

КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ 20ГЛ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ВАГОННЫХ ОТЛИВОК

Богданов Р.А.

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

Ключевые слова: неметаллические включения, сталь 20ГЛ, балка надрессорная, рама боковая, статистический анализ, ударная вязкость.

Аннотация. На основе статистического и микрорентгеноспектрального анализов рассмотрели различные взаимосвязи между результатами ударной вязкости KCV₋₆₀ за весь период 2021 г. и неметаллическими включениями (НМВ) в образцах, включая химический состав литейной стали 20ГЛ, получаемой в электродуговых печах и применяемой для вагонных отливок: «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE IMPACT STRENGTH OF FREIGHT CAR CASTINGS AND THE CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL 20GL

Bogdanov R.A.

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Keywords: non-metallic inclusions, steel 20GL, spring beam, side frame, statistical analysis, impact strength.

Abstract. Based on statistical and micro-X-ray spectral analyses, various relationships were considered between the results of the KCV-60 impact strength for the entire period of 2021 and non-metallic inclusions (NMI) in samples, including the chemical composition of 20GL foundry steel produced in electric arc furnaces and used for carriage castings: "Side frame" and "Spring beam".

Введение

Несколько лет назад на предприятии АО «ПО «Бежицкая сталь» открыли современный цех №3, выпускающий крупное и мелкое литьё из стали марки 20ГЛ, получаемой в электродуговых печах ДПС-15 с основной футеровкой и применяемой для вагонных отливок: «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

Одним из крупных потребителей (заказчиков) литья с предприятия АО «ПО «Бежицкая сталь» является ОАО «РЖД», которое планомерно поднимает запросы к вагонным отливкам, в частности по ударной вязкости KCV₋₆₀ > 2,0 · 10² кДж/м², в связи с безопасностью и нагрузкой на перевозки железнодорожным транспортом.

Фактором определения объёма (375 плавов или 18,22%) с результатами ударной вязкости KCV₋₆₀ < 2,0 · 10² кДж/м² с учетом общего объёма (2058 плавов) за весь период 2021 г. является вариационная диаграмма (рис. 1), построенная по методике [1, с. 47].

