

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КРАНОВЫХ РЕЛЬСОВ

В.Ф. Сабуров

В статье приведены результаты исследований механических свойств стали специальных крановых рельсов, выпускаемых по ГОСТ 4121, и дана статистическая оценка их качества. Используемая для изготовления рельсов сталь не отвечает современным требованиям по прочности и износоустойчивости. Это является одной из причин низкой долговечности крановых рельсов в цехах с интенсивной работой мостовых кранов. Приведены результаты исследования рельсов из легированной стали.

Крановые рельсы подкрановых путей производственных зданий выполняют при эксплуатации две функции. Во-первых, они являются путями перемещения колес мостовых кранов и должны обладать необходимой прочностью и износоустойчивостью. Во-вторых, рельсы распределяют локальные воздействия колес мостовых кранов на поясные соединения и стенку подкрановых балок и должны обладать необходимой жесткостью на изгиб и кручение. Эти функции взаимосвязаны, так как недостаточная прочность и износоустойчивость рельсов приводит к их интенсивному износу и уменьшению моментов инерции на изгиб и кручение, что в свою очередь вызывает повышение местных напряжений в стенке подкрановых балок и в конечном итоге приводит к усталостным разрушениям подкрановых балок и рельсов.

Конструктивная форма крановых рельсов совершенствовалась вместе с изменениями в конструкции подкрановых балок. Клепанные подкрановые балки использовались с крановыми рельсами «брускового» типа. Многоэлементная конструкция верхней зоны клепанных подкрановых балок позволяла регулировать величину местных напряжений в стенке и обеспечивать прочность заклепок при помощи дополнительных элементов - ламелей. При этом «брусковые» рельсы выполняют в основном первую функцию.

В сварных подкрановых балках крановый рельс является единственным конструктивным элементом, с помощью которого можно регулировать уровень локальных напряжений в верхней зоне стенки и поясных швах. Поэтому в 1952 году потребовалось разработать специальные крановые рельсы, обладающие повышенной жесткостью на изгиб и кручение по сравнению с «брусковыми».

Среди основных требований, предъявляемых к качеству крановых рельсов, главными являются износоустойчивость, прочность и высокая сопротивляемость ударным воздействиям.

В подкрановых путях износоустойчивость крановых рельсов необходимо рассматривать в системе «колесо - рельс». В этой системе, как сле-

дует из [1], соотношение твердости по Бринеллю рельса и обода колеса должно находиться в диапазоне $HВ_p/HВ_k = 0,8...0,85$. В краностроении применяют термически обработанные колеса, обод которых имеет твердость 300...360 НВ и, следовательно, твердость головки рельса должна быть в пределах 240...310 НВ.

Прочность и износоустойчивость крановых рельсов в основном определяются механическими свойствами рельсовой стали и, следовательно, ее химическим составом. Для изготовления крановых рельсов, также как и железнодорожных, используют высокоуглеродистые марки стали (табл. 1). Из табл. 1 следует, что для специальных крановых рельсов, независимо от их типа, используется одна марка стали – К 63. Химический состав этой стали не менялся с 1952 г. (ГОСТ 4121–52), в то время как крановые нагрузки и воздействия от мостовых кранов существенно возросли. Напротив, химический состав рельсовой стали для железнодорожных рельсов дифференцирован в зависимости от их мощности. Кроме того, при необходимости эти стали подвергают термической обработке. Это позволяет для отечественных железнодорожных рельсов добиваться повышенной износоустойчивости, так как, по данным исследования [2], увеличение временного сопротивления с 65 кН/см² до 82 кН/см² (в 1,3 раза) приводит к снижению износа в 2 раза, а до 90 кН/см² (\approx в 1,4 раза) – более чем в 3 раза.

Износоустойчивость углеродистой рельсовой стали зависит от содержания в ней углерода и марганца – (С + 0,25 Мп) %, а также ее твердости [3] (рис. 1). Воспользуемся результатами этих исследований и оценим износоустойчивость рельсовой стали К 63.

