

ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ К СЛОИСТЫМ РАЗРУШЕНИЯМ. РАЗВИТИЕ НОВЫХ ПОДХОДОВ

А. В. БЕРНАЦКИЙ, научн. сотр., Р. И. ДМИТРИЕНКО, вед. инж.,
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изложены возможности определения величины ударной вязкости KCV_z с помощью корреляционных зависимостей между величинами ударной вязкости KCV и KCV_z , KCV_z и относительным сужением φ_z для низкоуглеродистых (н/у) и низколегированных (н/л) сталей.

Possibilities of determination of the value of KCV_z impact toughness using correlation dependencies between values of impact toughness KCV , KCV_z and KCV_z and relative elongation φ_z for low-carbon (l/c) and low-alloyed (l/a) steels are described.

Важными критериями оценки склонности металлопроката к слоисто-вязким и слоисто-хрупким разрушениям являются величины относительного сужения φ_z и ударной вязкости KCV_z , полученные на соответствующих образцах, расположенных перпендикулярно плоскости прокатки листа (в Z-направлении) [1–6].

Определение величины относительного сужения φ_z на образцах, расположенных в направлении толщины листа, регламентируется ГОСТ 28870–90, где в зависимости от величины относительного сужения φ_z листовой прокат классифицируется по группам качества: Z15, Z25 и Z35, что отражает его способность сопротивляться зарождению и развитию слоисто-вязких трещин [7].

Другие характеристики, измеренные при испытаниях на растяжение образцов, расположенных в направлении толщины листа, например предел текучести σ_T^z , малопригоден для оценки склон-

ности металлопроката к образованию слоистых трещин. Только в тех случаях, когда металлопрокат имеет большое количество неметаллических включений (процентное содержание серы $S > 0,012$ %) может произойти уменьшение величины предела текучести σ_T^z . В таких случаях, разрушение Z-образца происходит при разрушающих напряжениях σ_p^z , величина которых меньше величины предела текучести $\sigma_p^z < \sigma_T$.

Из табл.1 и рис. 1 видно, что величины временного сопротивления σ_B^z и предела текучести σ_T^z для некоторых марок сталей могут уменьшаться в основном при значениях относительного сужения $\varphi_z < 15$ %.

Зафиксированы также случаи уменьшения этих величин и при более высоких значениях относительного сужения $\varphi_z > 30$ %.

Именно по этой причине при оценке склонности металлопроката к слоисто-вязким разруше-

Таблица 1. Результаты испытаний н/у и н/л сталей на растяжение

Марка стали	Толщина листа, мм	Поперек направления прокатки				Z-направление			
		σ_T , МПа	σ_B , МПа	σ_T/σ_B	φ_z , %	σ_T , МПа	σ_B , МПа	σ_T/σ_B	φ_z , %
16Г2АФ	20	565	680	0,831	62	522	690	0,757	-
Ст.3	70	234,2	448,7	0,522	59,8	211,3	261,3	0,809	10,8
16Г2АФ	40	434,4	611	0,711	55,5	401,6	432,3	0,929	6,6
14Г2АФ	40	401,6	577,6	0,695	70,2	388,6	535,6	0,726	48,2
14Г2АФ	40	475,3	668,3	0,711	59,6	461,6	583	0,792	5,9
14Г2АФ	35	515	615,9	0,836	67	412,6	582,5	0,708	12,9
14Г2АФШ	35	515	615,9	0,836	67	390,9	-	-	-
16Г2АФ	40	462,3	656,1	0,705	62,6	370,3	-	-	6,3
16Г2АФШ	40	435,5	580,6	0,750	69,6	409,4	568,7	0,720	42,4
09Г2С	15	356	495,5	0,718	73	370	470	0,787	32
14Г2АФ	50	362,7	528,3	0,687	62,45	397	500,8	0,793	24,8
12ХГДАФ	50	330,2	499,8	0,661	67,7	350	-	-	65,8
09Г2СШ	50	300,4	492,1	0,610	80,3	-	340	-	29,8
09Г2С	35	405,3	493,6	0,821	76,3	349	476,3	0,733	32