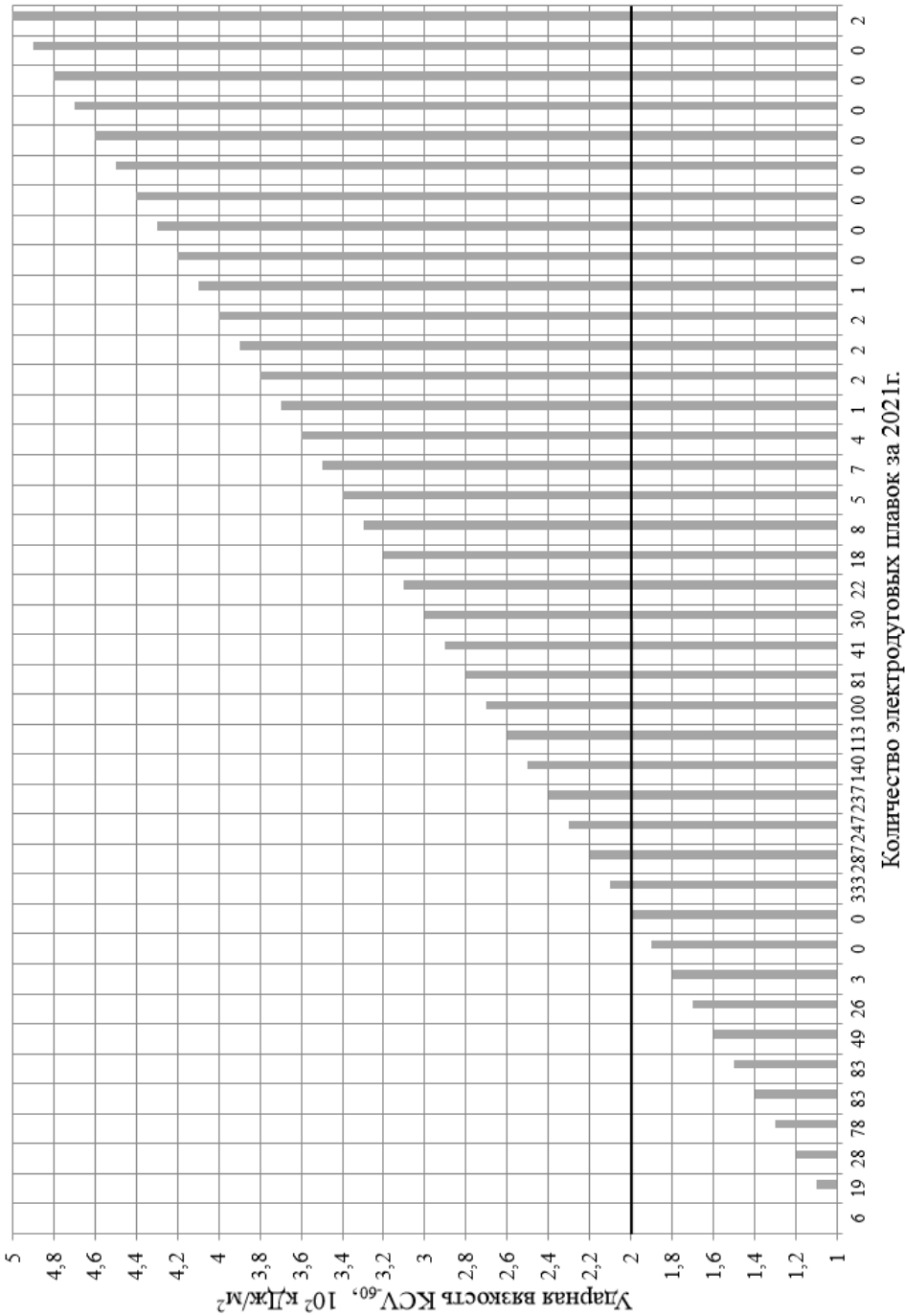


Рис. 1. Вариационная диаграмма между одинаковыми значениями ударной вязкостью стали 20ГЛ и количеством электродуговых плавков ($\text{--- KCV}_{60} > 2,0 \cdot 10^2 \text{ кДж/м}^2$)

Многообразие литературных данных о воздействии на значения ударной вязкости KCV_{60} не дают четкого и ясного представления о комплексном подходе в отличие от рассматриваемого индивидуального анализа, например: изменчивый химический состав литейной стали 20ГЛ [2, с. 50] и термообработка [3, с. 43], легирование [4, с. 212] и модифицирование [5, с. 30], технология выплавки и неметаллические включения [6, с. 50].

Цель работы – внесения ясности в аспекте совокупного влияния неметаллических включений (НМВ) и химического состава литейной стали марки 20ГЛ на показатели ударной вязкости $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м².

Методика проведения исследований

На маятниковом копре "PSd 450-2" (WPM Leipzig GmbH) измеряли ударную вязкость согласно ГОСТ 9454-78 с V-образным надрезом при низких температурах (–60°C).

Программой Microsoft Excel 2016г осуществляли взаимосвязь между химическим составом литейной стали 20ГЛ и вариативными показателями ударной вязкости KCV_{-60} электродуговых плавок за весь период 2021г.

Объем химических компонентов в литейной стали 20ГЛ определяли анализатором немецкой фирмы Spectro Analytical Instruments GmbH модели "SPECTROMAXh".

Используемый на предприятии АО «ПО «Бежицкая сталь» ГОСТ 32400-2013 для литейной стали 20ГЛ содержит определенный химический состав, %: С = 0,17...0,25; Mn = 1,10...1,40; Si = 0,3...0,5; не более S < 0,02; P < 0,02; Cr < 0,3; Ni < 0,3; Cu < 0,6; Al = 0,02...0,06.

Электронную фрактографию с рентгеноспектральным микроанализом изломов образцов электродуговых плавок с ударной вязкостью $KCV_{-60} < 2,0$, и выше $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² осуществляли на электронном растровом микроскопе Zeiss SIGMA VP фирмы «Carl Zeiss» (Германия).

Экспериментальной базой выступили образцы, полученные в электродуговых печах за 2021 г., с различной ударной вязкостью и практически одинаковым химическим составом (табл. 1).

Табл. 1. Химический состав и значения ударной вязкости образца

№ образца	Химический состав, %										KCV, кДж/м ²	Заключение
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Al		
1	0,20	1,11	0,34	0,011	0,019	0,13	0,13	0,18	0,004	0,034	148,8	Не соотв.
2	0,18	1,15	0,36	0,013	0,022	0,09	0,08	0,15	0,004	0,037	286,0	Соотв.