Данные об изменчивости параметра (С + 0,25 Мп) % были получены из сертификатов качества на крановые рельсы, поставленные на металлургические предприятия Урала Кузнецким металлургическим комбинатом и металлургическим заводом им. Петровского (Украина) по ГОСТ 4121–76* [4]. Статистическая обработка данных

Химический состав и механические свойства сталей для изготовления крановых и железнодорожных рельсов

Тип рельса	Марка стали	Стандарт	Вид термической обработки	Содержание химических элементов					Механические свойства	
				C	Mn	Si	S	P	σ_B , МПа	НВ
КР-70... КР-140	К63	ГОСТ 4121-76*	Без обработки	0,53...0,73	0,6...1,0	0,15...0,35	не более 0,050	не более 0,050	750	212
P65, P75	M76	ГОСТ 24182-80	Без обработки	0,69...0,82	0,75...1,05	0,13...0,28	не более 0,45	не более 0,035	840	247
P50	M75	ГОСТ 24182-80	Без обработки	0,67...0,80	0,75...1,05	0,13...0,28	не более 0,45	не более 0,035	840	247
P38, P43	M71	ГОСТ 5876-82	Без обработки	0,64...0,77	0,60...0,90	0,13...0,28	не более 0,050	не более 0,040	800	235
P50, P65	M72	ГОСТ 18267-82	Объемно-закаленные	0,68...0,78	0,75...1,05	0,13...0,25	не более 0,045	не более 0,035	1160	341
P50	НБ-65	ГОСТ 16852-71*	Поверхностно-закаленные	0,58...0,75	0,60...1,00	0,15...0,30	не более 0,060	не более 0,070	950	279

Обозначения марок сталей: К - кислородно-конверторная; М - маргеновская; НБ - бессемеровская; цифры - среднее содержание углерода в сотых долях процента.

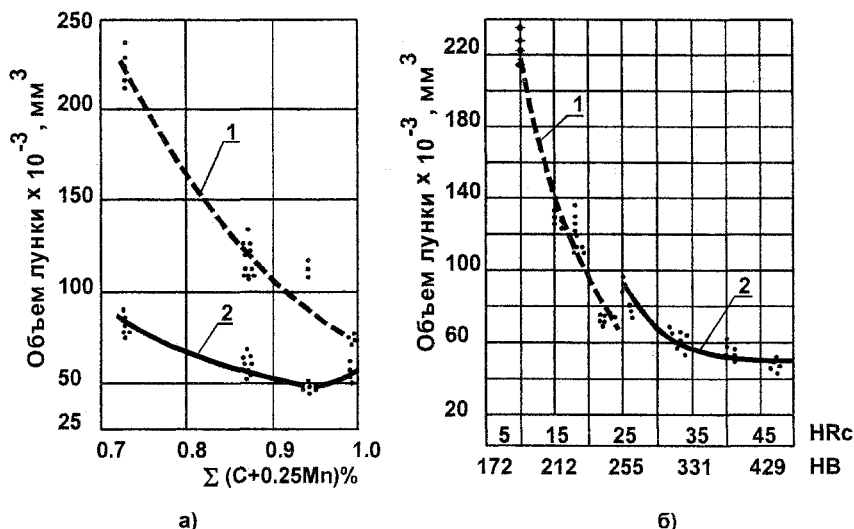


Рис. 1. Зависимость износоустойчивости рельсовой стали от $\Sigma(C + 0,25 Mn) \%$ (а) и от твердости по Роквеллу и Бринеллю (б); 1- сталь без термической обработки, 2 - сталь с нагрева токами высокой частоты (ТВЧ)

сертификатов при объеме выборки $N = 157$ позволила получить следующие характеристики случайной величины $X = (C + 0,25 Mn) \%$:

- среднее значение $\bar{X} = 0,818$;
- среднее квадратическое отклонение $s = 0,0437$;
- коэффициент, учитывающий объем выборки $\alpha = 1,786$;
- коэффициент вариации $\nu = 5,3 \%$;

$$X_{\max} = \bar{X} + \alpha s = 0,818 + 1,786 \cdot 0,0437 = 0,896;$$

$$X_{\min} = \bar{X} - \alpha s = 0,818 - 1,786 \cdot 0,0437 = 0,740.$$

Сравнение полученных результатов с кривой 1 на рис. 1, а показывает, что часть крановых рельсов из стали К 63 попадают в зону с низкой износоустойчивостью, что и подтверждается практикой эксплуатации [5].

