



УДК 621.74:669

ВЛИЯНИЕ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАФИНИРУЮЩЕЙ СМЕСЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОЙ (PCY) НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОТЛИВОК АВТОСЦЕПКИ ИЗ СТАЛИ 20ГЛ, ВЫПЛАВЛЕННЫХ В ПЕЧАХ С КИСЛОЙ ФУТЕРОВКОЙ

*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.*

Дуговые печи с кислой футеровкой применяют чаще всего при выплавке низкоуглеродистой и углеродистой стали для фасонного литья. Сталь, выплавленная в кислой печи, намного экономичнее основной. Вместе с тем существенным недостатком кислых печей является невозможность осуществления в них процессов дефосфорации и десульфурации металла и, как следствие, потребность в чистых шихтовых материалах по сере и фосфору. В результате металл, выплавленный в ДСП с кислой футеровкой, обладает пониженными пластическими свойствами, что обуславливается присутствием в металле хрупких кремниевых включений, выделяющихся по границам зерен. Целью работы явилось повышение механических свойств кислой стали с использованием внепечного рафинирования металла от серы, фосфора, газов и неметаллических включений.

ООО «ВКМ–Сталь» производит отливки из стали 20ГЛ для автоматической сцепки железнодорожных вагонов. Наиболее ответственные детали: корпус автосцепки и тяговый хомут относят к деталям первой группы. Детали первой группы и замок подвергаются закалке в воде и высокому отпуску.

Для повышения механических свойств отливок из стали 20ГЛ для автосцепки на заводе применили обработку стали в ковше рафинирующей смесью универсальной (PCY) производства ООО «Металлург» СОАЛ. Особенностью смеси PCY является то, что она изготовлена на основе системы оксидов $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2$ и карбонатов CaCO_3 и SrCO_3 . Смесью характеризуется отсутствием гидратации и сепарации, а также большей скоростью формирования шлаковой фазы. PCY представляет собой усовершенствованный синтетический шлак с высокой основностью и низкой окисленностью, с низкими температурой плавления, вязкостью и поверхностным натяжением из расчета 3,3 кг/т.

Применение ковшовой обработки сталей 20ГЛ для отливок автосцепки первой группы способствует резкому увеличению растягивающих нагрузок после улучшения. σ_T в среднем увеличивается с 484 до 551 Дж/см², то есть на 12%, а σ_B – с 637 до 713 Дж/см², то есть на 11%. Это способствует повышению надежности автосцепного устройства. Ударная вязкость с острым надрезом соответствует требованиям ГОСТ 22703, что обеспечивает выдерживание высоких ударных нагрузок.

Ключевые слова. *Дуговые печи, отливки, корпус автосцепки, механические свойства, ковшовая обработка.*

THE INFLUENCE OF OUT-OF-FURNACE TREATMENT WITH UNIVERSAL REFINING MIXTURE (URM) ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF COUPLERS MADE OF 20GL STEEL CAST IN ACID-LINED 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.*

Arc furnaces with acid lining are predominantly used for the production of low-carbon and carbon steels for castings. Steel produced in an acid furnace is significantly more cost-effective than that produced in a basic furnace. However, a notable drawback of acid-lined furnaces is their inability to carry out dephosphorization and desulfurization processes, necessitating the use of raw materials with low sulfur and phosphorus content. Consequently, steel produced in arc furnaces with acid lining exhibits reduced ductility, attributed to the presence of brittle silicon inclusions that accumulate at grain boundaries. The objective of this study was to enhance the mechanical properties of acid steel through off-furnace refining aimed at reducing sulfur, phosphorus, gases, and non-metallic inclusions.

LLC “VKM-Steel” produces 20GL steel castings for automatic couplers used in railway cars. The most critical components, such as the coupler body and drawbar yoke, are classified as first-group parts. First-group parts and locks undergo water quenching and high-temperature tempering.