Результаты исследований и их обсуждение

Согласно статистическому анализу (табл. 2) между химическим составом литейной стали 20ГЛ и вариативными значениями ударной вязкости KCV_{-60} имеется взаимосвязь, показывающую низкую разницу по количеству электродуговых плавок с ударной вязкостью $KCV_{-60} < 2,0$ и $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м², связанную с верхним пределом С > 0,2% и нижним пределом Mn > 1,2% и независимым содержанием остальных элементов.

Наиболее оптимальный вариант разницы по количеству электродуговых плавок (табл. 2) с ударной вязкостью $KCV_{-60} < 2,0$ и $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² виден с низким содержанием С ≤ 0,2% и высоким Mn > 1,2%, но при этом содержание сопутствующих элементов должно быть на минимуме (%) –

$Si \leq 0,4$; $(S+P) \leq 0,04$; $Cr \leq 0,12$ и максимуме (%) – $Ni > 0,12$; $Cu \geq 0,12$; $Ti > 0,003$; $Al > 0,04$.

На должном уровне можно видеть разницу по количеству электродуговых плавок (табл. 2) с ударной вязкостью $KCV_{-60} < 2,0$ и $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² с высоким содержанием (%) – $C > 0,2$; $Mn > 1,2$; $Al > 0,04$; $Cu \geq 0,12$, но с низким содержанием – $Ti \leq 0,003\%$.

При обособленном изучении S и P (табл. 3-4) можно выделить существенную разницу по количеству электродуговых плавок (табл. 2) с ударной вязкостью $KCV_{-60} < 2,0$ и $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² с низким содержанием $C \leq 0,2\%$ и $S \leq 0,02\%$, высоким содержанием $Mn > 1,2\%$ и вариативным содержанием P (табл. 3-4), а также при максимуме (%) – $C > 0,2$ и $Mn > 1,2$ и минимуме (%) – $S \leq 0,02$ и $P \leq 0,02$ (табл. 3).

Табл. 2. Сводная таблица электродуговых плавок за весь 2021 г.

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
Si<0,4	67	439	97	306	59	298	84	249
Si≥0,4	27	177	4	25	24	143	16	43
(S+P)≤0,04	90	612	103	325	83	436	100	281
(S+P)>0,04	1	7	1	7	0	7	0	5
Cr≤0,12	11	82	19	48	10	45	18	34
Cr>0,12	83	534	82	283	73	396	82	258
Ni≤0,12	86	534	94	281	71	380	91	256
Ni>0,12	8	82	7	50	12	61	9	36
Cu<0,12	82	551	88	299	79	394	95	259
Cu≥0,12	9	68	16	33	4	49	5	27
Ti≤0,003	90	610	103	330	82	442	99	285
Ti>0,003	1	9	1	2	1	1	1	1
Al≤0,04	37	175	48	155	27	117	49	126
Al>0,04	57	441	53	176	56	324	51	166

Табл. 3 Сводная таблица электродуговых плавок за весь 2021 г.

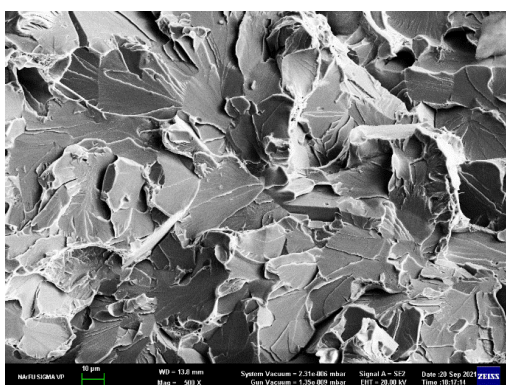
№	$C \leq 0,2$; $Mn > 1,2$ $P \leq 0,02$		$C \leq 0,2$; $Mn \leq 1,2$ $P \leq 0,02$		$C > 0,2$; $Mn > 1,2$ $P \leq 0,02$		$C > 0,2$; $Mn \leq 1,2$ $P \leq 0,02$	
	$KCV \leq 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV > 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV \leq 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV > 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV \leq 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV > 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV \leq 2,0$ 10^2 кДж/м ²	$KCV > 2,0$ 10^2 кДж/м ²
$S \leq 0,02$	83	558	93	298	67	403	89	252
$S > 0,02$	8	44	9	27	10	30	8	28

Сопоставление фрактографических изломов образцов №1 (рис. 2) и №2 (рис. 3), соответственно, ударная вязкость $KCV_{-60} < 2,0$ и свыше $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м², выявило существенные отличия практически по всему весовому содержанию одних тех же химических элементов в точке НМВ и анализируемой области (табл. 5-6).