Для определения показателей качества крановых рельсов использованы результаты их заводских испытаний. На рис. 2 в качестве примера приведены гистограммы изменения нормируемых стандартом [4] механических свойств рельса КР 70, а в табл. 2 - результаты статистической обработки.

Частные независимые выборки механических свойств для отдельных типов рельсов объединены в генеральную совокупность для рельсовой стали К 63 (см. табл. 2.) с использованием дисперсионных отношений. Сравнение твердости по Бринеллю НВ крановых рельсов и стали К 63 с кривыми на рис. 1, б также свидетельствует о том, что рельсовая сталь специальных крановых рельсов имеет низкую износоустойчивость.

Оценка качества крановых рельсов по механическим свойствам выполнена по методике, изложенной в стандарте [5] и определяется положе-

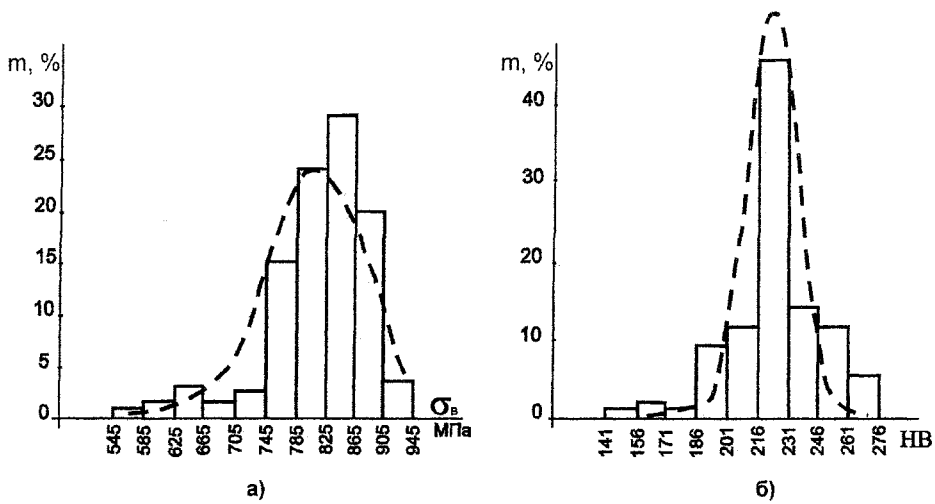


Рис. 2. Гистограммы механических свойств рельсовой стали К 63:
а – временное сопротивление σ_b ; б – твердость по Бринеллю НВ

Таблица 2

Результаты статистической обработки данных заводских испытаний

Механические свойства	Статистические характеристики	Тип кранового рельса				Сталь К 63
		КР 70	КР 80	КР 100	КР 120	
Временное сопротивление σ_b , МПа	Объем выборки N	304	105	99	68	576
	Среднее значение $\bar{\sigma}_b$	828,4	835,3	820,4	816,8	827,3
	Стандарт S	43,8	40,1	43,0	62,7	45,9
	Коеф-т вариации ν , %	5,3	4,8	5,2	7,7	5,5
	$\bar{\sigma}_b - 1,96 S$	742,6	756,7	736,1	693,9	737,3
Предел текучести σ_T , МПа	Объем выборки N	306	109	104	68	584
	Среднее значение $\bar{\sigma}_T$	436,7	439,4	447,5	445,2	440,7
	Стандарт S	33,1	35,8	38,1	48,1	35,5
	Коеф-т вариации ν , %	7,6	8,1	8,5	10,8	8,1
	$\bar{\sigma}_T - 1,96 S$	371,8	369,2	372,8	350,9	371,4
Твердость по Бринеллю, НВ	Объем выборки N	137	29	48	35	247
	Среднее значение $\bar{НВ}$	225,4	226,2	230,1	220,7	226,3
	Стандарт S	18,0	16,8	12,9	11,5	15,4
	Коеф-т вариации ν , %	8,0	7,4	5,6	5,2	6,8
	$\bar{НВ} - 1,96 S$	190,0	193,3	204,8	198,2	196,1
Относительное удлинение δ_{10} , %	Объем выборки N	308	108	93	68	575
	Среднее значение $\bar{\delta}_{10}$	10,6	9,4	9,0	9,0	10,0
	Стандарт S	1,7	1,4	1,1	2,0	1,6
	Коеф-т вариации ν , %	16,5	15,4	12,5	22,4	15,4
	$\bar{\delta}_{10} - 1,96 S$	7,3	6,7	6,8	5,1	6,9

Примечание: Предел текучести не является нормируемой характеристикой и определяется факультативно по требованию заказчиков.

