

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ ЗЕРНА МАТРИЦЫ ПОСЛЕ ДВОЙНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ОТВЕТСТВЕННЫХ ВАГОННЫХ ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ 20ГЛ

Богданов Р.А.

Брянский государственный технический университет, г.Брянск

Ключевые слова: статистический и микроструктурный анализы, ударная вязкость, рама боковая, балка наддресорная, сталь 20ГЛ, средняя площадь зерна.

Аннотация. Рассмотрено воздействие параметров зерна матрицы вагонных отливок из стали 20ГЛ на основе микроструктурного анализа мартеновских плавок после двойной термообработки на повышение ударной вязкости. На основе статистического анализа установлено влияние углерода и марганца совместно с другими сопутствующими элементами на значения ударной вязкости.

THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND PARAMETERS OF THE MATRIX GRAIN AFTER DOUBLE HEAT TREATMENT ON THE TOUGHNESS OF CRITICAL CARRIAGE CASTINGS FROM 20GL STEEL

Bogdanov R.A.

Bryansk state technical university, Bryansk

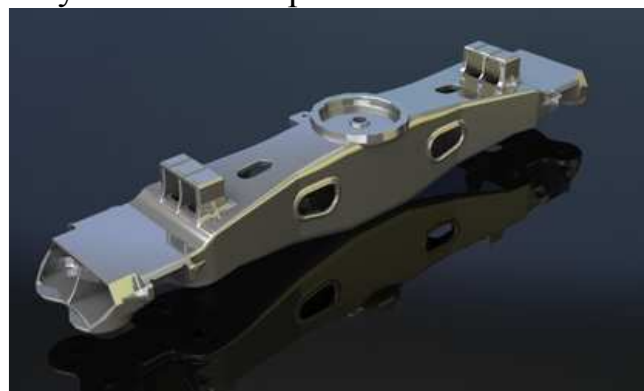
Keywords: statistical and microstructural analyzes, impact strength, side frame, nadressornoj beam, steel 20GL, average grain area.

Abstract. The influence of the grain parameters of the matrix of car castings of steel 20GL based on the microstructural analysis of open-hearth melting after double heat treatment on increasing the toughness is considered. Based on statistical analysis, the effect of carbon and manganese together with other related elements on the impact strength values was established.

Хладостойкая сталь 20ГЛ, выплавляемая в мартеновской печи, используется для изготовления на предприятии АО «ПО «Бежицкая сталь» ответственных отливок «Рама боковая» (рис. 1, а) и «Балка наддресорная» (рис. 1, б) грузовых вагонов, применяемых в условиях Севера.



а)



б)

Рис. 1. Рама боковая (а) и балка наддресорная (б)

Литые отливки «Рама боковая» и «Балка надрессорная» имеют крупное первичное зерно, и его измельчение представляет сложную задачу, которую решают термической обработкой (нормализацией).

Термическая обработка (ТО) является одним из важнейших способов повышения ударной вязкости низколегированной литой стали за счет измельчения зерна [1].

Анализ статистических данных по отливкам из стали 20ГЛ на предприятии АО «ПО «Бежицкая сталь» показывает (рис. 2), что несоответствие с повышенными требованиями по ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² достигается после первой ТО в 53% (782 плавки) и после второй ТО – в 39,34% (581 плавка) от общего количества плавков (1477 плавки).

