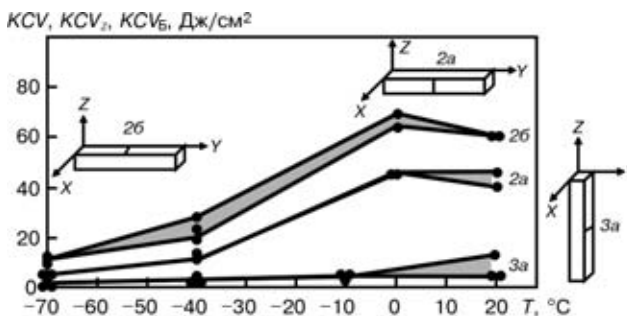


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости KCV , KCV_z , KCV_B от температуры для образцов 2а, 2б и 3а стали марки 09Г2С

Таблица 3. Результаты механических испытаний на ударный изгиб стали марки 09Г2С толщиной 15 мм

Расположение образцов и надрезов	Испытания на ударный изгиб, Дж/см ² , при T, °C			
	-70	-40	0	+20
2а, KCV	4	10...11 10,5	45	41...45 43
2б, KCV_B	9...10 10,5	20...27 23,5	65...69 67	60
3а, KCV_z	1...2 1,3	2,5...4,0 3	3...4 3,6	4...12 6,6

Примечание. Расположение образцов относительно направления прокатки показано на рис. 3.



Таблица 4. Результаты механических испытаний на растяжение стали типа X57 толщиной 24 мм

Расположение образцов	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ϕ , %
Поперек направления прокатки	471,5...457,7	574,2...579,7	25,3...29,3	62,0...64,0
	462,3	576,6	26,6	63,3
Направление Z	452,1...457,2	566,0...571,1	21,0...23,3	50,0...57,0
	453,8	568,6	21,7	52,3

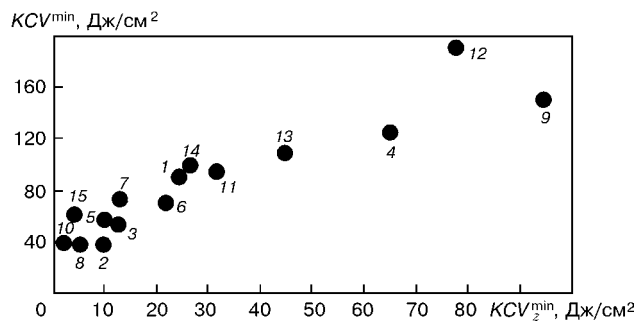


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости в направлении толщины KCV_z^{min} от ударной вязкости в плоскости прокатки KCV_r^{min} : 13 – 09Г2С-Ш, 50; 14 – 09Г2С, 35; 15 – 17Г1С, 15 мм

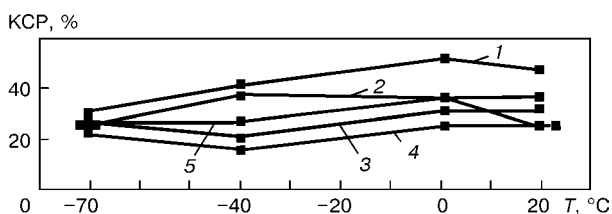


Рис. 5. Зависимость КСР для сталей со слаборазвитой кристаллографической текстурой от температуры: 1 – 14Г2АФ, 40 мм; 2 – 14Г2АФ, 35; 3 – 09Г2С-Ш, 50; 4 – 14Г2АФ, 35; 5 – 16Г2АФ, 20 мм