To improve the mechanical properties of 20GL steel castings for automatic couplers, the plant applied an off-furnace treatment using a universal refining mix (RSU) produced by LLC "Metallurg" SOAL. The unique feature of the RSU mix is its composition, which is based on a system of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2$ oxides and CaCO_3 and SrCO_3 carbonates. The mix is characterized by its resistance to hydration and segregation, as well as a faster slag phase formation rate. RSU represents an advanced synthetic slag with high basicity and low oxidation, featuring a low melting point, viscosity, and surface tension, calculated at 3.3 kg/t.

The use of ladle treatment for 20GL steel in first-group automatic coupler castings significantly increased tensile strength after heat treatment. The yield strength (σ_T) increased on average from 484 to 551 J/cm², a 12% improvement, and the ultimate tensile strength (σ_B) increased from 637 to 713 J/cm², an 11% increase. This contributes to greater reliability of the coupler assembly. The impact toughness with a sharp notch meets the requirements of GOST 22703, ensuring the components can withstand high impact loads.

Keywords. Arc furnaces, castings, coupler body, mechanical properties, ladle treatment.

Дуговые печи с кислой футеровкой применяют чаще всего при выплавке низкоуглеродистой и углеродистой стали для фасонного литья. Сталь, выплавленная в кислой печи, намного экономичнее основной. Дуги в кислых печах короче, чем в основных, из-за повышенного электрического сопротивления кислых шлаков, что обеспечивает более быстрый нагрев металла до заданной температуры при меньшем расходе электроэнергии. Материалы для футеровки кислых печей менее дефицитны и вдвое дешевле, чем основные огнеупоры. Они обеспечивают достаточно высокую стойкость подины, стен и свода. В связи с отсутствием условий для дефосфорации и десульфурации металла геометрия ванны кислых и основных печей отличается. Для дуговых печей с кислой футеровкой удельная поверхность зеркала металла не имеет особого значения, поэтому форму ванны целесообразно выбирать исходя из минимума тепловых потерь, что достигается при глубокой ванне. Уменьшению тепловых потерь через кладку и быстрому нагреву металла способствует также более низкая теплопроводность кислых огнеупоров. Из-за отсутствия длительных периодов рафинирования металла от фосфора и серы это обеспечивает высокий тепловой КПД дуговой печи, значительное сокращение длительности плавки, уменьшение расхода электроэнергии и электродов.

Вместе с тем существенными недостатками кислых печей являются невозможность осуществления в них процессов дефосфорации и десульфурации металла и, как следствие, потребность в чистых шихтовых материалах по сере и фосфору. В результате металл, выплавленный в печи с кислой футеровкой, обладает пониженными пластическими свойствами, что обуславливается наличием хрупких кремниевых включений, выделяющихся по границам зерен. Из-за активного взаимодействия металла с футеровкой в кислых печах весьма затруднительна выплавка сталей и сплавов с повышенным содержанием марганца, алюминия, титана и других элементов.

Использование внепечного рафинирования металла от серы, фосфора, газов и неметаллических включений открывает новые перспективы для применения кислых дуговых печей при выплавке стали с минимальным расходом электроэнергии.

ООО «ВКМ–Сталь» производит отливки из стали 20ГЛ для автоматической сцепки железнодорожных вагонов, являющейся центрально-буферным ударно-тяговым прибором для взаимного автоматического сцепления единиц подвижного состава, происходящего при нажатии или ударе одной из единиц состава о другую.

Детали разделяют на три группы. Наиболее ответственные – корпус автосцепки и тяговый хомут – относят к деталям первой группы. Корпус, являющийся основной частью автосцепки, предназначен для передачи колоссальных тяговых и ударных нагрузок, а также размещения деталей механизма сцепления. Тяговый хомут служит для передачи больших тяговых усилий от автосцепки на поглощающий аппарат посредством клина.

Детали подлежат термической обработке: первая группа и замок подвергаются закалке в воде и высокому отпуску; вторая группа и отливки третьей группы – нормализации. Термическую обработку деталей проводят вместе с пробными брусками для определения механических свойств стали. Режим термообработки устанавливает предприятие-изготовитель.

