



УДК 621.74:669.15

СРАВНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТАЛИ 20ГЛ ДЛЯ ОТЛИВОК «РАМА» И «БАЛКА», ВЫПЛАВЛЕННЫХ В ПЕЧАХ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА

*А. В. ЧАЙКИН, В. А. ЧАЙКИН, Смоленское региональное отделение общероссийской общественной организации «Российская ассоциация литейщиков», г. Сафоново, Россия, Смоленская обл., ул. Советская, д. 47. E-mail: sro_ral@mail.ru.
В. Н. ШЕВЧЕНКО, ООО «ВКМ–Сталь», г. Саранск, Россия, Александровское шоссе, 22.*

В РФ предполагается изготовление новых вагонов с более высокими технико-экономическими показателями и сроками службы. В связи с этим необходимо повышать эксплуатационную надежность самых нагруженных деталей вагонных тележек «Балка наддрессорная» и «Рама боковая». Такие отливки производит ООО «ВКМ–Сталь». Их отливают из стали 20ГЛ по ГОСТ 32400. Плавка стали в ООО «ВКМ–Сталь» ведется в дуговых печах с основной футеровкой. На заводе используются печи как переменного тока ДСП-16, так и постоянного тока ДСП-12. Появилась уникальная возможность сравнить качественные показатели стали 20ГЛ, достигаемые при выплавке в печах постоянного и переменного токов. Задача сравнения качественных показателей сталей решалась с использованием возможностей пассивного эксперимента статистической обработкой и регрессионным анализом представленных заводом данных в пакете STATISTICS & ANALYSIS v.12.0. Stat Soft, Inc. Были обработаны результаты анализов 51 плавки стали 20ГЛ, выплавленных в печи ДСП-16 переменного тока № 1, а также 31 и 22 плавки, выплавленных в печах постоянного тока ДСП-12 № 2 и 3, что достаточно для объективной оценки технологического процесса плавки и сравнения качества стали, выплавленных в различных печах. Анализ показал, что нет существенных различий во всех показателях качества сталей, выплавленных в печах постоянного и переменного тока. Обе печи позволяют получать сопоставимые высокие механические свойства стали, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 32400 и обеспечивать эксплуатационную надежность отливок «Рама» и «Балка».

Ключевые слова. *Электродуговая печь, плавка стали, статистический анализ, механические свойства, химический состав, температура заливки.*

COMPARISON OF THE PERFORMANCE INDICATORS OF 20GL STEEL FOR “FRAME” AND “BEAM” CASTINGS, PRODUCED IN ALTERNATING AND DIRECT CURRENT FURNACES

*A. V. CHAYKIN, V. A. CHAYKIN, Smolensk Regional Branch of the All-Russian Public Organization “Russian Association of Foundrymen”, Safonovo, Russia, Smolensk region, 47, Sovetskaya str.
E-mail: sro_ral@mail.ru.
V. N. SHEVCHENKO, LLC “VKM – Steel”, Saransk, Russia, 22, Aleksandrovskoe Shosse.*

In the Russian Federation, new wagons are planned to be produced with improved technical and economic characteristics and longer service life. In this regard, it is necessary to enhance the operational reliability of the most heavily loaded components of railway bogies, such as the “side frame” and “bolster beam.” These castings are produced by LLC “VKM Steel.” At the plant, they are cast from 20GL steel in accordance with GOST 32400. The steel is melted in arc furnaces with basic lining. The plant uses both alternating current (AC) furnaces, such as the DSP-16, and direct current (DC) furnaces, such as the DPS-12. This has provided a unique opportunity to compare the quality characteristics of 20GL steel produced in AC and DC furnaces. The comparison of the quality characteristics of the steel was carried out using passive experimentation with statistical processing and regression analysis of the data provided by the plant, using the STATISTICS & ANALYSIS v.12.0 software package by Stat Soft, Inc. The study processed the results of 51 heats of 20GL steel melted in the DSP-16 AC furnace No. 1, as well as 31 and 22 heats from the DSP-12 DC furnaces No. 2 and 3, respectively. This provided a sufficient dataset for an objective evaluation of the steel melting process and a comparison of the quality of steel produced in different types of furnaces. The analysis revealed that there are no significant differences in the quality indicators of steel produced in AC and DC furnaces. Both types of furnaces allow the production of steel with comparable high mechanical properties, meeting the requirements of GOST 32400 and ensuring the operational reliability of the “Frame” and “Beam” castings.

Keywords. *Arc furnace, steel melting, statistical analysis, mechanical properties, chemical composition, pouring temperature.*

Введение

ООО «ВКМ–Сталь» производит из стали 20ГЛ отливки «Балка надрессорная» (далее – «Балка») и «Рама боковая» (далее – «Рама») [1], требования к которым регламентирует ГОСТ 32400-2013 (далее – ГОСТ 32400) [2] (табл. 1, 2).

