

## ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Екатерина Петровна Волюнкина**

Сибирский государственный индустриальный университет,  
зав. кафедрой техногенных и вторичных ресурсов, доктор технических наук

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей снижения материалоемкости продукции и экономии сырьевых ресурсов является вовлечение в производство вторичных материальных ресурсов (ВМР) — отходов, которые образуются как в сфере материального производства, так и в сфере потребления.

Принцип переработки вторичных ресурсов сформулировал академик И. П. Бардин: «Отходы одних технологических переделов или производств должны служить сырьем для других». Решение этой задачи является актуальным не только для России, но и для всего мирового сообщества.

Мировой и отечественный опыт показывает, что использование многих видов ВМР технически осуществимо и экономически выгодно. Восстановление сырьевых ресурсов из отходов в индустриально развитых странах мира является вопросом государственной важности, что позволило решить экономические и технологические проблемы, связанные с переработкой отходов. Повышенное внимание к использованию ВМР объясняется, с одной стороны, истощением запасов полезных ископаемых, а с другой — прямой экономической выгодой от использования дополнительных сырьевых источников.

Для российской металлургии проблема отходов имеет особую актуальность вследствие высокого уровня их удельного образования на единицу металлопродукции — в 1,5–3 раза выше, чем в развитых странах. Это обуславливает высокую ресурсо- и энергоемкость отечественных металлургических предприятий и загрязнение окружающей среды в регионах их размещения. С другой стороны, развитие черной металлургии во второй половине XX в. показало, что металлургические предприятия обладают широкими возможностями по переработке различных видов производимых человечеством отходов: от автомобильного металлолома до бытовых отходов.

Общепризнано, что техногенное минеральное сырье — это конкурентоспособный, перспективный, постоянно пополняемый минеральный ресурс. Широкое вовлечение в переработку вторичных ресурсов металлургической промышленности обеспечит экономию материально-технических ресурсов, развитие отходоперерабатывающей отрасли и снижение загрязнения окружающей среды.

### ОБРАЗОВАНИЕ ОТХОДОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Металлургия является одной из наиболее материалоемких и энергоемких отраслей промышленности. Высокий расход материальных и энергетических ресурсов обуславливает высокий уровень образования отходов в металлургической отрасли. Это, в первую очередь, отходы обогащения рудного сырья, углей и флюсовых материалов. Другим источником образования отходов являются непосредственно технологические процессы производства кокса и агломерата, выплавки чугуна и стали, производства проката.

Известно, что на отечественных металлургических предприятиях для производства 1 т стали в технологический процесс вовлекается примерно 10 т природных ресурсов, включая воду и воздух. Оставшиеся 9 т превращаются в загрязнения в виде газов, загрязненных сточных вод и твердых отходов. По экспертным оценкам, удельный выход отходов на 1 т проката в целом по черной металлургии России составляет: породы от добычи и обогащения полезных ископаемых — 1500–2500 кг, шлаки — 500–1000 кг, шламы — 80–120 кг, сухая пыль — 80–120 кг, окалина — 30–40 кг, сточные воды — 250–300 м<sup>3</sup>, технологические газы — 8000–10000 м<sup>3</sup>, аспирационный воздух — 30–50 тыс. м<sup>3</sup>, горючие газы — 2000–2500 м<sup>3</sup>.

При обогащении железорудного сырья образуются такие отходы, как порода, шламы, хвосты сухой магнитной сепарации (5–12% от переработанной руды), хвосты мокрой магнитной сепарации (35–80% от переработанной руды). Их ежегодное образование на горно-обогатительных комбинатах России превышает 100 млн т.

При последующей переработке железорудного сырья образуется большое количество железосодержащих отходов в виде пылей и шламов газоочистных сооружений агломерационных фабрик, доменных и сталеплавильных производств, выход которых составляет около 1% от массы сырья или 7–8% конечного объема производства металлургических заводов. Содержание железа в твердых отходах агломерационного, доменного и сталеплавильного производства составляет 33–70% в пересчете на приведенное, а из 1 млн т вторичных железосодержащих отходов может быть получено 450 тыс. т металла. Кроме того, в них отмечается большое содержание оксидов цинка (до 20%), свинца и щелочных металлов.

В табл. 18.1 приведена классификация твердых отходов по производственным циклам металлургического производства.