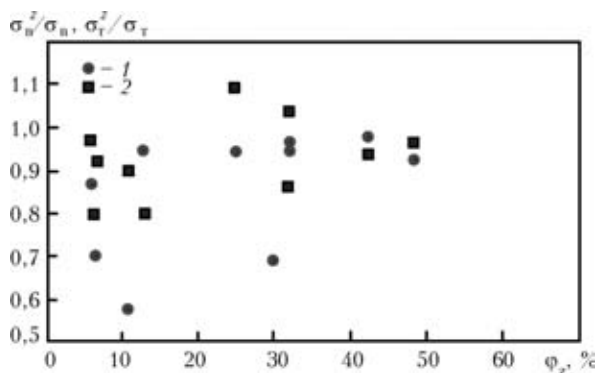


Рис. 1. Зависимость прочностных характеристик испытываемых образцов ($\sigma_b^z, \sigma_b, \sigma_T^z, \sigma_T$) от величины относительного сужения в направлении толщины ϕ_z : 1 — σ_b^z/σ_b ; 2 — σ_T^z/σ_T

ниям — определении величины относительного сужения ϕ_z — рекомендовано фиксировать величины σ_b^z, σ_T^z как одни из основных характеристик механических свойств металлопроката.

Для оценки склонности листового проката к слоисто-хрупким растрескиваниям необходимо проводить испытания на ударный изгиб образцов, вырезанных в Z-направлении, перпендикулярном плоскости прокатки стального листа [7]. Однако изготовление образцов для таких испытаний (длина образца $L = 55$ мм) имеет определенные технологические трудности — изготовление и «приварка» захватов к исследуемому листу с последующим изготовлением образцов из полученных сварных крестовых соединений, что делает проведение таких испытаний в заводских условиях практически невозможными.

С инженерной точки зрения было бы удобно разработать методику, с помощью которой, не применяя сварных крестовых соединений можно было бы оценить величину ударной вязкости в направлении толщины листа KCV_z в диапазоне температур вязко-хрупкого перехода по результатам стандартных испытаний образцов, расположенных в плоскости листа, на растяжение ϕ или ударный изгиб KCV . Такая постановка задачи обусловлена, в первую очередь, необходимостью оценки трещиностойкости основного металла

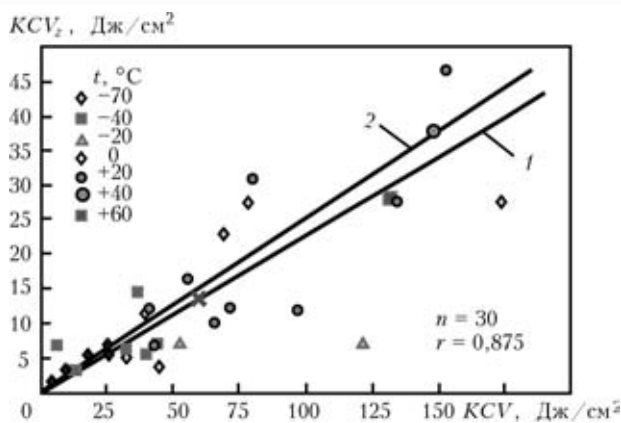


Рис. 2. Зависимость KCV_z от KCV , полученная на образцах, расположенных в плоскости листа методом наименьших квадратов (МНК): 1 — KCV_z по отношению к KCV (угловой коэффициент 0,227); 2 — KCV по отношению к KCV_z (угловой коэффициент 0,252); n — количество точек; r — коэффициент корреляции; \times — точка, соответствующая средним значениям KCV и KCV_z

сварной конструкции, в нашем случае — его склонности к возникновению и развитию слоисто-хрупких разрушений как наиболее нестабильных. Принимая во внимание возможность изменения механических свойств основного металла технологического оборудования после длительного периода эксплуатации, решение такой задачи является актуальной.

В работе [8] было выдвинуто предложение, что между величинами ударной вязкости KCV и KCV_z для н/у и н/л сталей, а также для сталей, изготовленных с применением контролируемой прокатки, могут существовать корреляционные зависимости.

С целью изучения возможных корреляционных связей между величинами, KCV — KCV_z, ϕ_z — KCV_z для статистической обработки были привлечены результаты лабораторных испытаний на ударный изгиб различных марок низкоуглеродистых, низколегированных сталей, а также сталей изготовленных с применением контролируемой прокатки.

В табл. 2 и на рис. 2 приведены результаты испытаний исследуемых н/у и н/л сталей на ударный изгиб.

