

СТАТЬИ

УДК 669

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ В ЭЛЕКТРОПЕЧИ И МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ

Азимова Л.Г.

Азербайджанский технический университет, Баку, e-mail: iradam@rambler.ru

В работе рассматриваются вопросы применения исходных шихтовых материалов для производства стали с разными физико-химическими свойствами и функциональностью. Стандартные механические свойства стали из чистой и обычной шихты статически значимо не различаются. Многочисленные исследования показали преимущества по механическим свойствам легированной стали из исходных шихтовых материалов при высоких температурах. Также стали известны основные закономерности негативного воздействия оксидных включений на прочность и пластичность стали. С ростом объема производства черных металлов тесно связано возрастание доли окучкованного сырья в шихте доменных печей, в связи с чем возникает вопрос создания эффективной технологии обработки и высокого качества окучкованного продукта. Необходимый объем производства окатышей можно обеспечить созданием новых производственных мощностей, а также за счет повышения эффективности работы существующих производств и металлургических агрегатов для производства окатышей, в частности обжиговых машин конвейерного типа. Повышение производительности обжиговых машин возможно как за счет рационального теплового режима работы, что обеспечивает эффективность нагрева слоя, так и за счет повышения качества готового продукта. Определено, что по сравнению со сталью, полученной в электропечи, в стали электрошлакового переплава окатышей аустенитное зерно при той же температуре получается меньшего размера.

Ключевые слова: аустенитные зерна, шихта, сталь, окатыш, кручение, растяжение, механические свойства

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF BEARING STEEL PRODUCED IN AN ELECTRIC FURNACE AND BY THE METHOD OF ELECTROSLAG REMELTING METALLIZED PELLETS

Azimova L.G.

Azerbaijan Technical University, Baku, e-mail: iradam@rambler.ru

The issues of using initial charge materials for the production of steel with different physical and chemical properties and functionality are considered. The standard mechanical properties of steel from pure and ordinary charge do not differ significantly statically. Numerous studies have shown the advantages in mechanical properties of alloy steel from the original charge materials at high temperatures. The main patterns of the negative impact of oxide inclusions on the strength and ductility of steel have also become known. The growth in the production of ferrous metals is closely related to the increase in the share of agglomerated raw materials in the blast furnace charge, which raises the question of creating an effective processing technology and high quality of the agglomerated product. The required volume of pellet production can be achieved by creating new production facilities, as well as by increasing the efficiency of existing production facilities and metallurgical units for the production of pellets and, in particular, conveyor-type roasting machines. Increasing the productivity of roasting machines is possible both due to a rational thermal operating mode, which ensures efficient heating of the layer, and by increasing the quality of the finished product. It has been determined that, in comparison with steel produced in an electric furnace, in steel from electros slag remelting of pellets, austenite grains at the same temperature it turns out smaller in size.

Keywords: austenite grains, charge, steel, pellet, torsion, tension, mechanical properties

Развитие промышленности во всех отраслях диктует необходимость производства специальных металлургических изделий, способных работать в экстремальных условиях промышленного производства: в областях сверхнизких и сверхвысоких температур, высоких магнитных полей, сильной вибрации, при высоких крутящих нагрузках, в агрессивных средах, в условиях сильного сжатия и т.д. В связи с этим возникает необходимость в создании стали высокого качества или новых сплавов, обладающих требуемыми свойствами.

Мировое производство железорудных окатышей к началу нового тысячелетия до-

стигло 760–780 млн т в год и в дальнейшем будет наращиваться, если учитывать высокое содержание в них железа и хорошие транспортные свойства. Поэтому задачи совершенствования технологии их изготовления и улучшения качества остаются актуальными, особенно в связи с необходимостью снижения энергозатрат в схемах: «окатыши – чугуны – сталь» и «металлизированный продукт – сталь».

В последние годы стремительно совершенствуется технология производства стали различного назначения путем использования исходной шихты. Одним из способов ее улучшения является экономичная

и высокоэффективная технология электрошлакового переплава металлизированных окатышей (ЭШПО) [1, 2]. Тенденция повышения доли окатышей в современной металлургии обусловлена их доступностью на рынке окатышей и их высокой металлургической ценностью.