нием значений механических характеристик относительно нормы. Качество оценивается следующими показателями: P - показатель надежности обеспечения нормы; Δ - показатель запаса характеристики относительно нормы; h - показатель уровня характеристики относительно нормы.

Вероятность того, что значение характери-

стики соответствует норме с доверительной вероятностью γ , равна

$$P\gamma = P(N, M, \gamma),$$

где N - общий объем выборки данной механической характеристики; M - число результатов контроля, не соответствующих норме.

Теория расчета строительных конструкций

Оценка показателя запаса характеристики $\Delta\gamma$ вычисляется по формулам:

– при нормировании снизу

$$\Delta\gamma = X_* - C_0;$$

– при нормировании сверху

$$\Delta\gamma = X^* - C_0,$$

где $X_* = \bar{X} - KS$; $X^* = \bar{X} + KS$; \bar{X} – среднее значение механической характеристики; S – среднее квадратическое отклонение; K – множитель, зависящий от объема выборки; C_0 – нормируемое значение механической характеристики.

Показатель уровня характеристики $h\gamma$ равен отношению запаса Δ к интервалу рассеивания характеристики и при нормировании снизу определяется по формуле

$$h\gamma = \Delta\gamma / (X^* - X_*).$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3 при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$. Из табл. 3 следует, что уровень надежности нормируемых механических характеристик рельсов ниже 0,95, кроме рельсов КР 70 и КР 80. Отрицательные значения показателей качества в табл. 3 говорят о том, что рельсы типа КР из стали К 63 по стандарту [4] не имеют запаса по временному сопротивлению σ_v и твердости по Бринеллю НВ.

Таким образом, проведенные исследования выявили неудовлетворительное качество стандартной рельсовой стали К 63, которая не отвечает современным требованиям к специальным крановым рельсам. Это свидетельствует о необходимости корректировки требований к качеству рельсовой стали в технических условиях на изготовление специальных крановых рельсов.

Существует несколько способов повышения механических свойств рельсовой стали и эксплуатационных характеристик крановых рельсов, среди них:

– увеличить в стали содержание углерода;

– термически обрабатывать рельсы из высокоуглеродистой стали;

– использовать для изготовления рельсов легированные стали.

Из исследований [2] следует, что повышение механических свойств и соответственно служебных качеств рельсов за счет увеличения содержания углерода практически исчерпано. Использование для изготовления специальных крановых рельсов стали типа М 76 (см. табл. 1) позволит незначительно повысить их эксплуатационные характеристики.

Термическая обработка рельсов требует специального оборудования, расширения производственных площадей и экономически целесообразна при объемах производства более 100 тыс. тонн в год [7]. Поэтому, в современных условиях для изготовления специальных крановых рельсов наиболее целесообразно использовать легированную рельсовую сталь.

По заказу Магнитогорского металлургического комбината на заводе им. Петровского была организована выплавка 100 тонн стали рельсовой стали К 63, дополнительно легированной ванадием, из которой прокатана опытная партия кранового рельса КР 100. Эта партия рельсов использована в подкрановых путях тяжелого режима в цехах комбината. Наблюдения и исследования износостойчивости экспериментальных крановых рельсов в условиях эксплуатации проводились в течение пяти лет по специально разработанной программе [8]. Кроме того, проведены лабораторные исследования механических свойств этих рельсов.

Для сравнения выполнены исследования кранового рельса КР 100 из стандартной стали К 63, а также рельса MSZ-100 (Венгрия). Химический состав стали исследованных рельсов приводится в табл. 4.