Таблица 2. Результаты испытаний н/у и н/л сталей на ударный изгиб при разных температурах испытаний, °С

Марка стали	Толщина листа, мм	Поперек направления прокатки, Дж/см ²							Z-направление, Дж/см ²						
		-70	-40	-20	0	+20	+40	+60	-70	-40	-20	0	+20	+40	+60
16Г2АФ	20	25,5	40	-	40,7	40,7	-	-	5,3	5,3	-	11,3	11,7	-	-
Ст.3	70	-	6	-	-	97,3	148,3	131	-	6,67	-	-	11,7	38	28
16Г2АФ	40	-	43,7	52,3	-	55,3	-	-	-	6,7	7,5	-	16,3	-	-
14Г2АФ	40	-	12	-	32,3	71,7	-	-	-	3	-	5	12	-	-
14Г2АФ	35	25,3	37	-	78,3	79,7	-	-	6,5	14,5	-	27,5	30,5	-	-
16Г2АФ	40	18,3	-	-	-	65,7	-	-	5,3	-	-	-	10	-	-
09Г2С	15	4	10,5	-	45	43	-	-	1,3	3	-	3,7	6,7	-	-
09Г2СШ	50	9,7	32,7	-	69	153,5	-	-	2,8	6	-	23	46,5	-	-
02Г2С	35	-	-	-	174	134	-	-	8,5	-	-	27,5	28	-	-

Исходя из полученных результатов (рис. 1) между величинами ударной вязкости в плоскости листа и Z-направлении получено следующее приближенное уравнение:

$$KCV_z = 0,23 KCV.$$

По результатам испытаний угловой коэффициент составил: минимальный — 0,082, средний — 0,235, максимальный — 0,392.

Следовательно, ориентировочное значение коэффициента слоистого растрескивания будет:

$$KCP = \frac{KCV - KCV_z}{KCV} = \frac{1 - 0,23}{1} = 0,77.$$

По результатам испытаний оно составило: минимальное — 0,61, среднее — 0,765, максимальное — 0,918.

На втором этапе были проанализированы зависимости величины ударной вязкости KCV_z от величины относительного сужения φ_z , получен-

ные для различных марок н/у, н/л сталей в диапазоне температур вязкого-хрупко перехода (табл. 3, рис. 3).

Если предположить, что при $\varphi_z = 0$ KCV_z также равно нулю, то при аппроксимации экспериментальных точек линейной зависимостью можно использовать уравнение вида: $KCV_z = a\varphi_z$, где угловой коэффициент a является функцией температуры t : $a = f(t)$, $a = \text{tg}(\alpha)$, α — угол наклона.

На рис. 3 также представлены результаты испытаний сталей электрошлакового переплава с высокими значениями величины относительного сужения $\varphi_z^{\text{ср}} > 30$ %. Видно, что эти данные также сос-

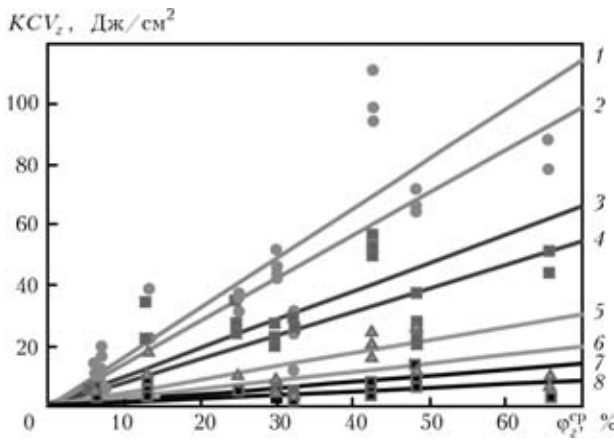


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости KCV_z от величины относительного сужения $\varphi_z^{\text{ср}}$ в диапазоне переходных температур, полученные МНК: 1, 2 — для температуры испытаний +20°C; 3, 4 — 0 °C; 5, 6 — -40 °C; 7, 8 — -70 °C (прямые 1, 3, 5, 7 — φ_z по отношению к KCV_z ; 2, 4, 6, 8 — KCV_z по отношению к φ_z)