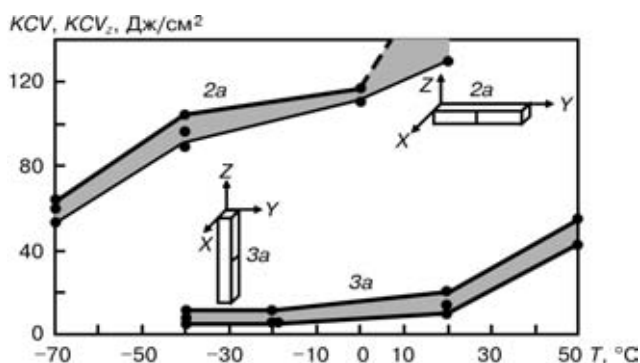


Рис. 6. Зависимость ударной вязкости KCV и KCV_z для образцов 2а, 3а стали типа X57 от температуры

Таблица 5. Результаты механических испытаний на ударный изгиб стали марки X57 толщиной 24 мм

Расположение образцов и надрезов	Испытания на ударный изгиб, Дж/см ² , при T, °C					
	-70	-40	-20	0	+20	+50
2а, KCV	$\frac{55,0...61,0}{54,5}$	$\frac{91,0...105,0}{96,6}$	—	$\frac{111,0...114,0}{112,3}$	$\frac{325,0...124,0}{189,0}$	—
3а, KCV_z	—	$\frac{5,0...10,0}{7,3}$	$\frac{4...10}{6}$	—	$\frac{20,0...9,0}{15,5}$	$\frac{42,0...55,0}{48,5}$

со стороны представителей металлургической промышленности из-за невозможности изготовления сварных крестовых образцов в условиях массового производства на металлургических заводах и трудностями, связанными с обеспечением достаточной ударной вязкости в направлении Z. По этим причинам испытания на ударный изгиб не были включены в ГОСТ 28870–90.

Такое решение не обеспечивает непосредственной оценки сопротивления сталей слоисто-хрупким разрушениям. Была предпринята попытка по результатам испытаний на ударный изгиб стандартных образцов, расположенных поперек направления прокатки в плоскости листа (2а), оценить склонность сталей к образованию слоисто-вязких и особенно слоисто-хрупких разрушений.

Основная идея, подтвержденная многочисленными испытаниями, заключается в том, что у сталей, имеющих слабовыраженную кристаллографическую текстуру прокатки, анизотропия переходной температуры практически отсутствует. Иными словами, значение KCV_z снижается по отношению к значениям KCV на верхнем «шельфе» температурной зависимости ударной вязкости, что предопределяет ее соответствующее уменьшение в диапазоне переходных температур. При этом переходная температура, определенная по доле вязкой составляющей в изломах, в обоих случаях остается одинаковой.

На рис. 4 показана зависимость между минимальными значениями KCV_z и KCV для исследуемых марок сталей на «верхнем шельфе».

По ударной вязкости KCV , определенной в результате испытаний стандартных образцов, расположенных поперек направления прокатки в плоскости листа, можно лишь приблизительно оценивать минимальные значения KCV_z в условиях вязкого состояния металла.

На рис. 5 показан коэффициент слоистого расщепления (КСР), представляющий собой отношение KCV_z^{max}/KCV^{max} во всем диапазоне переходных температур для ряда исследуемых сталей.

Для сталей, поставляемых в горячекатаном состоянии, значения КСР, подтверждающие отсутствие ярко выраженной анизотропии переходных температур, показаны на рис. 5.

При исследовании механических свойств стали контролируемой прокатки (X57) толщиной 24 мм было установлено (табл. 4, 5), что сталь отличается изотропностью характеристик пластичности в плоскости прокатки и направлении Z (относительное сужение $\phi_z = 50...57\%$ практически сопоставимо с относительным сужением $\phi = 62...64\%$).