Требования к отливкам определены ГОСТ 22703–2012 «Детали литые сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия». Химический состав стали деталей приведен в табл. 1.

Механические свойства стали деталей после окончательной термической обработки должны быть не менее указанных в табл. 2.

Общеизвестно, что закалка стали с высоким отпуском способствует увеличению механических свойств по сравнению с нормализацией. Полная закалка с высоким отпуском называется улучшением

Таблица 1. Химический состав стали деталей

Марка стали	Содержание элементов, % по массе						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	V
20ГЛ	0,17–0,25	1,10–1,40	0,30–0,50	0,30	0,30	0,30	–

Таблица 2. Механические свойства стали деталей

Показатель	Значение показателя в зависимости от предела текучести σ_T , МПа, не менее, для деталей				
	первой группы		второй группы		третьей группы
	от 450 до 500 включительно	свыше 500	от 295 до 345 включительно	свыше 345	314 и более
Временное сопротивление σ_B , МПа	500	600	490	510	510
Относительное удлинение δ , %	15	12	20	18	17
Относительное сужение Ψ , %	30	25	30	25	25
Ударная вязкость при температуре -60°C , КСУ $^{-60}$, Дж/см 2	25	25	–	–	25
Ударная вязкость при температуре -60°C на образцах с острым надрезом, КСВ $^{-60}$ Дж/см 2	15	15			

* Показатели ударной вязкости КСВ и КСУ при температуре -60°C для замка не определяют.

и применяется для сталей с содержанием углерода от 0,3 до 0,5%. Высокотемпературный отпуск проводят при 550–650 °С. Это приводит к коагуляции и укрупнению зерен цементита, входящих в ферритоцементитную смесь, и образованию структуры – сорбита отпуска. Твердость стали при этом понижается до значений порядка HRC 30, а пластичность и вязкость (по сравнению со структурой троостита отпуска) значительно возрастает. Резко повышаются прочностные характеристики стали.

Для повышения механических свойств отливок из стали 20ГЛ для автосцепки на заводе применили обработку стали в ковше рафинирующей смесью универсальной (PCY) производства ООО «Металлург» СОАЛ (<https://metallurg-ral.ru>) из расчета 3,3 кг/т.

Особенностью смеси PCY является то, что она изготовлена на основе системы оксидов CaO–Al $_2$ O $_3$ –Na $_2$ O–CaF $_2$ и карбонатов CaCO $_3$ и SrCO $_3$. Смесь характеризуется отсутствием гидратации и сепарации, а также большей скоростью формирования шлаковой фазы. PCY представляет собой усовершенствованный синтетический шлак с высокой основностью и низкой окисленностью, с низкими температурой плавления, вязкостью и поверхностным натяжением. Это позволяет образующимся в процессе выпуска металла каплям PCY аккумулировать оксиды марганца, железа, алюминия и сульфиды, очищая металл, а также дегазируя его за счет образования большого количества пузырьков рафинирующего газа. Таким образом, при уменьшении в стали неметаллических включений и оксидных плен повышаются механические свойства и жидкотекучесть расплава. PCY поставляется в мешках с фасовкой массой 10 кг каждый, уложенных в контейнеры «биг-беги».

На первом этапе определили влияние улучшения и отпуска на свойства стали. Для этого исследовали отливки первой группы, залитые из одного ковша, с отливками, подвергаемыми нормализации.

Плавка 2-587 от 11.07.2022. Без применения PCY (табл. 3, 4).

Таблица 3. Химический состав стали без PCY

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	S, %	P, %	Al, %	Cu, %
0,18	0,40	1,04	0,07	0,09	0,03	0,02	0,05	0,15

Таблица 4. Механические свойства стали без PCY

Способ термической обработки	Механические свойства							
	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ (+20 °С), кДж/м 2	КСУ (–60 °С), Дж/см 2	КСУ (–60 °С), Дж/мм 2	КСВ (–60 °С), Дж/см 2
Нормализация	315	512	26	47	510			
Улучшение	474	617	22	44	–	–	51	30

Плавка 2-610 от 03.07.2023. С применением РСУ (табл. 5, 6).