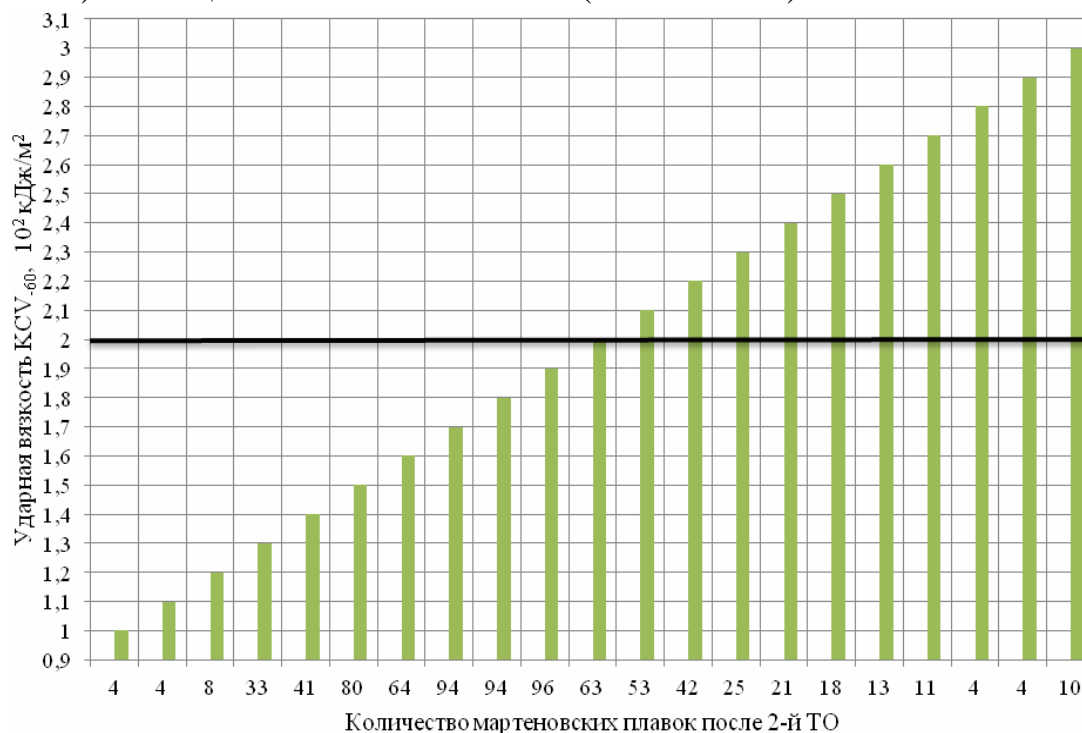


Рис. 2. Вариационная диаграмма ударной вязкости мартеновских плавков после 2-й ТО: (— $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м²)

На основании методики [2] построена частотная диаграмма (рис. 3), показывающая взаимосвязь между количеством мартеновских плавков, прошедших 2-ю ТО, и одинаковым уровнем ударной вязкости, с наложением микроструктуры зерна из образцов после 1-й [3] и 2-й ТО и различным уровнем ударной вязкости $KCV_{-60} < 2,0$ и $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² (табл. 1-2).

Технология выплавки мартеновской стали 20ГЛ и получения литейной формы в течение длительного периода времени не изменились, следовательно, основными факторами влияния на уровень ударной вязкости KCV_{-60} оказывает микроструктура отливок после 1-й и 2-й ТО и нестабильный химический состав стали 20ГЛ.

Технология по выплавке мартеновской стали 20ГЛ и получению литейной формы в течение длительного периода времени не менялись, следовательно, основными факторами влияния оказывает микроструктура отливок после термообработки и нестабильный химический состав стали 20ГЛ на уровень ударной вязкости KCV_{-60} .

Концентрацию химических элементов стали марки 20ГЛ определяли автоматическим анализатором немецкой фирмы OBLE модели GS 1000 с искровым вакуумным эмиссионным спектрометром с высоковольтным разрядом.