Из табл. 4 следует, что Европейские крановые рельсы прокатывают из среднеуглеродистых сталей. Однако они отличаются от отечественных

Качество рельсов КР по механическим свойствам из стали К 63

Таблица 3

Тип рельса	Характеристика выборки		Норма C_0	Показатели качества		
	N	M		P	Δ	h
Временное сопротивление						
КР 70	304	8	750 МПа	0,954	-30,0	-0,14
КР 80	105	0	–	0,971	-19,0	-0,09
КР 100	99	4	–	0,910	-41,0	-0,18
КР 120	68	10	–	0,760	-100,0	-0,30
Сталь К63	581	22	750 МПа	0,945	-30,0	-0,14
Твердость по Бринеллю, НВ						
КР 70	137	13	212	0,845	-28,0	-0,30
КР 80	29	2	–	0,899	-28,0	-0,30
КР 100	48	0	–	0,945	-12,0	-0,17
КР 120	35	2	–	0,916	-19,0	-0,30
Сталь К63	247	17	212	0,936	-19,0	-0,25

Таблица 4

Химический состав стали исследованных образцов рельсов

Тип рельса	Массовая доля, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V
КР 100	0,55	0,71	0,28	0,29	0,34	0,05	0,02	0,01	–
Головка	0,55	0,73	0,29	0,30	0,38	0,06	0,01	0,01	–
Шейка	0,53	0,71	0,28	0,29	0,32	0,05	0,03	0,01	–
Подошва	0,58	0,71	0,29	0,30	0,32	0,05	0,04	0,01	–
MSZ-100	0,447	0,66	0,20	0,030	0,025	0,027	0,09	0,133	–
Головка	0,45	0,68	0,20	0,030	0,025	0,01	0,09	0,13	–
Шейка	0,45	0,66	0,21	0,031	0,026	0,02	0,09	0,13	–
Подошва	0,44	0,64	0,20	0,028	0,024	0,05	0,09	0,13	–
КР 100–V	0,66	0,74	0,21	0,025	0,031	0,05	0,09	0,07	0,19
Головка	0,66	0,74	0,22	0,027	0,030	0,05	0,09	0,06	0,19
Шейка	0,64	0,73	0,21	0,024	0,032	0,05	0,09	0,07	0,18
Подошва	0,67	0,74	0,21	0,024	0,030	0,05	0,08	0,07	0,19

не только химическим составом стали, но и геометрическими размерами, о чем свидетельствуют следующие данные:

	КР100	MSZ-100
– ширина головки, мм	100;	100;
– высота сечения, мм	150;	145;
– ширина подошвы, мм	150;	172;
– толщина шейки, мм	38;	45;
– площадь поперечного сечения, см ²	113,4;	125,6;
– момент инерции на изгиб, см ⁴	2806;	2884;
– момент инерции на кручение, см ⁴	765;	–
– вес погонного метра, кг	89,1;	98,0.

Стандартом [4] для оценки механических свойств крановых рельсов предусмотрено испытание на растяжение одного образца от партии с поверхности головки рельса вдоль проката. Это не полностью характеризует служебные качества рельсов, так как рельс в процессе эксплуатации находится в сложном (объемном) напряженном состоянии, о чем свидетельствуют различные по характеру и виду разрушения [5]. Поэтому были проведены испытания на растяжение и ударную вязкость образцов, взятых из различных зон поперечного сечения рельса - вдоль и поперек проката, а также по высоте рельса. Это позволило выявить анизотропию механических свойств в зонах поперечного сечения рельса, потенциально опасных к появлению разрушений.

Результаты испытания образцов рельсовой стали на растяжение и коэффициенты анизотропии представлены в табл. 5. Коэффициент анизотропии - это отношение механических свойств поперек проката и в Z-направлении к соответствующему значению механической характеристики вдоль проката.

Испытания образцов рельсов КР 100 на рас-

тяжение показали, что при данном химическом составе (см. табл. 4) механические свойства превышают браковочный минимум, предусмотренный в стандарте [4].

Из табл. 5 следует, что легирование стали К 63 ванадием повысило временное сопротивление в 1,3...1,5 раз, при этом относительное удлинение уменьшилось в 1,5 раза, твердость головки рельса составила 300...320 ед. НВ, что более чем на 40 % превышает нормируемое значение. Следовательно, механические свойства легированной ванадием рельсовой стали в большей мере соответствуют работе рельсов в системе «рельс – колесо», чем свойства высокоуглеродистой стали М 76 (см. табл. 1).