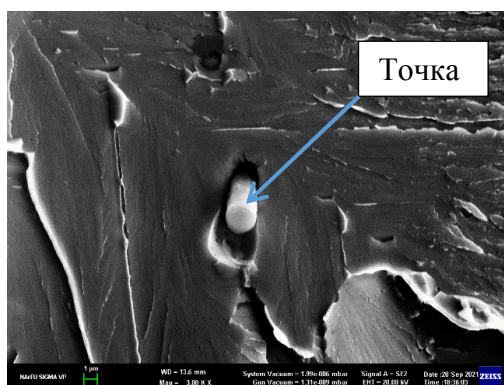
Ручьистый узор микрорельефа металлической матрицы виден на образце №1 (рис. 2) с типичным хрупким изломом и ударной вязкостью $KCV_{-60} < 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м². Однако ямочный микрорельеф образца №2 (рис. 3) с ударной вязкостью свыше $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² характерен для вязкого излома.

Табл. 4 Сводная таблица электродуговых плавок за весь 2021 г.

№	C≤0,2; Mn>1,2 P>0,02		C≤0,2; Mn≤1,2 P>0,02		C>0,2; Mn>1,2 P>0,02		C>0,2; Mn≤1,2 P>0,02	
	KCV≤2,0 10 ² кДж/м ²	KCV>2,0 10 ² кДж/м ²	KCV≤2,0 10 ² кДж/м ²	KCV>2,0 10 ² кДж/м ²	KCV≤2,0 10 ² кДж/м ²	KCV>2,0 10 ² кДж/м ²	KCV≤2,0 10 ² кДж/м ²	KCV>2,0 10 ² кДж/м ²
	S≤0,02	0	17	2	6	6	9	3
S>0,02	0	0	0	1	0	1	0	1

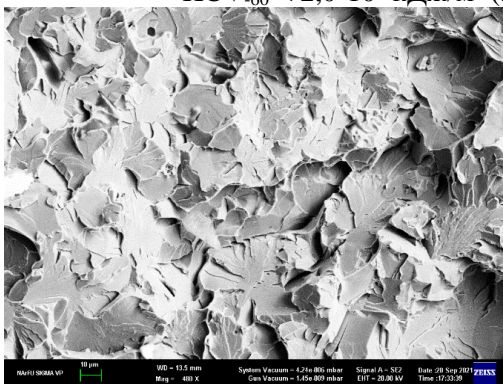


а

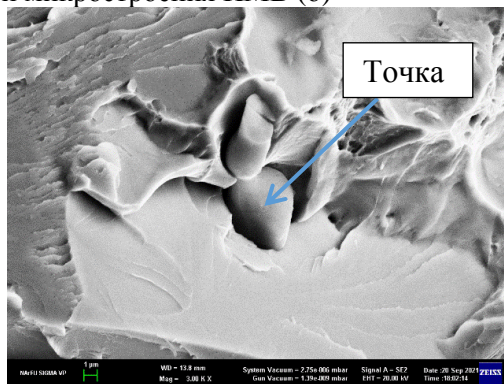


б

Рис. 2. Фрактограмма скола образца №1 из стали 20ГЛ с ударной вязкостью $KCV_{-60} < 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² (а) и микростроения НМВ (б)



а



б

Рис. 3. Фрактограмма скола образца №2 из стали 20ГЛ с ударной вязкостью $KCV_{-60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м² (а) и микростроения НМВ (б)

Так, весовое содержание элементов в анализируемой области между образцом №1 и образцом №2 (табл. 5) имеет существенную разницу по С и Mn, но с минимальным отличием по Si и Fe.

Сличение образцов №1 и №2 по весовому содержанию химических элементов в точке НМВ (табл. 6) показывает существенные различия по С, Fe, Mn и S, а также наличием О и F, соответственно, образец №1 и №2.