Таблица 1. Рекомендуемый химический состав стали для отливок «Рама», «Балка» по ГОСТ 32400

Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	V	Al	S	P	Cr	Ni	Cu
20ГФЛ	0,17–0,25	0,30–0,50	0,90–1,40	0,07–0,13	0,02–0,06	0,02	0,02	0,30	0,30	0,60
20ГЛ	0,17–0,25	0,30–0,50	1,10–1,40	–	0,02–0,06	0,02	0,02	0,30	0,30	0,60

Таблица 2. Механические свойства стали для отливок «Рама», «Балка» по ГОСТ 32400

Категория свойств	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСВ ⁻⁶⁰ , кДж/м ²
1	300	500	20	35	200*
2	343	510	18,0	30,0	

* С 01.01.2016.

Плавка стали в ООО «ВКМ–Сталь» ведется в дуговых печах с основной футеровкой. На заводе используют печи как переменного тока (ДСП-16), так и постоянного (ДСП-12). Таким образом, появилась уникальная возможность сравнить качественные показатели стали 20ГЛ, достигаемые при выплавке в печах постоянного и переменного тока.

Постановка задачи

Работа посвящена сравнению качественных показателей стали 20ГЛ, достигаемых при выплавке в печах постоянного и переменного тока с применением дисперсных материалов производства ООО «Металлург» СОАЛ (<https://metallurg-ral.ru>), для ответственных железнодорожных отливок.

Методика исследований

Плавки проводили в ноябре 2023 г. Для выплавки стали в печах постоянного и переменного тока применяли однотипные шихтовые материалы. При анализе качественных показателей стали использовали статистическую обработку и регрессионный анализ экспериментальных данных в пакете STATISTICS & ANALISIS v.12.0 Stat Soft, Inc [3, 4]. В работе решали задачу сравнения качественных показателей сталей.

Описание процесса и обсуждение результатов

Вначале произвели статистический и регрессионный анализ результатов предоставленных плавов, выплавленных в печи переменного тока. Результаты статистической обработки приведены в табл. 3.

Концентрации основных элементов, определяющих качество стали, которые обеспечивают сталевары во время выплавки добавками ферросплавов расчетным путем, достаточно хорошо согласуются с требованиями ГОСТ 32400.

Вредное влияние S на механические свойства стали бесспорно. Для ее успешного удаления на заводе внедрили технологический процесс, обеспечивающий более эффективное диффузионное раскисление стали. Для этого взамен раскислительной смеси, ранее используемой на заводе и состоящей из дробленых коксика, ФС65 и алюминиевой крупки, внедрили раскислитель диффузионный алюмосодержащий (РДА) производства ООО «Металлург» СОАЛ в количестве 3 кг на 1 т жидкой стали. РДА обладает высокими реакционными возможностями и способностью вспенивать и эффективно раскислять шлак [5]. В основу разработанной раскислительной смеси положены порошки углеродсодержащего материала (УСМ), кремнийсодержащего материала (КСМ) и сильнейшего раскислителя – алюмосодержащего материала (АСМ). Кроме того, в состав смеси введено рациональное количество реагентов, состоящих из кальций-стронциевого карбоната, соединений калия и натрия, которые придают ей жидкоподвижность и еще больше активизируют. Основное отличие порошков заключается в том, что

Таблица 3. Данные статистической обработки результатов плавков, выплавленных в печи переменного тока № 1

Переменные	Descriptive Statistics (BKM–Сталь печь № 1)						
	Количество плавков	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднее кв. отклонение	Коэффициент вариации V, %
C, %	51	0,215	0,190	0,250	0,0003	0,01592	7,41429
Mn, %	51	1,195	1,080	1,410	0,0070	0,08372	7,00666
Si, %	51	0,387	0,300	0,570	0,0029	0,05399	13,93575
P, %	51	0,019	0,015	0,024	0,0000	0,00209	11,28713
Cr, %	51	0,161	0,080	0,370	0,0050	0,07055	43,93376
Ni, %	51	0,091	0,060	0,140	0,0003	0,01746	19,19624
Cu, %	51	0,103	0,080	0,150	0,0003	0,01657	16,03846
S, %	51	0,015	0,010	0,022	0,0000	0,00253	17,05057
Al, %	51	0,038	0,027	0,060	0,0001	0,00757	19,94351
σ_T , МПа	51	352,667	309,000	400,000	739,7867	27,19902	7,71239
σ_B , МПа	51	530,863	502,000	580,000	455,6808	21,34668	4,02113
δ , %	51	25,373	20,000	32,000	9,0384	3,00640	11,84902
Ψ , %	51	52,961	36,000	64,000	54,1184	7,35652	13,89051
KCV ⁶⁰ , кДж/м ²	51	216,098	202,000	233,000	77,4902	8,80285	4,07355
$T_{заль}$, °C	51	1575,471	1563,000	1591,000	35,6141	5,96776	0,37879