Таблица 5. Химический состав стали с РСУ

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	S, %	P, %	Al, %	Cu, %
0,22	0,50	1,33	0,07	0,08	0,025	0,028	0,055	0,28

Таблица 6. Механические свойства стали с РСУ

Способ термической обработки	Механические свойства							
	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU (+20 °C) кДж/м ²	KCU (-60 °C) Дж/см ²	KCU (-60 °C) Дж/мм ²	KCV (-60 °C) Дж/см ²
Нормализация	326	510	26	39	510	25		
Улучшение	673	805	12	26	–	–	42	25

Как видно из таблиц, при одном и том же химическом составе сплава улучшение стали способствует резкому росту σ_T и σ_B по сравнению с нормализованной сталью, что очень важно для повышения надежности автосцепки, испытывающей значительные растягивающие нагрузки.

Наиболее объективную оценку показателей механических свойств дает статистическая обработка данных. Произвели статистическую обработку результатов плавки с улучшением без РСУ и с его применением. Результаты представлены в табл. 7, 8.

Таблица 7. Качественные показатели улучшенных плавки стали без применения РСУ

Переменные	Descriptive Statistics (STATISTICA без РСУ 1–3 печь)						
	количество плавки	среднее значение	минимум	максимум	дисперсия	среднее квадратичное отклонение	коэффициент вариации V , %
C, %	25	0,2150	0,1800	0,2500	0,001	0,02273	10,57223
Si, %	25	0,4030	0,2400	0,4800	0,004	0,06701	16,62716
Mn, %	25	1,1610	0,8300	1,3800	0,026	0,16258	14,00344
Cr, %	25	0,1100	0,0400	0,1900	0,002	0,04000	36,36364
Ni, %	25	0,0930	0,0700	0,1400	0,001	0,02263	24,33584
S, %	25	0,0302	0,0130	0,0480	0,000	0,00851	28,17490
P, %	25	0,0247	0,0200	0,0280	0,000	0,00267	10,80465
Al, %	25	0,0364	0,0170	0,0520	0,000	0,01328	36,47403
Cu, %	25	0,1370	0,1200	0,1600	0,000	0,01636	11,94446
σ_T , МПа	25	484,8000	280,0000	566,0000	6596,178	81,21686	16,75265
σ_B , МПа	25	637,5000	486,0000	744,0000	4677,611	68,39306	10,72832
δ , %	25	18,8000	14,0000	26,0000	18,844	4,34102	23,09053
Ψ , %	25	42,0000	33,0000	54,0000	65,111	8,06915	19,21225
KCV ⁻⁶⁰ , Дж/см ²	25	27,5000	2,0000	37,0000	90,722	9,52482	34,63571

Таблица 8. Качественные показатели улучшенных плавки стали с применением РСУ

Переменные	Descriptive Statistics (STATISTICA с РСУ 1–3 печь)						
	количество плавки	среднее значение	минимум	максимум	дисперсия	среднее квадратичное отклонение	коэффициент вариации V , %
C, %	25	0,2088	0,1700	0,2500	0,000	0,02128	10,18964
Si, %	25	0,4880	0,4000	0,5800	0,002	0,04435	9,08752
Mn, %	25	1,2412	1,0300	1,4600	0,015	0,12384	9,97733
Cr, %	25	0,1016	0,0500	0,1500	0,001	0,02544	25,04207
Ni, %	25	0,1116	0,0700	0,6000	0,011	0,10355	92,78557
S, %	25	0,0224	0,0120	0,0340	0,000	0,00667	29,72964
P, %	25	0,0248	0,0180	0,0310	0,000	0,00325	13,11776
Al, %	25	0,0464	0,0200	0,0600	0,000	0,01547	33,34719
Cu, %	25	0,1300	0,0900	0,2800	0,002	0,04052	31,16730
σ_T , МПа	25	551,4231	459,0000	678,0000	4086,254	63,92381	11,59252
σ_B , МПа	25	713,6923	611,0000	845,0000	4919,102	70,13631	9,82725
δ , %	25	15,6154	12,0000	24,0000	10,566	3,25056	20,81641
Ψ , %	25	32,3077	26,0000	51,0000	47,662	6,90373	21,36870
KCV ⁻⁶⁰ , Дж/см ²	25	23,3846	20,0000	27,0000	4,806	2,19229	9,37494