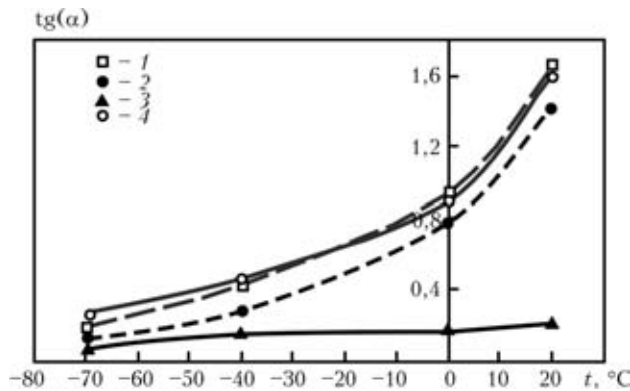


Рис. 4. Экспериментальные значения углового коэффициента $a = \text{tg}(\alpha)$ для соответствующих прямых, полученных МНК: 1 — для φ_z по отношению к KCV_z ; 2 — для KCV_z по отношению к φ_z ; 3 — разница между 1 и 2; 4 — среднее значение параметра a , оцениваемое как отношение $a = KCV_z / \varphi_z^{\text{ср}}$

Таблица 3. Относительное сужение φ_z (средние значения) и ударная вязкость KCV_z

Марка стали	Толщина листа, мм	Относительное сужение $\varphi_{\text{ср}}$, %	Ударная вязкость KCV_z , Дж/см ²			
			4	3	2,5	1
09Г2С	15	32	4	3	2,5	1
			4	4	2,5	1
			12	4	4	2
14Г2АФ	50	24,8	32	25	7	5
			35	27	10	5
			37	35	-	-
09Г2С	35	32	25	25	-	-
			31	30	-	-
12ХГДАФ	50	65,8	79	44	9	2,5
			90	51	6	4
			90	-	10	4
09Г2СШ	50	29,8	44	20	6	2,5
			45	22	6	3
			45	27	9	3
			46,5	-	-	-
			52	-	-	-
16Г2АФ	40	6,6	12	-	5	3
			17	-	7	3
			20	-	8	-
14Г2АФ	40	48,2	65	20	13	7
			67	27	25	12
			72	38	27	13
16Г2АФ	40	5,9	10	4	3	-
			11	5	3	-
14Г2АФ	35	12,9	15	6	3	-
			22	21	10	6
16Г2АФ	40	6,3	39	34	19	7
			10	-	-	5
			-	-	-	5
16Г2АФШ	40	42,4	-	-	17	6
			95	50	21	4
			99	52	25	7
			112	56	-	7



тавляют корреляционные зависимости величин ударной вязкости KCV и KCV_z для н/у н/л сталей.

Из рис. 3 видно, что с повышением температуры угол наклона прямых, построенных по МНК, а соответственно и их тангенс — коэффициент a в уравнении $KCV_z = a\varphi_z$ — увеличивается нелинейно (рис. 4).

Функция $a = f(t)$ должна лежать между кривыми 1 и 2, и в этом случае:

$$a = f(t) = 0,9e^{0,026t}$$

Таким образом, $KCV_z = \varphi_z 0,9e^{0,026t}$.

Остается найти дополнительный параметр, который бы дополнительно характеризовал рассеяние экспериментальных точек.

Таким образом, прослеживается устойчивая зависимость между характеристиками KCV и KCV_z , φ_z и KCV_z а также температурами испытания образцов на ударный изгиб (см. рис. 2).

Следует отметить, что металлопрокат, изготовленный по методу контролируемой прокатки отличается высокими пластическими свойствами φ , φ_z и величинами ударной вязкости при положительных температурах испытаний. Однако при понижении температуры испытаний на ударный изгиб, как правило, сопротивление возникновению слоисто-хрупким разрушениям (величина KCV_z) резко снижается [1–3, 8].

В табл. 4 и на рис. 5 приведены результаты лабораторных испытаний на ударный изгиб.

Видно, что значения ударной вязкости, полученные на Z-образцах, отличаются, в первую очередь, большим разбросом в диапазоне переходных температур $T_{исп} = -20...-40$ °С. На рис. 6 представлены обобщенные результаты для исследованных марок сталей контролируемой прокатки.

Исходя из полученных результатов можно предположить, что для исследованных марок ста-