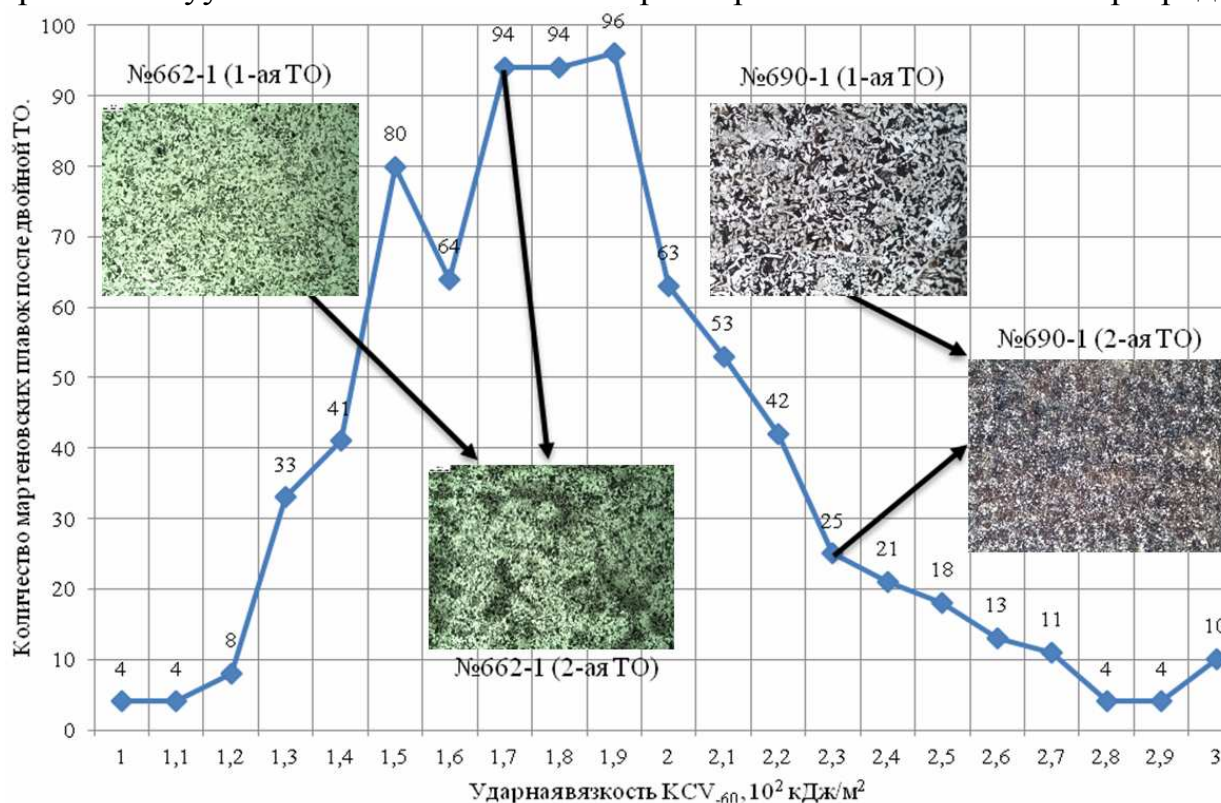


Рис. 3. Вариационная диаграмма количества мартеновских плавков после 2-й ТО с одинаковым уровнем ударной вязкости стали 20ГЛ (x100)

Табл. 1. Химический состав мартеновских плавков

№ плавки	Химический состав, %									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Al
662-1	0,18	1,19	0,34	0,017	0,02	0,10	0,10	0,14	0,003	0,045
690-1	0,21	1,37	0,39	0,02	0,018	0,16	0,10	0,12	0,004	0,027

Табл. 2. Механические свойства мартеновских плавков

№ плавки	Механические свойства					Заключение после 1-й ТО	KCV, кДж/м ²	Заключение после 2-й ТО
	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCV, кДж/м ²			
662-1	339,0	510,0	22,0	59,0	122,5–156,3	Не соотв.	130,0–188,8	Не соотв.
690-1	381,0	573,0	19,0	44,0	216,3–153,8	Не соотв.	207,5–205,3	Соотв.

Для оценки ударной вязкости применяют метод серийных испытаний на ударный изгиб образцов с различными типами надреза при понижающихся температурах по ГОСТ 9454–78.

Фотографии получали с помощью микроскопа Axiovert 40 MAT (Carl S) фирмы Карл Цейсс (Германия), а металлографический анализ микроструктуры стали 20ГЛ проводили согласно ГОСТ 5639-82 на основе программы Vestra Image System.

Отсутствие существенной разницы по средней площади зерна и их количеству (табл. 3) и повышенных значений ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² мартеновской плавки №662-1 (табл. 2) связано с практически идентичной микроструктурой образца из стали 20ГЛ, прошедшего 1-ю и 2-ю ТО (рис. 3).