Исследования влияния оксидных неметаллических включений на формирование свойств пластичности, прочности, ударную вязкость и коррозионную стойкость заготовок из сплавов на основе хрома подробно изложены в работе [3]; влияние азота на технологическую пластичность аустенитной стали подробно рассмотрено в работе [4]. Для оценки изменения технологической пластичности стали ШХ15 проведены испытания при высокой температуре нагрева и в условиях различного объемно-напряженного состояния (при кручении, растяжении, в состоянии предела текучести и временного сопротивления разрыву). По методике, изложенной в работе [5], процесс прокатки моделировали испытанием на кручение, а прессования сложных профилей и штамповку – испытанием на горячее растяжение [6].

Несмотря на то что агломерация и производство окатышей – наиболее распространенные методы промышленного окучивания, основанные на высокотемпературной обработке железосодержащего сырья, качество используемых в отрасли окатышей не в полной мере удовлетворяет требованиям доменной плавки. Причиной тому является недостаточная изученность причин и механизмов разупрочнения окатышей, особенно разрушения при нагреве и восстановлении в доменной печи. Также установлено, что интенсификация прогрева слоя при повышении температурно-фильтрационного режима либо использование твердого топлива с увеличением продолжительности термообработки нижних горизонтов слоя позволяют получать более однородные по химическому составу и металлургическим свойствам окатыши, что дает возможность получать продукцию лучшего качества [7]. Однородность материала является важнейшим показателем качества, влияющим на конструктивную прочность материала.

Снижение разрушаемости обожженных окатышей можно достичь путем введения различных добавок в шихту, что позволяет увеличить температуру начала размягчения. Увеличение прочности можно также достичь изменением режима термообработки. При этом можно получать необходимый фазовый состав, способный при высокой степени восстановления сохранять прочность окатышей [6]. Снижение разрушаемости

или же повышение прочности окатышей при исходном состоянии и при восстановлении способствуют улучшению газодинамического режима шахтных агрегатов – доменных печей – и приводят к экономии топлива для доменной печи, следовательно, и к уменьшению себестоимости продукции.

Цель настоящей работы состояла в выявлении особенности стали, полученной методом переплава металлизированных окатышей, разработке рекомендаций по их обработке и применению. Было проведено сравнительное исследование микроструктуры и механических свойств ШХ15, полученной методом ЭШПО (I) и в электропечи (ЭП) на обычной шихте (II). Для оценки технологической пластичности стали ШХ15 определяли механические свойства при высокой температуре и в условиях различного объемно-напряженного состояния.

Проведенные опыты выявили, что в составе полученной технологическим способом электрошлакового переплава окатышей (ЭШПО) стали ШХ15 имеются:

- 1) большое количество оксидных включений, которые являются силикатами натрия, кальция и сложными силикатами размером 4,6 мкм;
- 2) незначительное количество глинозема размером 1,2 мкм [8–12];
- 3) незначительное количество сульфидов. При этом отсутствие в составе металла вредных нитридных включений является благоприятным фактором [2].

Таблица 1

Параметры структуры ковальной стали ШХ15 при 1150⁰С, полученной методом ЭШПО (I) и в электропечи (II), после сфероидизирующего отжига (указано в числителе) и закалки при 860⁰С (указано в знаменателе) [2]

Показатель	I	II
Твердость $\frac{HB}{HRC}$	$\frac{187}{61,0}$	$\frac{176}{61,5}$
Размер карбидов, мкм	$\frac{0,8-1,5}{60,3-1,0}$	$\frac{0,5-0,6}{0,3-0,5}$
Количество карбидов в 100 мкм ² , ед	$\frac{50}{55}$	$\frac{82}{50}$

Параметры структуры ковальной стали ШХ15 при 1150⁰С, полученной методом ЭШПО (I) и в электропечи (II), показаны в таблице 1. По данным таблицы 1 видно, что сталь, полученная электрошлаковым переплавом окатышей (ЭШПО), по сравнению со сталью, полученной в электропечи

(ЭП), содержит более крупные карбиды – 0,8–1,5 и 0,5–0,6 мкм соответственно [2]. При этом количество карбидов в металле (ЭШПО) в 1,64 раза меньше, чем в стали, полученной в электропечи (табл. 1). Эту неравномерность можно объяснить различием в концентрации углерода (соответственно 1,1 и 0,98%) [8].