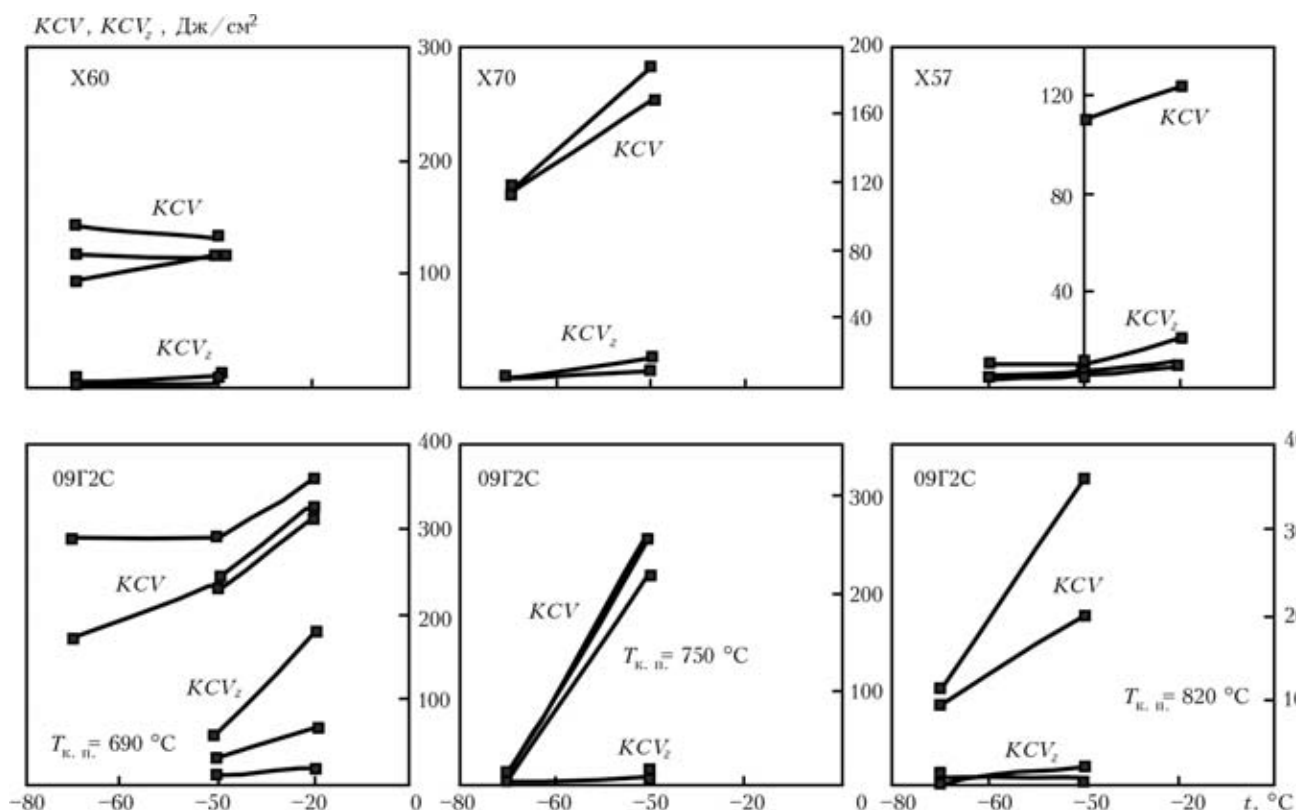


Рис. 5. Зависимости ударной вязкости от температуры испытаний для сталей, изготовленных по методу контролируемой прокатки

Таблица 4. Результаты испытаний сталей контролируемой прокатки на ударный изгиб при разных температурах испытаний, °С

Марка стали (температура конца прокатки)	Поперек направления прокатки KCV , Дж/см ²					В направлении толщины KCV_z , Дж/см ²				
	-70	-40	0	+20	+10	-70	-40	0	+20	+10
09Г2С ($T_{к.п.} = 740$ °С)	171,3	279,0	330,7	-	-	4,5	44,0	115,7	-	-
09Г2С ($T_{к.п.} = 750$ °С)	6,5	240,0	353,3	360,0	-	4,5	93,7	358,3	253,0	-
09Г2С ($T_{к.п.} = 820$ °С)	72,3	278	328,3	-	360	5,7	11,0	90,0	-	235,0
X60	118	122	221	163,7	-	2,5	3,2	21	163,7	-
X70	111,7	176,5	199,7	-	-	8,7	128,0	211	-	-
X57	-	-	112,5	224,5	-	-	-	7,3	13,3	-