они обладают высокой дисперсностью, что существенно увеличивает удельную поверхность частиц смеси и придает ей высокую реакционную способность [6, 7]. Это привело к снижению концентраций S в металле и повышению механических свойств. В процессе внедрения выявлены преимущества смеси РДА: она фасуется в пакеты по 3 кг, что снижает трудоемкость работы сталеваров, облегчает точность дозирования и контроль за рациональным расходом материала. В результате среднее содержание S в анализируемых плавках стали 0,015%, т.е. существенно ниже требуемого ГОСТ 32400 (0,02%). Это свидетельствует об удовлетворительном проведении сталеварами восстановительных периодов плавки и высоком качестве РДА.

Далее в ходе исследования произвели анализ механических свойств стали, выплавленной в печи № 1. Наиболее важный, структурно зависящий показатель – ударная вязкость с острым надрезом при температуре –60 °C отличается высокой стабильностью ($V=4,07\%$) (табл. 3). Средние и минимальные значения ударной вязкости соответствуют требованиям ГОСТ 32400.

Результаты статистического анализа 31 плавки, выплавленной в ноябре 2023 г. на печи № 2, приведены в табл. 4, а на печи № 3 – в табл. 5.

Затем сравнили результаты статистической обработки качественных показателей стали, выплавленной в печах постоянного тока № 2, 3. Из таблиц видно, что результаты химического анализа,

Таблица 4. Данные статистической обработки результатов плавков, выплавленных в печи постоянного тока № 2

Переменные	Descriptive Statistics (STATISTICA BKM–Сталь печь № 2)						
	Количество плавков	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднее кв. отклонение	Коэффициент вариации V, %
C, %	31	0,212	0,160	0,250	0,0003	0,01734	8,19379
Mn, %	31	1,166	1,060	1,330	0,0039	0,06217	5,33283
Si, %	31	0,390	0,320	0,470	0,0018	0,04239	10,85918
P, %	31	0,018	0,015	0,022	0,0000	0,00181	10,14186
Cr, %	31	0,183	0,110	0,480	0,0047	0,06837	37,38109
Ni, %	31	0,087	0,060	0,140	0,0006	0,02358	27,17147
Cu, %	31	0,096	0,080	0,110	0,0001	0,00720	7,51428
S, %	31	0,013	0,008	0,018	0,0000	0,00231	17,56164
Al, %	31	0,043	0,028	0,056	0,0000	0,00699	16,42765
σ_T , МПа	31	354,742	303,000	400,000	754,9978	27,47722	7,74569
σ_B , МПа	31	532,032	504,000	582,000	313,8989	17,71719	3,33010
δ , %	31	25,484	20,000	32,000	7,9914	2,82691	11,09292
Ψ , %	31	55,645	42,000	64,000	28,4366	5,33259	9,58321
KCV ⁶⁰ , кДж/м ²	31	217,194	202,000	235,000	73,7613	8,58844	3,95428
$T_{заль}$, °C	31	1574,742	1565,000	1594,000	63,1978	7,94971	0,50483

Таблица 5. Результаты статистической обработки результатов плавки, выплавленных в печи постоянного тока № 3

Переменные	Descriptive Statistics (STATISTICA BKM–Сталь печь № 3)						
	Количество плавки	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднее кв. отклонение	Коэффициент вариации V, %
C, %	21	0,209	0,190	0,250	0,000	0,01374	6,57373
Mn, %	21	1,159	1,070	1,330	0,004	0,06074	5,24030
Si, %	21	0,395	0,330	0,490	0,002	0,04118	10,43283
P, %	21	0,018	0,014	0,024	0,000	0,00230	12,94964
Cr, %	21	0,151	0,110	0,250	0,001	0,03192	21,14741
Ni, %	21	0,093	0,070	0,140	0,000	0,01494	16,01179
Cu, %	21	0,107	0,080	0,140	0,000	0,01560	14,62420
S, %	21	0,015	0,010	0,021	0,000	0,00322	21,51344
Al, %	21	0,042	0,032	0,053	0,000	0,00563	13,53828
σ_T , МПа	21	348,238	308,000	494,000	2765,990	52,59268	15,10251
σ_B , МПа	21	521,048	502,000	566,000	344,048	18,54852	3,55985
δ , %	21	24,667	18,000	32,000	14,533	3,81226	15,45511
Ψ , %	21	49,381	28,000	64,000	86,248	9,28696	18,80676
KCV ⁻⁶⁰ , кДж/м ²	21	214,476	193,000	240,000	107,362	10,36156	4,83110
$T_{зал}$, °C	21	1572,429	1540,000	1584,000	76,857	8,76682	0,55753

механических свойств и температур заливок сопоставимы по всем параметрам. Кроме того, качественные показатели печей постоянного тока сопоставимы не только между собой, но и с результатами, полученными при выплавке стали в печи переменного тока № 1. Тестирование по *t*-критерию показало, что нет существенных различий у KCV⁻⁶⁰ сталей, выплавленных в печах № 1, 3 и печах № 2, 3. Также нет существенных различий во всех других показателях качества стали, выплавленной в печах постоянного и переменного тока.