Материал и методы исследования

В качестве шихтовых материалов использовали высококачественный концентрат, болгарский бентонит, боксит, известняк, мел и доломит. Компоненты шихты обрабатывали по методике, предложенной в работе [13], а именно с помощью чашечного истирателя типа ИВ 1 и дискового истирателя типа ИД 200, а затем смешивали их с концентратом в заданных пропорциях. Окатыши готовили на чашевом лабораторном окомкователе марки ОЧЛ диаметром 0,9 м, после чего рассеивали на грохоте, выделяя фракции 12–16 мм. Сырые окатыши загружали в контейнеры высотой 300 мм, которые помещали в слой обжиговой машины. По завершении термообработки контейнеры извлекали из слоя и обожженные окатыши делили на две части: верхнюю и нижнюю. Определено, что свойства сырых и сухих окатышей зависят от многих добавок, но при этом влияние содержания бентонита является определяющим.

Слитки стали ШХ15 321 2Ф и 321 2ФРТ диаметром 300 мм получали в опытно-промышленной электрошлаковой печи непрерывного действия. Раскисление проводили таким образом, чтобы максимально восстановить FeO в шлаке и не допустить чрезмерно, восстановить SiO₂, содержащийся в пустой породе окатышей. При этом остаточное содержание FeO в шлаке должно быть около 5%, концентрация кислорода в металле, полученном под таким шлаком, может достигать 0,02%.

От слитка ЭШПО был отрезан поперечный темплет массой около 20 кг, из которого вырезали образцы для исследования неметаллических включений, а остальной металл проковали при рекомендованной для этой стали температуре 1150 и 1000°C (сталь ЭШПО с температуройковки 1000°C обозначена I₁, с 1150°C – I₂). Из слитков аналогичного сечения стали ШХ15, выплавленных на заводе «Электросталь», выбрана наиболее чистая по неметаллическим включениям и содержанию газов плавки, которая по составу близка к металлу ЭШПО. При таком сравнении основным различием является природа шихты (металл ЭШПО чище металла ЭП по примесным элементам: Ni и Cu в 10 раз, Pb – в 5–10 раз, As –

в 4–8 раз, Sn – в 3 раза, Sb, Bi – в 2 раза, Zn – в 1,5 раза).

Сталь ШХ15 II прокована при 1150°C. Из заготовок стали I и II получены образцы для испытаний на горячее скручивание: общая длина, длина и диаметр рабочей части соответственно 120 и 565, 40 и 26; 8 и 4 мм.

Характер влияния роста аустенитных зерен в зависимости от температуры на прочностные свойства сталей однозначно указывает, что достигаемый уровень изменения свойств металла связан с изменениями внутреннего строения металла. Для изучения этого вопроса исследовали зависимость роста аустенитных зерен от температуры в интервале 850–1200°C (рис. 1). Определено, что сталь ШХ 15, полученная в электропечи (ЭП) и электрошлаковом переплаве окатышей (ЭШПО), имеет в области влияния нерастворенных карбидов примерно одинаковый размер аустенитного зерна при нагреве от 850 до 1050°C [9–11]. При температуре выше 1050°C рост зерна в стали носит интенсивный характер. Рост размеров аустенитного зерна более интенсивный для стали, полученной в электропечи, и менее заметный для стали электрошлакового переплава окатышей, что объясняется повышенным содержанием дисперсных термоустойчивых оксидных включений сложного состава.

Начиная с температуры, равной 1150°C, в приграничных участках стали, полученной в электропечи, образуется темнотравящаяся зона со структурой верхнего бейнита с пониженной по сравнению с «телом» зерна микротвердостью соответственно 63 и 107 МПа. При температуре 1150°C и выше аустенитное зерно для стали электрошлакового переплава окатышей мельче по сравнению со сталью, полученной в электропечи [2].