Табл. 3. Распределение зерен на площади шлифа мартеновской плавки №662-1

1-ая ТО				2-ая ТО			
Балл зерна	Средняя площадь зерна, мм ²	Кол-во зерен, шт.	Кол-во зерен, %	Балл зерна	Средняя площадь зерна, мм ²	Кол-во зерен, шт.	Кол-во зерен, %
Номер 3	0,00874000	1	0,039140	Номер 4	0,00499400	3	0,060590
Номер 5	0,00228100	1	0,039140	Номер 5	0,00247700	11	0,222200
Номер 6	0,00131100	17	0,665400	Номер 6	0,00128200	22	0,444400
Номер 7	0,00065700	19	0,743600	Номер 7	0,00065470	68	1,373000
Номер 8	0,00033840	56	2,192000	Номер 8	0,00033230	165	3,333000
Номер 9	0,00012660	209	8,180000	Номер 9	0,00012000	700	14,140000
Номер 10	0,00004399	189	7,397000	Номер 10	0,00004315	474	9,574000
Номер 11	0,00002082	188	7,358000	Номер 11	0,00002152	510	10,300000
Номер 12	0,00001086	224	8,767000	Номер 12	0,00001121	460	9,291000
Номер 13	0,00000220	1651	64,620000	Номер 13	0,00000242	2538	51,260000

Проведенный металлографический и фотографический анализы микроструктуры образца (рис. 3), прошедшего 1-ю и 2-ю ТО, из стали 20ГЛ мартеновской плавки №690-1 наглядно демонстрирует существенную разницу по средней площади зерна и их количеству (табл. 4-5), что подтверждается повышенными значениями ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² (табл. 2).

Табл. 4. Распределение зерен на площади шлифа мартеновской плавки №690-1

1-ая ТО				2-ая ТО			
Балл зерна	Средняя площадь зерна, мм ²	Кол-во зерен, шт.	Кол-во зерен, %	Балл зерна	Средняя площадь зерна, мм ²	Кол-во зерен, шт.	Кол-во зерен, %
Номер 3	0,01072	4	0,219800	Номер 5	0,002693	2	0,02004
Номер 4	0,005809	5	0,274700	Номер 6	0,00121	10	0,1002
Номер 5	0,002794	8	0,439600	Номер 7	0,0006572	32	0,3207
Номер 6	0,001358	23	1,264000	Номер 8	0,0003261	127	1,273
Номер 7	0,0006796	35	1,923000	Номер 9	0,0001177	940	9,42
Номер 8	0,0003567	68	3,736000	Номер 10	0,00004302	966	9,68
Номер 9	0,0001303	223	12,250000	Номер 11	0,00002146	1213	12,16
Номер 10	0,00004371	129	7,088000	Номер 12	0,00001103	1205	12,08
Номер 11	0,00002162	168	9,231000	Номер 13	0,00000287	5484	54,96
Номер 12	0,00001101	185	10,160000				
Номер 13	0,00000238	972	53,410000				

Табл. 5. Сводная таблица мартеновских плавов №662-1 и №690-1

№ плавки, (ТО)	Кол-во зерен, шт.	Средняя площадь, мм ²	Средний балл зерна	Максимальный балл зерна	Минимальный балл зерна
662-1 (1)	2555	$4,28586181072934 \cdot 10^{-5}$	Номер 9	Номер 3	Номер 13
662-1 (2)	4951	$5,9877895663453 \cdot 10^{-5}$	Номер 9	Номер 4	Номер 13
690-1 (1)	1820	0,000118820158028589	Номер 9	Номер 3	Номер 13
690-1 (2)	9979	$2,87800698797696 \cdot 10^{-5}$	Номер 11	Номер 5	Номер 13

Отливки грузовых вагонов должны соответствовать предъявляемым к ним требованиям как по химическому составу, так и механическим свойствам согласно ГОСТ 32400 – 2013.

Статистический анализ химического состава стали 20ГЛ проводили с помощью программы Microsoft Excel.

Следует отметить бессистемность литературных данных о влиянии 2-й ТО в сочетании с углеродом и другими такими основными элементами, присутствующими в низколегированной стали 20ГЛ: марганцем, кремнием, серой, фосфором и т.д. [1].