Табл. 5. Показатели микрорентгеноспектрального анализа образцов и стали 20ГЛ электродуговых плавок

№ рисунка	Весовое содержание элементов в анализируемой области, %			
	С	Si	Fe	Mn
Рис. 2,а	13,3	0,42	85,27	1,0
Рис. 3,а	6,29	0,48	91,71	1,53

Табл. 6. Элементный состав изучаемой частицы в образце из стали 20ГЛ электродуговых плавок

№ рисунка	Весовое содержание химических элементов в точке, %					
	С	Fe	Mn	О	S	F
Рис. 2,б	30,09	13,44	29,96	7,16	19,35	–
Рис. 3,б	13,25	6,09	42,94	–	30,36	7,35

Выводы

Статистический анализ электродуговых плавок с различной ударной вязкостью KCV_{60} выявил наиболее оптимальный диапазон химического состава литейной стали 20ГЛ: минимум (%) – $C \leq 0,2$; $Si \leq 0,4$; $(S+P) \leq 0,04$; $Cr \leq 0,12$ и максимум (%) – $Mn > 1,2$; $Ni > 0,12$; $Cu \geq 0,12$; $Ti > 0,003$; $Al > 0,04$.

Обосновывается предположение, что повышенное содержание S в неметаллических включениях (образец №2) уменьшило её концентрацию по границам зерен, что сказалось на результате ударной вязкости свыше $KCV_{60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м².

Однозначно можно утверждать, что термическая обработка (нормализация) измельчает зерно, которое содействует возникновению ступенчатого микрорельефа (рис. 3, а) в образце №2 и значению ударной вязкости свыше $KCV_{60} > 2,0 \cdot 10^2$ кДж/м².

Список литературы

1. 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.
2. Богданов Р.А., Давыдов С.В., Болдырев Д.А. Влияние химического состава на ударную вязкость ответственных вагонных отливок из стали 20ГЛ // Сталь. – 2019. – №12. – С. 48-51.
3. Богданов Р.А. Влияние химического состава и параметров зерна матрицы после двойной термообработки на ударную вязкость ответственных вагонных отливок

- из стали 20ГЛ // Технология машиностроения и материаловедение. – 2020. – №4. – С. 41-47.
4. Солнцев Ю.П. Хладостойкие стали и сплавы: учебник для вузов. – СПб.: Химиздат, 2017. – 476 с.
 5. Богданов Р.А. Воздействие модифицирования на свойства хладостойкой стали 20ГЛ // Технологические исследования: информационное обеспечение, алгоритм проведения, интерпретация результатов. сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак, 2020. – С. 28-33.
 6. Богданов Р.А. Управление качеством вагонных отливок из стали 20ГЛ в аспекте влияния неметаллических включений // Технология машиностроения и материаловедение. – 2020. – №4. – С. 48-52.

References

1. Tsoi B., Lavrentiev V.V. Fundamentals of creating materials with ultra-high physical characteristics / Edited by E.M. Kartashov, V.V. Shevelev. – M.: Energoatomizdat, – 2004. – 400 p.
2. Bogdanov R.A., Davydov S.V., Boldyrev D.A. The influence of chemical composition on the impact strength of critical carriage castings made of steel 20GL // Steel. 2019, no. 12, pp. 48-51.
3. Bogdanov R.A. The influence of the chemical composition and parameters of the matrix grain after double heat treatment on the impact strength of critical carriage castings made of steel 20GL // Technology of mechanical engineering and materials science. 2020, no. 4, pp. 41-47.
4. Solntsev Yu. P. Cold-resistant steels and alloys: textbook for universities. – SPb.: Himizdat, 2017. – 476 p.
5. Bogdanov R.A. The effect of modification on the properties of cold-resistant steel 20GL // Technological research: information support, algorithm, interpretation of results. collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference. – Sterlitamak. 2020. – P. 28-33.
6. Bogdanov R.A. Quality management of 20GL steel carriage castings in the aspect of the influence of non-metallic inclusions // Technology of mechanical engineering and materials science. 2020, no. 4, pp. 48-52.

Богданов Роман Александрович – кандидат технических наук, доцент	Bogdanov Roman Alexandrovich – candidate of technical sciences, associate professor
Lpim-bra@yandex.ru	

Received 25.06.2023