Испытание на скручивание и растяжение проводили в интервале температур 800–1200°C при прямом нагреве и с предварительным нагревом. Условиями испытания были: скорость скручивания 30 об/мин; скорость растяжения 0,0014 с⁻¹, выдержка 20 минут. После высокого отпуска (650°C – 1 ч) в исходном состоянии сталь имела структуру зернистого перлита с близкими характеристиками карбидной фазы [10, 12]. Опыт показывает, что увеличение температуры нагрева на интервале 650–1200°C в условиях растягивающих напряжений для многих сталей приводит к увеличению степени пластичности. Так, в рассматриваемых случаях пластичность по количеству скручивания стали при обоих методах выплавки является удовлетворительной для прокатки с высокой степенью деформации (рис. 2).

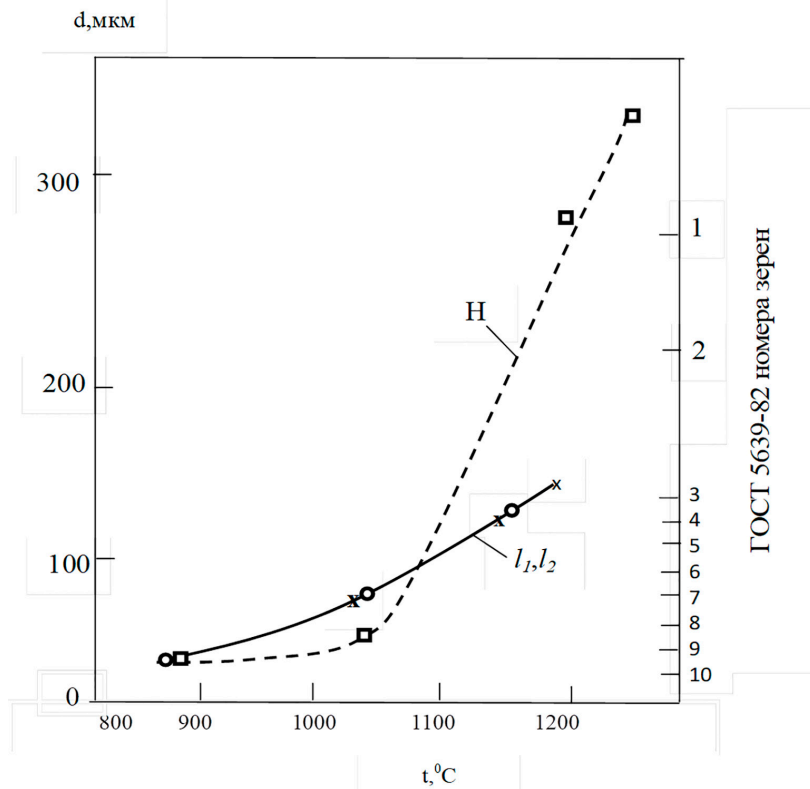


Рис. 1. Влияние температуры нагрева на размер аустенитного зерна (d) в стали ШХ15, полученной электрошлаковым переплавом окатышей (ЭШПО I, II), и полученной в электропечи (ЭП II) при температуре ковки 1000°C (I_1), 1150°C (I_2 , II) [2]