Прочностные характеристики во всех направлениях у испытанных рельсов практически одинаковы. Коэффициенты анизотропии для σ_B изменяются в диапазоне 0,92...1,00, для σ_{02} – 1,02...1,06. В то же время наблюдается существенное снижение пластических свойств (δ и ψ) в поперечном и вертикальном направлениях – коэффициенты анизотропии δ_5 поперек проката изменяются в диапазоне 0,39...0,59, а в Z-направлении – 0,42...0,55.

Параллельно с испытаниями на растяжение на тех же образцах проведены испытания рельсовой стали К 63 на твердость по Виккерсу (HV). Это позволило выявить корреляционную зависимость между σ_B и HV. Для рельсовой стали К 63 $\sigma_B = 0,345 HV$ с точностью 1...3 %. На основе обработки статистических данных заводских и лабораторных испытаний образцов получено отношение $\sigma_{02}/\sigma_B = 0,54$. Полученные зависимости использовались для оценки механических свойств рельсов, находящихся в эксплуатации, методом динамической твердости.

Таблица 5

Результаты испытания на растяжение металла крановых рельсов

Тип рельса	Часть рельса	Механические свойства при направлении проката										Кoeffициенты анизотропии К дль:					
		Вдоль проката					Поперек проката					σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	σ_{02} , МПа	δ_5 , %	ψ , %
		Кол-во образцов	σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	δ_5 , %	ψ , %	Кол-во образцов	σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	δ_5 , %	ψ , %						
КР100	Головка	1 слой 12	804	473	27,4	23,2	1 слой 3	738	500	11,4	9,2	1,06	0,42	0,40			
		2 слой 13	789	406	28,6	18,1	2 слой 3	790	487	16,4	14,1	1,00	0,57	0,78			
MSZ-100	Шейка	22	790	401	25,9	24,9	6*	778	427	13,5	11,4	1,06	0,52	0,47			
	Подошва	17	855	494	27,1	25,8	—	—	—	—	—	—	—	—			
	Головка	1 слой 9	698	450	30,3	29,0	1 слой 16	701	478	17,8	16,5	1,00	0,59	0,57			
КР 100-V	Шейка	2 слой 9	717	417	32,0	26,2	2 слой 6	706	442	14,6	10,7	1,06	0,46	0,41			
		18	716	396	31,6	26,1	12*	720	405	17,4	21,3	1,00	0,55	0,82			
	Подошва	15	714	443	32,1	28,7	—	—	—	—	—	—	—	—			
КР 100-V	Головка	1 слой 12	1040	620	18,0	12,0	1 слой 8	1010	630	9,0	4,0	0,97	1,02	0,33			
		2 слой 12	1030	620	18,0	12,0	2 слой 5	990	640	7,0	2,0	0,96	1,03	0,17			
	Шейка	14	1070	630	19,0	11,5	16*	1070	640	8,0	6,0	1,00	1,02	0,52			
	Подошва	14	1150	700	20,0	15,0	—	—	—	—	—	—	—	—			

* — Механические свойства в вертикальном направлении Z. В таблице приведены средние значения механических свойств испытанных образцов.