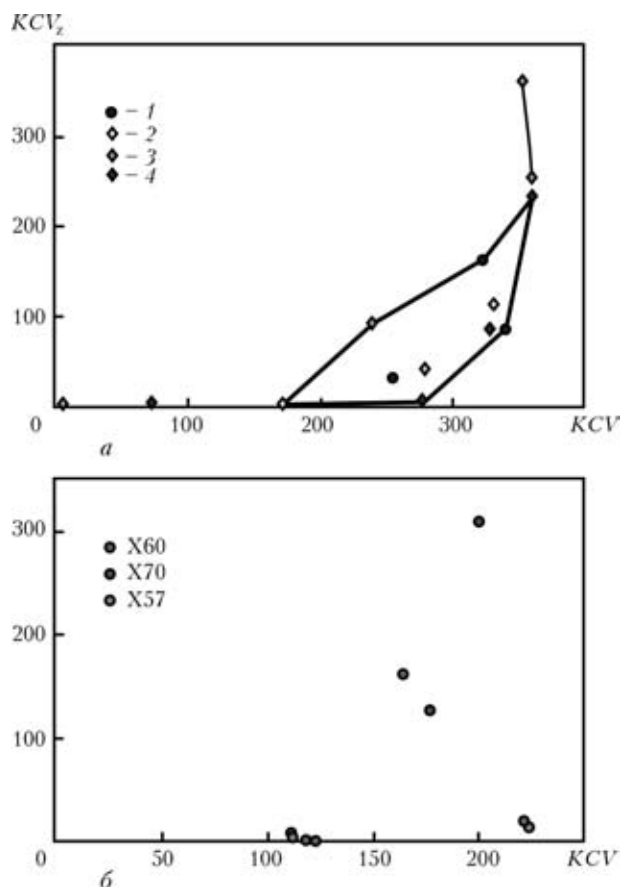


Рис. 6. Обобщенные результаты испытаний на ударный изгиб для исследованных сталей контролируемой прокатки: а — для сталей марки 09Г2С с различными температурами конца прокатки $T_{к.п.}, ^\circ\text{C}$: 1 — 660; 2 — 740; 3 — 750; 4 — 820; б — для сталей марок X57, X60, X70 (температуры конца прокатки неизвестны)

лей контролируемой прокатки прослеживаются возможности существования взаимосвязи между величинами KCV и KCV_z . Однако установление корреляционной зависимости требует дальнейшего изучения.

Выводы

По величине относительного сужения, полученной на стандартных образцах, расположенных в плоскости листа φ^{cp} и в Z-направлении (φ_z^{cp}) для н/у и н/л сталей можно приблизительно определить величину KCV_z^{max} .

По результатам испытаний стандартных образцов на ударный изгиб, расположенных в плоскости листа (KCV), можно приблизительно определить величину KCV_z^{max} в диапазоне температур вязкохрупкого перехода для н/у н/л сталей.

Для наиболее объективной оценки взаимосвязей величин φ_z , KCV_z и KCV целесообразно проводить сравнительные оценки для каждой марки стали или плавки.

1. Новиков В. И., Гиренко В. С., Бернацкий А. В. Анизотропия свойств металлопроката и работоспособность сварных конструкций // Автомат. сварка. — 1985. — № 12. — С. 13–19.
2. Гиренко В. С., Бернацкий А. В. и др. Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений // Пробл. прочности. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
3. Гиренко В. С., Бернацкий А. В., Козачек В. М. Хрупкое разрушение стали с развитой кристаллографической текстурой // Автомат. сварка. — 1991. — № 1. — С. 6–9.
4. Влияние кристаллографической текстуры на анизотропию характеристик разрушения низколегированной стали контролируемой прокатки / В. В. Усов, В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина и др. // Физ.-хим. механика материалов. — 1993. — № 2. — С. 47–52.
5. Микляев П. Г., Фридман Я. Б. Анизотропия механических свойств материалов. — М.: Металлургия, 1969. — 267 с.
6. Георгиев М. Н. Вязкость малоуглеродистых сталей. — М.: Металлургия, 1973. — 224 с.
7. ГОСТ 28870–90. Сталь. Методы испытания на растяжение толстолистового проката в направлении толщины.
8. Бернацкий А. В. Дополнительные подходы к оценке склонности низкоуглеродистых и низколегированных сталей к слоисто-вязким и слоисто-хрупким разрушениям // Автомат. сварка. — 2003. — № 5. — С. 22–25.

Поступила в редакцию
21.07.2011

4-я Международная научно-техническая конференция и выставка «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ»

26-27 сентября 2012 г.,

Могилев, Республика Беларусь

Организатор :

Белорусско-Российский университет

Основная тематика:

Дефектоскопия материалов и промышленных изделий

Контроль структуры и физико-механических характеристик материалов изделий

Контроль геометрических параметров объектов

Мониторинг, диагностика и прогнозирование остаточного ресурса технических объектов

Компьютерные технологии в неразрушающем контроле

Тел.: (+375) 222 225 212, 297 433 868, sss.bru@tut.by