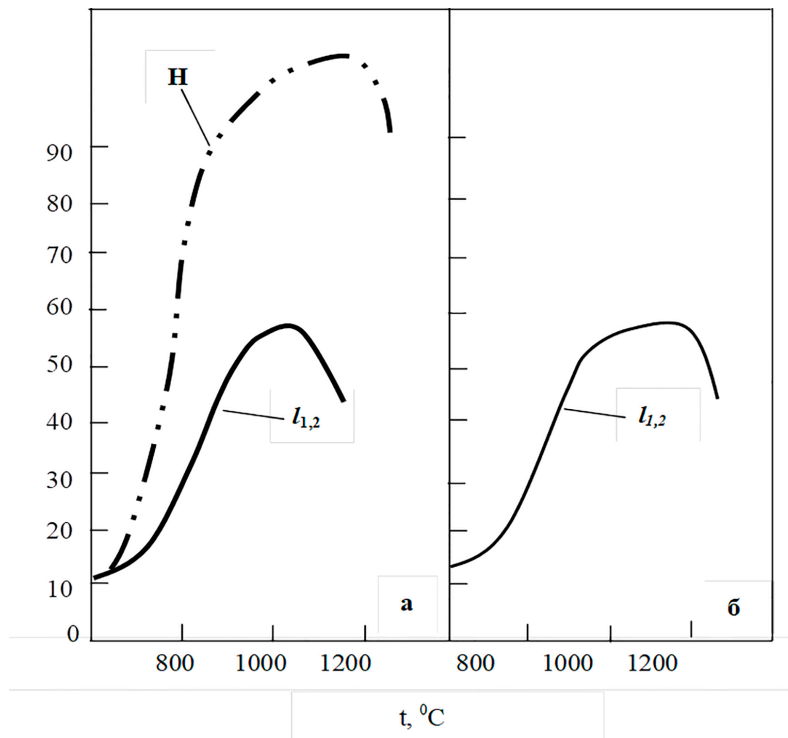


Рис. 2. Зависимость числа скручиваний от температуры испытания стали ШХ15, полученной электрошлаковым переплавом окатышей (ЭШПО I, II), и ШХ15, полученной в электропечи (ЭП II) при прямом нагреве (а) и с предварительным нагревом при 1150°C (б) [2]

При прямом нагреве до 800–900°C структура стали состоит из глобулярных карбидов и аустенита в результате превращения феррита и перлита, при охлаждении – зернистого перлита в результате распада аустенита. При той же температуре испытания с предварительным нагревом до 1150°C структура стали – аустенит (карбиды не успевают выделиться), при охлаждении на воздухе – в результате распада аустенита пластинчатый перлит. Неметаллические включения в стали для обоих методов выплавки в процессе испытания на скручивание ориентируются поперек оси деформации. Более низкую пластинчатость при горячем кручении стали ШХ15, полученной ЭШПО, по сравнению с ЭП, по-видимому, можно объяснить значительно большим содержанием неметаллических включений – пластинчатых и хрупких силикатов, располагающихся перпендикулярно

оси образца. Они являются центрами зарождения внутренних трещин [4, 14–16].

На рисунке 3 показано изменение механических свойств подшипниковой стали ШХ15, полученной электрошлаковым переплавом окатышей (ЭШПО), а также в электропечи (ЭП), в процессе растяжения при прямом нагреве до температуры испытания 760–1200°C.

Определенный испытанием на растяжение (ГОСТ 1497) по относительному сужению температурный интервал пластичности подшипниковой стали ШХ15, полученной методом электрошлакового переплава окатышей (ЭШПО), составляет 760–1200°C при высокой степени деформации сдвига до момента разрушения, а для стали, полученной в электропечи (ЭП), провал пластичности наблюдается в интервале температур 850–950°C и выше на 20–25%; при температуре 850°C он составляет 110%.