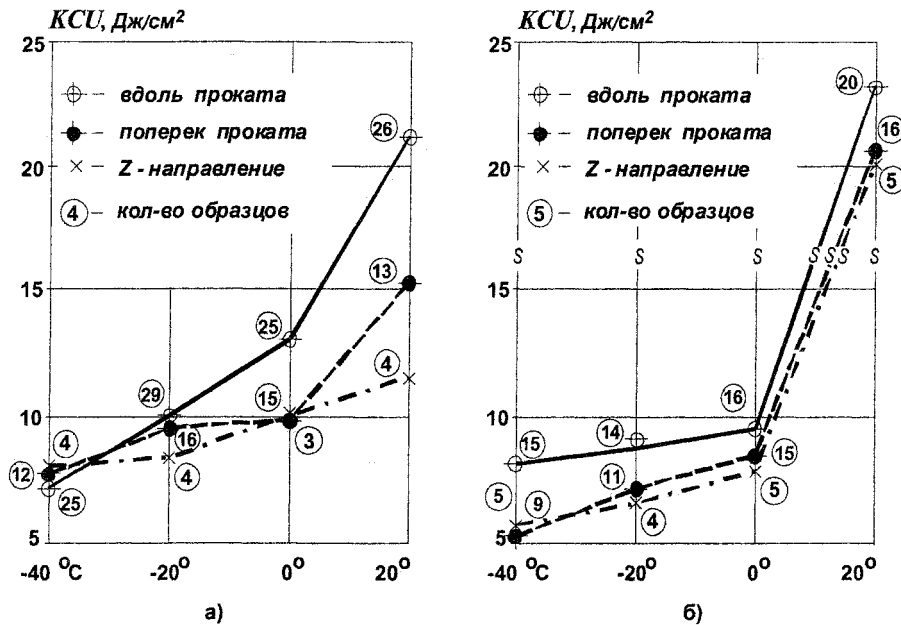


Рис. 5. Результаты испытания крановых рельсов на ударную вязкость: а – рельс КР 100; б – рельс КР 100-V

Испытания на ударную вязкость проводили на образцах с надрезом Менаже по стандарту [9] при температурах 20 °С, 0 °С, -20 °С, -40 °С на маятниковом копре с энергией удара 30 кгс-м. На рис. 5 представлены зависимости ударной вязкости стали от температуры образцов рельсов КР 100 и КР 100-V.

Испытания показали, что ударная вязкость высокоуглеродистых рельсовых сталей при положительных температурах достаточно низкая. Легирование ванадием значительно (почти в 6 раз) повышает вязкость разрушения при комнатной температуре при всех направлениях испытаний, но не вносит существенных изменений в значения ударной вязкости при отрицательных температурах и 0 °С по сравнению с обычной рельсовой сталью.

Анизотропия по ударной вязкости при положительной температуре рельсов КР 100 существенно зависит от направления прокатки - коэффициенты анизотропии изменяются в диапазоне 1,0... 1,7. При отрицательных температурах наблюдается слабая анизотропия - 9...13 %. Легирование стали ванадием снизило значения ударной вязкости при +20 °С - коэффициенты анизотропии равны 0,93...0,98, но значительно увеличило разброс при 0 °С и отрицательных температурах - коэффициенты анизотропии изменяются в диапазоне 0,57...0,85.

Таким образом, исследования показали, что механические свойства рельсовой стали К 63 не обеспечивают необходимую прочность и износостойкость специальных крановых рельсов КР в условиях интенсивной работы мостовых кранов. Для повышения долговечности рельсов необходимо увеличить механические свойства рельсовой стали путем легирования. Легирование ванадием 0,20...0,22% позволяет повысить прочность и твердость рельсовой стали до 1,5 раз. Испытания рельсов КР 100-V из легированной стали в условиях действующего

производства показали, что их износостойкость повысилась в 2 раза, а срок службы увеличился в 3-4 раза по сравнению с обычными. При этом стоимость рельсов возрастает на 20...25 %.

Литература

1. Александров, М.Л. Подъемно-транспортные машины / М.Л. Александров. - М.: Высшая школа, 1985. - 520 с.
2. Производство и термическая обработка рельсов: сб / под ред. В.В. Лемпицкого и Д.С. Казарновского. — М.: Металлургия, 1972. -272 с.
3. Влияние электрозакалки на износостойчивость рельсовой стали / В.А. Тиховский, Д.С. Казарновский и др. //Сталь. -1952. -№ 3.-С. 254-258.
4. ГОСТ 4121-76*. Рельсы крановые. Технические условия.
5. Сабуров, В. Ф. К вопросу о совершенствовании сортамента крановых рельсов / В. Ф. Сабуров // Исследования по строительной механике и строительным конструкциям: сб. науч. тр. ЧПИ. - Челябинск, 1985. - С. 84-89.
6. ГОСТ 22015-76. Качество продукции. Нормирование и статистическая оценка качества металлических материалов изделий по механическим характеристикам.
7. Тришевский, И.С. Основные направления повышения качества железнодорожных рельсов / КС Тришевский //Сталь. - 1983. -№1.-С. 66-68.
8. Сабуров, В.Ф. Оценка ресурса элементов подкрановых конструкций производственных зданий / В. Ф. Сабуров // Сб. «Строительные конструкции XXI». Материалы международной научно-практической конференции. Часть I. — М.: МГСУ, 2000. - С. 107-110.
9. ГОСТ 9454-78* Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.