Выводы

1. Печи постоянного и переменного тока позволяют:
 - стабильно получать сопоставимые высокие механические свойства стали 20 ГЛ, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 32400, и обеспечивать эксплуатационную надежность отливок «Рама» и «Балка»;
 - обеспечивать показатели основных химических элементов, хорошо согласующиеся с требованиями ГОСТ 32400, с близкими друг к другу значениями, отличающимися высокой стабильностью;
 - поддерживать стабильность температуры заливки, что дает возможность успешно бороться с браком по пригару, неспаям и недоливам.
2. Диффузионный раскислитель РДА производства ООО «Металлург» СОАЛ одинаково эффективен в печах как постоянного, так и переменного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якушев, А. В. Прогнозирование усталостного ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов: моногр. / А. В. Якушев, В. И. Миронов, Я. О. Рuzметов. – Ташкент: Complex Print, 2021. – 136 с.
2. ГОСТ 32400-2013. Рама боковая и балка наддресорная. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2014. – 50 с.
3. Салин, В. Н. Статистика: учеб. / В. Н. Салин, Е. П. Шпаковская, Э. Ю. Чурилова. – М.: КНОРУС, 2018. – 328 с.
4. Салин, В. Н. Практикум по курсу «Статистика» (в системе STATISTICA): учеб. пособ. / В. Н. Салин, Э. Ю. Чурилова. – М.: Социальные отношения, 2002. – 185 с.
5. Новый материал для диффузионного раскисления в агрегате комплексной обработки сталей / А. В. Чайкин [и др.] // Черные металлы. – 2018. – № 9. – С. 6–11.
6. Внедрение инноваций при выплавке стали для ответственных отливок тележек грузовых вагонов в целях повышения их эксплуатационной надежности / А. В. Чайкин [и др.] // Черные металлы. – 2021. – № 9. – С. 9–13.
7. Чайкин, А. В. Научные основы инновационных технологий печной и внепечной обработки чугунов и сталей для отливок ответственного назначения: моногр. / А. В. Чайкин. – СПб.: Научно-технологические, 2022. – 245 с.

REFERENCES

1. Yakushev A. V., Mironov V. I., Ruzmetov Ya. O. *Prognozirovanie ustalostnogo resursa litykh detalej telezhek gruzovykh vagonov: monogr.* [Forecasting the fatigue life of cast parts of freight car bogies: monograph.]. Tashkent, Complex Print Publ., 2021, 136 p.
2. *GOST 32400-2013. Rama bokovaya i balka nadressornaya. Tekhnicheskie usloviya* [Molded side frame and bolster beam of bogies for railway freight wagons. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 50 p.
3. Salin V. N., Shpakovskaya E. P., Churilova E. Yu. *Statistika: uchebnik* [Statistics: textbook]. Moscow, KNORUS Publ., 2018, 328 p.

4. **Salin V.N., Churilova E. Yu.** *Praktikum po kursu "Statistika" (v sisteme STATISTICA): ucheb. posobie* [Workshop on the course "Statistics" (in the STATISTICA system)]. Moscow, Social relations Publ., 2002, 185 p.
5. **Chaikin A.V., Chaikin V.A., Kasimgazinov A.D., Bykov P.O.** Novyj material dlya diffuzionnogo raskisleniya v agregate kompleksnoj obrabotki stalej [New material for diffusion deoxidation in a unit for complex processing of steels]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2018, no. 9, pp. 6–11.
6. **Chaykin A.V., Chaikin V.A., Kolpakov V.V., Vdovin K.N.** Vnedrenie innovacij pri vyplavke stali dlya otvetstvennyh otlivok telezhek gruzovyh vagonov v celyah povysheniya ih ekspluatacionnoj nadezhnosti [Introduction of innovations in steel smelting for critical castings of freight car bogies in order to increase their operational reliability]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2021, no. 9, pp. 9–13.
7. **Chaikin A.V.** *Nauchnye osnovy innovacionnyh tekhnologij pechnoj i vnepechnoj obrabotki chugunov i stalej dlya otlivok otvetstvennogo naznacheniya: monogr.* [Scientific foundations of innovative technologies for furnace and non-furnace processing of cast iron and steel for critical purpose castings: monograph.]. St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2022, 245 p.