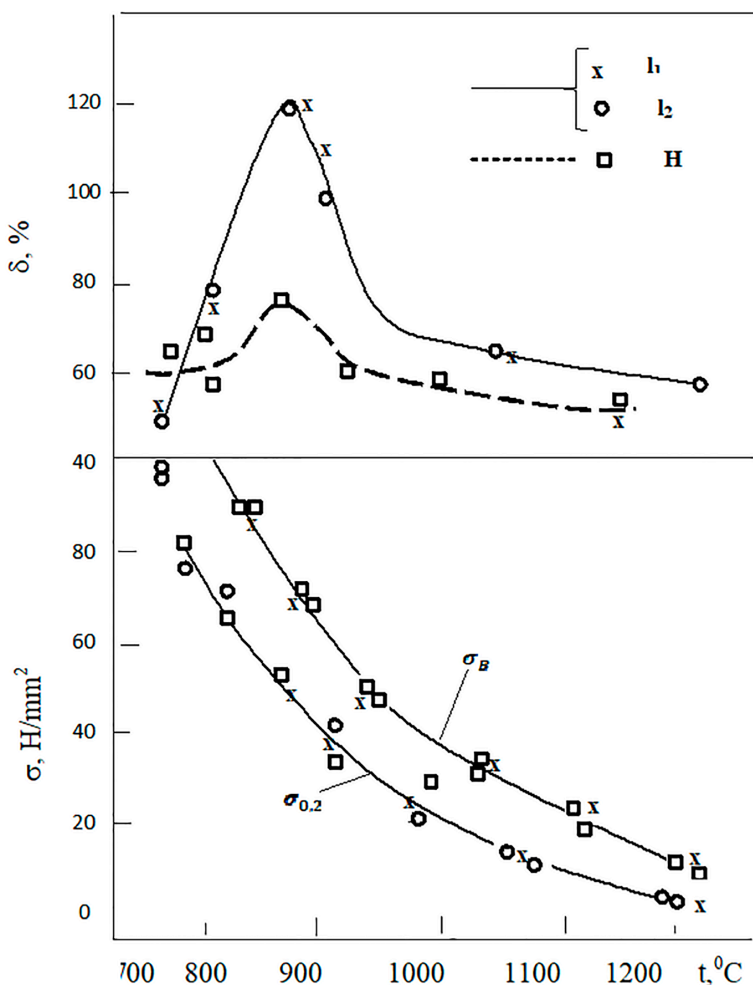


Рис. 3. Зависимость относительного удлинения, предела текучести и временного сопротивления разрыву ($\epsilon = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) стали ШХ15, полученной методом электрошлакового переплава (ЭШПО I, II) и в электропечи (ЭП II), от температуры испытания (прямой нагрев)

При нагреве до 800°C распределение карбидов и их морфология, микротвердость в зоне разрушения стали ЭП и ЭШПО, пластические свойства различаются незначительно.

При нагреве до 850°C в стали ШХ15 ЭШПО по сравнению с ЭП образуется больше пор и происходит дробление внутренних неметаллических включений. Структура деформированных зон стали двух методов выплавки различается по величине и количеству карбидной фазы. В стали ШХ15 ЭШПО она крупнее и ее меньше. Изменение температуры деформации от 800 до 850°C оказывает слабое влияние на структуру карбидов в зоне деформации стали ЭП и значительное – в стали ШХ15 ЭШПО: происходят растворение мелких и коагуляция крупных карбидов. В зоне разрушения в стали ЭП происходит упрочнение, в стали ЭШПО оно практически отсутствует, что может способствовать повышению пластичности.

Установлено, что высокое относительное удлинение стали ШХ15 ЭШПО при 850°C можно объяснить созданием условий для релаксации напряжений путем локальной пластической деформации в матрице между относительно крупными карбидами, тогда как при наличии большого количества мелкой карбидной фазы в стали ЭП локальная пластическая деформация затруднена. В более чистой по примесным элементам стали ШХ15 ЭШПО растворение карбидной фазы протекает интенсивнее. При температуре испытания выше 850°C происходит дальнейшее растворение карбидов, матрица становится менее пластичной.

Более широкий температурный интервал горячей деформации при высоких значениях степени деформации сдвига (>4) позволяет рекомендовать сталь ШХ15 ЭШПО для изготовления деталей или режущего инструмента сложной формы путем прессования и штамповки.

Повышенная пластичность стали ЭШПО по сравнению с ЭП в интервале краснотемпературы связана с более интенсивным растворением карбидной фазы. По-видимому, чистота твердого раствора по примесным элементам влияет на процессы, происходящие на границе «карбид – матрица».

Таким образом, сталь ШХ15, полученная электрошлаковым переплавом окатышей (ЭШПО), характеризуется меньшим количеством карбидов и их более крупными размерами по сравнению со сталью, полученной в электропечи (ЭП). При этом подшипниковая сталь ШХ15, полученная в электропечи, не содержит в составе нитридных включений, что является благоприятным фактором.