Без подробного анализа этих данных невозможно решить задачу оптимизации химического состава стали 20ГЛ с целью получения стабильных значений ударной вязкости с V-образным надрезом $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² для ответственных отливок грузовых вагонов.

Для анализа сложившейся ситуации по ударной вязкости были взяты данные по химическому составу из образцов мартеновских плавов, прошедших 2-ю ТО.

Автор работы выбирал средние значения углерода и марганца и увязывал с определяемыми элементами в низколегированной стали 20ГЛ.

Влияние содержания Cr на ударную вязкость $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² тесно увязывается с Mn > 1,2% на верхнем пределе (табл. 6). При содержании C > 0,2% и Mn > 1,2% на верхних пределах или при C ≤ 0,2% на нижнем и Mn > 1,2 на верхнем пределах повышенное содержание Cr > 0,12% показывает удовлетворительные значения $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² (табл. 6). В остальных случаях Cr никак не проявил себя в качестве элемента, повышающего ударную вязкость в различных комбинациях (табл. 6).

Подобно Cr, независимо от содержания Ni и C на положительные результаты ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² оказывает влияние Mn > 1,2% на верхнем пределе (табл. 6). В частном случае, при сочетании C > 0,2% и Mn > 1,2% на верхних пределах и Ni ≤ 0,12% или C ≤ 0,2% на нижнем и Mn > 1,2% на верхнем пределах и Ni > 0,12% ударная вязкость показывает удовлетворительные результаты $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² (табл. 6).

Подобно Ni и Cr, независимо от содержания Si и C показывает наилучшие результаты по ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² при повышенном

содержании $Mn > 1,2\%$ (табл. 6). В остальных случаях Cu ведет себя так же, как Ni и Cr (табл. 6).

Независимо от содержания C , Ni , Cr , Cu и Si удовлетворительные результаты по ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² показывают плавки с $Mn > 1,2\%$ на верхнем пределе (табл. 6). В частном случае, положительные значения ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² имеют место при содержании $C \leq 0,2\%$ на нижнем пределе, $Mn > 1,2\%$ и $Si \geq 0,4\%$ на верхних пределах (табл. 6). В остальных случаях содержание Si в различных комбинациях не дает положительного эффекта на значения $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м².

Табл. 6. Сводная таблица мартеновских плавков, прошедших 2-ую ТО

Элемент, %	$C \leq 0,2\%; Mn > 1,2\%$		$C \leq 0,2\%; Mn \leq 1,2\%$		$C > 0,2\%; Mn > 1,2\%$		$C > 0,2\%; Mn \leq 1,2\%$	
	$KCV \leq 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV > 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV \leq 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV > 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV \leq 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV > 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV \leq 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV > 2,0$ 10^2 кДж/м ²
$Cr \leq 0,12$	67	78	99	54	99	151	74	52
$Cr > 0,12$	7	16	5	5	16	35	8	9
$Ni \leq 0,12$	57	72	85	46	88	124	57	39
$Ni > 0,12$	17	22	19	13	27	62	25	22
$Cu < 0,2$	45	55	64	28	66	83	48	27
$Cu \geq 0,2$	29	39	40	31	49	103	34	34
$Si < 0,4$	58	62	93	54	63	93	68	52
$Si \geq 0,4$	16	32	11	5	52	93	14	9
$(S+P) \leq 0,04$	33	45	69	31	84	87	62	34
$(S+P) > 0,04$	41	45	35	28	31	99	20	27
$Al \leq 0,04$	71	77	104	58	95	143	75	57
$Al > 0,04$	3	17	0	1	20	43	7	4
$Ti \leq 0,004$	53	61	78	51	75	112	65	42
$Ti > 0,004$	21	34	26	8	40	74	17	19

В таблице 6 показано суммарное влияние серы и фосфора ($S+P$) и углерода и марганца на значения ударной вязкости KCV_{-60} . Наилучшие результаты по $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² показывают плавки с содержанием $Mn > 1,2\%$ на верхнем пределе химического состава по и суммарном содержании $(S+P) > 0,04\%$ (табл. 6.). Этому факту есть объяснения в аспекте «сульфидный эффект», связанный с двояким участием сульфидов в процессе разрушения [1]. Разрушение сульфидов приводит к релаксации напряжений, а необходимость их огибания движущейся трещиной действует подобно затуплению её вершины, что приводит к повышению ударной вязкости KCV_{-60} .