Другие показатели прочности и пластичности, полученные при испытании образцов, вырезанных в направлении Z, также практически соответствуют аналогичным показателям, полученным

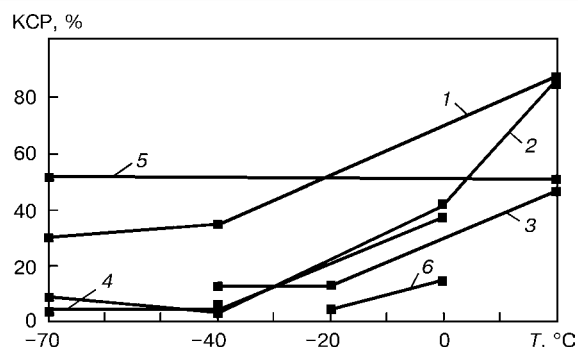


Рис. 7. Зависимость КСР для сталей контролируемой прокатки с развитой кристаллографической текстурой от температуры: 1-4 — 09Г2С с различной температурой конца прокатки; 5 — типа Х70; 6 — типа Х57

при испытании образцов, вырезанных в плоскости листа.

Вместе с тем сталь марки Х57 характеризуется повышенной склонностью к слоисто-хрупким разрушениям даже при положительных температурах (рис. 6). Так, при $T = +20\text{ }^\circ\text{C}$ значения KCV_z составляют 9...20, а при отрицательных температурах испытания — 4...10 Дж/см².

В отличие от сталей со слабо развитой кристаллографической текстурой, стали контролируемой прокатки имеют существенно различающиеся значения КСР (рис. 7), что свидетельствует о наличии анизотропии переходных температур.

В последнем случае судить о склонности металлопроката к слоисто-хрупким разрушениям по значениям KCV не представляется возможным.

Таким образом, для сталей контролируемой прокатки необходимы прямые испытания с определением значения KCV_z при эксплуатации в условиях минимальной температуры.

Выводы

1. Установлено, что по результатам испытаний стандартных образцов на растяжение, расположен-

ных поперек направления прокатки в плоскости листа ϕ , можно приближенно оценить склонность ряда низкоуглеродистых и низколегированных сталей со слабо развитой кристаллографической текстурой к возникновению слоисто-вязких трещин.

2. По результатам испытаний на ударный изгиб KCV_z^{\max} стандартных образцов, расположенных поперек направления прокатки в плоскости листа, можно приближенно определить значения KCV_z^{\max} и температуру перехода металла в хрупкое состояние.

3. Для оценки склонности сталей контролируемой прокатки к слоисто-вязким и слоисто-хрупким разрушениям необходимы прямые испытания образцов, расположенных в направлении толщины листа, на ударный изгиб KCV_z .

1. Гиренко В. С., Бернацкий А. В., Рабкина М. Д. Слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений // Пробл. прочности. — 1987. — № 3. — С. 70-76.
2. Статическая прочность крестообразных сварных соединений при низких температурах / В. С. Гиренко, А. В. Бернацкий, В. М. Козачек, В. П. Дядин // Автомат. сварка. — 1990. — № 2. — С. 28-32.
3. Бернацкий А. В. Влияние анизотропии механических свойств металлопроката на возникновение и развитие слоисто-вязких разрушений // Там же. — 2000. — № 7. — С. 32-38.
4. Новиков В. И., Гиренко В. С., Бернацкий А. В. Анизотропия свойств металлопроката и работоспособность сварных конструкций // Там же. — 1985. — № 12. — С. 13-19.
5. Granstrom A. The relevance of test methods for lamellar tearing of steel structures. — S. l., [1976]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-948-76).
6. Schonheer W. Metallurgical and constructional measures for the prevention of lamellar tearing in welded structures. — S. l., [1979]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-II 42-79).
7. Lombardini J. Evaluation of lamellar tearing in the structural steel. — S. l., [1979]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-1138-79).
8. Schonheer W. ψ -th value as criterion for judging the lamellar tearing tendency of steel structures. — S. l., [1978]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1080-78).

The paper sets forth the possibilities for determination of relative reduction in area ϕ_z and KVC_z , based on the results of testing standard samples, cut out across the direction of rolling in the sheet plane. An additional notion of lamellar cracking coefficient is introduced, which is a ratio of $KCV_z^{\max} : KCV^{\max}$ in the entire range of transition temperatures.

Поступила в редакцию 25.01.2003