Как видно из таблиц, применение ковшовой обработки сталей 20ГЛ для отливок автосцепки первой группы способствует резкому увеличению растягивающих нагрузок после улучшения. Предел текучести σ_T в среднем возрастает с 484 до 551 Дж/см², т.е. на 12%, а временное сопротивление σ_B – с 637 до 713 Дж/см², т.е. на 11%. Это способствует повышению надежности автосцепного устройства. Ударная вязкость с острым надрезом соответствует требованиям ГОСТ 22703-2012, что обеспечивает выдержку высоких ударных нагрузок.

Рафинирование стали 20 ГЛ РСУ способствует появлению в структуре большего количества специальных карбидов и их благоприятному диффузионному перераспределению, что в конечном итоге ведет к повышению твердости и прочности стали.

Кроме того, применение РСУ дает еще целый ряд преимуществ.

1. Химический анализ шлаков показал, что после обработки РСУ наблюдается резкое снижение содержания вредных оксидов в шлаке, а следовательно, и в расплаве: FeO – на 60% и MnO – на 55%. Шлак с применением РСУ приобретает светлую коричневую окраску по поверхности, а в изломе становится светло-зеленым или светло-голубым.

2. После разбора металла ковши остаются чистыми без остатков шлака и металла, что снижает трудоемкость подготовки ковша к следующему выпуску плавки и повышает производительность труда плавильного участка. Этому способствует характерная особенность шлака после обработки РСУ: он становится более хрупким и отличается низкой теплопроводностью, т.е. длительное время не дает остывать металлу. В результате происходит более полный разбор стали из ковша, увеличивается количество залитых форм и соответственно производительность линии.

3. Повышается стойкость ковшей и увеличивается количество наливов в них металла. Как следствие, растет межремонтное время ковшей, что приводит к снижению трудоемкости ремонтных работ и экономии футеровочных материалов.

4. При разделке шлаковых коржей на бойной площадке за счет хрупкости шлака увеличивается извлечение скрапа и металла из шлака, что позволяет увеличить количество возвращаемого на переплав металла.

Выводы

1. Применение РСУ производства ООО «Металлург» СОАЛ для ковшовой обработки стали 20ГЛ для ответственных железнодорожных отливок первой группы «Корпус автосцепки» и «Тяговый хомут» приводит к резкому увеличению растягивающих нагрузок после улучшения.

2. Предел текучести σ_T в среднем возрастает с 484 до 551 Дж/см², т.е. на 12%, а временное сопротивление σ_B – с 637 до 713 Дж/см², т.е. на 11%. Это способствует повышению надежности автосцепного устройства. Ударная вязкость с острым надрезом соответствует требованиям ГОСТ 22703-2012, что позволяет выдерживать высокие ударные нагрузки.

3. Наблюдается резкое снижение содержания вредных оксидов в шлаке, а следовательно, и в расплаве: FeO – на 60% и MnO – на 55%.

4. После разбора металла ковши остаются чистыми без остатков шлака и металла, что снижает трудоемкость подготовки ковша к следующему выпуску плавки и повышает производительность труда плавильного участка. Повышается стойкость ковшей и увеличивается количество наливов в них металла. Как следствие, растет межремонтное время, что приводит к снижению трудоемкости ремонтных работ и экономии футеровочных материалов.

5. При разделке шлаковых коржей на бойной площадке за счет хрупкости шлака улучшается извлечение скрапа и металла из шлака, что позволяет увеличить количество возвращаемого на переплав металла.