Лучшие показатели по ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² связаны с повышенным содержанием $Mn > 1,2\%$ и $Al > 0,04$, независимо от содержания C (табл. 6.). В остальных случаях Al не оказывает положительного эффекта на значения ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² (табл. 6).

Независимо от содержания C и Ti на положительные значения ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² оказывает влияние $Mn > 1,2\%$ на верхнем пределе (табл. 6).

Выводы

В мартеновской плавке №690-1, прошедшей 2-ую ТО, существенную роль в получении удовлетворительных значений ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² сыграла микроструктура (рис. 3) образца из стали 20ГЛ, средняя площадь зерна и его количество (табл. 4-5).

Неоднозначная ситуация сложилась с мартеновской плавкой №662-1, где микроструктура (рис. 3) практически не изменилась, учитывая неметаллические включения [4], среднюю площадь зерна и его количество (табл. 3, 5), что явно сказалось на низких результатах ударной вязкости $KCV_{-60} < 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м².

При содержании $C > 0,2\%$ и $Mn > 1,2\%$ на верхних пределах допускаемой маркой 20ГЛ, влияние других сопутствующих элементов (Si, Cr, Ni, Cu, Al, Ti) не дает ощутимых результатов повышения $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м².

При содержании $C \leq 0,2\%$ на нижнем пределе и $Mn > 1,2\%$ на верхнем пределе допускаемой маркой 20ГЛ содержание остальных (Si, Cr, Ni, Cu, Al, Ti) должны быть на верхнем пределе по ГОСТ 32400 – 2013 для повышения $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м².

Серу и фосфор, отрицательно воздействующие на ударную вязкость KCV_{-60} , необходимо держать на минимально возможном уровне ($S < 0,02\%$ и $P < 0,02\%$), обеспечение которого возможно при введении модификаторов на основе редкоземельных и щелочноземельных элементов, способствующих выведению вредных примесей и измельчению зерна в стали 20ГЛ.

Для повышения значений по ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² необходимо иметь следующий химический состав стали 20ГЛ: $C = 0,17...0,25\%$; $Si \geq 0,4\%$; $S < 0,02\%$; $P < 0,02\%$; $Cr > 0,12\%$; $Ni > 0,12\%$; $Cu \geq 0,2\%$; $Al > 0,04\%$; $Ti > 0,004\%$, который близок по параметрам работы [5].

Список литературы

1. Солнцев Ю.П. Литейные хладостойкие стали / Ю.П. Солнцев, А.К. Андреев, Р.И. Гречин. – М.: Металлургия, 1991. – 176с.
2. Цой Б., Лаврентьев В.В. Основы создания материалов со сверхвысокими физическими характеристиками / Под ред. Э.М. Карташова, В.В. Шевелева. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 400 с.
3. Богданов Р.А. Влияние параметров зерна матрицы на ударную вязкость вагонных отливок из стали 20ГЛ / Р.А. Богданов, С.В. Давыдов, А.Г. Панов // Материалы международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», 19-20 февраля 2020г. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 50-56.
4. Богданов Р.А. Влияние неметаллических включений на ударную вязкость вагонных отливок из стали 20ГЛ / Р.А. Богданов, С.В. Давыдов, Д.Г. Чухчин // Материалы международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», 19-20 февраля 2020г. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 45-50.
5. Богданов Р.А. Влияние химического состава на ударную вязкость ответственных вагонных отливок из стали 20ГЛ / Р.А. Богданов, С.В. Давыдов, Д.А. Болдырев // Сталь. – 2019. – №12. – С. 48-51.

Сведения об авторе:

Богданов Роман Александрович, – к.т.н., доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», БГТУ, г. Брянск.