Выводы

В результате проведенных испытаний выявлено, в составе полученной технологическим способом электрошлакового переплава окатышей (ЭШПО) стали ШХ15 имеются большое количество оксидных включений, которые являются силикатами натрия, кальция и сложными силикатами размером 4,6 мкм, а также незначительное количество глинозема размером – 1,2 мкм и незначительное количество сульфидов. Установлено, что сталь, полученная электрошлаковым переплавом окатышей (ЭШПО), по сравнению со сталью, полученной в электропечи (ЭП), содержит более крупные карбиды 0,8–1,5 и 0,5–0,6 мкм соответственно и это неравномерность объясняется различием в концентрации углерода. Сталь ШХ15, полученная методом ЭШПО, имеет более высокий интервал пластичности при высокой деформации сдвига до момента разрушения.

Список литературы

1. Клюев М.М., Волков С.Е. Электрошлаковый переплав. М.: Металлургия, 1984. 208 с.
2. Азимова Л.Г. Повышение качества стали при электрошлаковом переплаве металлизированных окатышей // Science and world. 2022. № 10 (110). P. 27–31.
3. Джон-Хун Ли, Марукович Е.И., Ки-Йонг Чой, Брановицкий А.М., Сазоненко И.О., Максимови Ю.В. Электрошлаковое литье заготовок из сплавов на основе хрома // Литье и металлургия. 2015. № 1(78). С. 17–22.
4. Мазничевский А.Н., Гойхенберг Ю.Н., Сприкут Р.В., Савушкина Е.С. Влияние азота на механические свойства технологическую пластичность аустенитной стали // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. 2019. Т. 19, № 2. С. 25–35.
5. Шаповалов В.А., Бурнашев В.Р., Биктагиров Ф.К. Качество слитков ЭШП, выплавленных из электродов, спрессованных из стружки аустенитных нержавеющей сталей // Современная металлургия. 2012. № 4. С. 46–48.
6. Протокивиллов И.В., Назарчук А.Т., Петров Д.А., Порохонько В.Б. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа // Современная электрометаллургия. 2018. № 2 (131). С. 45–51. DOI: 10.15407/sem2018.02.06.
7. Берсенева И.С., Берсенева Е.С., Колясников А.Ю., Лопатин А.С. Производство окатышей как способ утилизации техногенных отходов // Черная Металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 3. С. 37–41.
8. Kharicha A., Ludwig A., Menghuai W.U. On Melting of Electrodes during Electro-Slag Remelting // ISIJ International. 2016. V. 54. No. 7. P. 1621–1628.
9. Чжоу-хуа Цзян, Сю Чень, Синь Ген, Цян Ю. Металлургические характеристики крупных слябов, полученных электрошлаковым переплавом // Современная Электрометаллургия. 2018. № 2 (131). С. 19–27. DOI: 10.15407/sem2018.02.02.
10. Пятыйгин Д.А., Чуманов И.В. Обзор способов получения полых заготовок электрошлаковым переплавом // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. 2016. Т. 16, № 3. С. 39–48. DOI: 10.14529/met160306.
11. Бершицкий И.М., Протасов А.В., Сивак Б.А., Якиманский А.М., Яремчук О.М., Усачев Д.Н., Яремчук И.О. Способ электрошлакового переплава металлоконтрастных

отходов // Патент № RU 2715822 С1. Заявка № 2019121620 от 10.07. 2019. Опубликовано 03.03.2020.

12. Азимова Л.А., Сулейманова С.Н., Мирзоева Г.А. Изменение прочности железорудных окатышей в процессе термической обработки // Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference Barcelona, Spain 1-3 August 2022. Barcelona, Spain 2022. С. 122–125.

13. Копоть Н.Н. Разработка и совершенствование технологии производства окатышей и их металлизации в шахтной печи: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Екатеринбург, 2005. 23 с.

14. Бабанлы М.Б., Азимова Л.А., Исмаилова К.Г., Гаджиев Р.Д. Методы получения аморфных и микрокристаллических сплавов // Инновационные технологии и экономика в машиностроении. 2012. Т. 1. С. 120-124.

15. Юрьев Б. П., Гольцев В. А., Дудко В. А. Анализ способов производства окатышей и разработка технологии получения их с высокими металлургическими свойствами // Сталь. 2020. № 7. С. 2–7.

16. Берман Ю.А. Основные закономерности производства окатышей: монография. Челябинск: Металлургия, 1991. 184 с.