Таблица 18.1. Классификация отходов черной металлургии по производственным циклам

Производственный цикл	Основные технологические операции	Тип отходов
Обогащение железных руд	Сухое обогащение, дробление, сортировка, гравитационная и магнитная сепарация	Порода обогащения, пыли и шламы дробильно-сортировочных и обогатительных фабрик
	Мокрое обогащение, измельчение, гравитационная и магнитная сепарация, флотация	Хвосты обогатительных фабрик, пыли и шламы дробильных фабрик
Производство агломерата	Дробление, сортировка, спекание шихты	Пыли и шламы дробильно-сортировочных фабрик, пыли и шламы очистки отходящих газов от агломашин
Выплавка чугуна	Отсев мелочи из агломерата и кокса, подача шихты в доменную печь, выплавка чугуна, слив шлака, разливание чугуна	Отсев кокса и агломерата, пыли и шламы подбункерных помещений (шихтоподачи), пыли и шламы от очистки технологического газа, шлак, пыль литейного двора, отходы огнеупоров
Выплавка стали	Заливка чугуна, подготовка металлолома, выплавка стали, выпуск шлака и стали	Пыль отделения перелива чугуна и подготовительных отделений, шлак, пыли и шламы от очистки технологических газов, отходы огнеупоров
Производство проката	Очистка сточных вод производства проката, зачистка изделий с использованием огневых и механических методов	Прокатная окалина (первичная и вторичная — замасленная), пыли и шламы от зачистки изделий

При самых совершенных технологиях предотвратить возникновение отходов невозможно. Однако высокий уровень их образования является следствием неэффективного использования в производственной деятельности природных ресурсов. Образование отходов приводит к потере материалов и энергии, а также к дополнительным экономическим издержкам в связи со сбором, транспортированием, переработкой и захоронением.

Опыт развитых государств показал, что человечество может успешно развиваться, значительно сократив потребление природных ресурсов на единицу продукции. Известно, что ресурсоемкость единицы ВВП в России в 2–3 раза выше, чем в развитых странах. Это означает, что для производства 1 т продукции в России вовлекается в 2–3 раза больше природных ресурсов при соответствующем увеличении образования отходов. В 2015 г. черная металлургия в России образовала в целом 535 млн т твердых отходов, включая добычу, обогащение и переработку железных руд, что при производстве стали в России 70,7 млн т в год составило около 8 т/т стали, то есть в 8 раз превысило выпуск основной продукции.

Выход доменного шлака на большинстве российских металлургических предприятий превышает 300 кг/т чугуна и колеблется от 368 до 472,6 кг/т чугуна, выход колошниковой пыли достигает 39–49 кг/т чугуна, доменного шлама — 30–39 кг/т чугуна, вынос пыли из конвертеров — 25–28 кг/т стали, выход конвертерного шлака — 180–190 кг/т стали, количество прокатной окалины — 50–70 кг/т металлопроката.

Зарубежный опыт показывает, что в металлургии имеются значительные резервы снижения образования отходов. В результате реализации программ, направленных на снижение материальных и энергетических потерь, за последние 20 лет практически на всех заводах черной металлургии ЕС и Северной Америки объем твердых отходов уменьшился на 80%. По данным Международного института черной металлургии, среднемировой выход доменного шлака снизился с 1984 к 1995 г. с 311 до 270 кг/т жидкого чугуна, выносимой из доменных печей пыли — с 16,9 до 10–12 кг/т чугуна (в том числе колошниковой пыли — до 7–8, доменного шлама — до 3–4 кг/т чугуна), выход конвертерного шлака составил в 1995 г. 121 кг/т стали, конвертерной пыли — 13–18 кг/т стали, количество прокатной окалины — 30 кг/т проката. Благодаря улучшению качества доменной шихты в Германии выход доменного шлака снизился с 700 кг/т чугуна (1950 г.) до 255 кг/т (1993 г.), выход сталеплавильных шлаков сократился со 180 кг/т жидкой стали (1971 г.) до 90 кг/т (1991 г.). Свидетельством эффективности осуществляемой в Германии политики ресурсосбережения является значительное сокращение выбросов пылевидных отходов в атмосферу — с 1,86 млн т (1990 г.) до 0,26 млн т (1999 г.), то есть более чем в 7 раз. В среднем удельное образование твердых отходов на единицу продукции на металлургических предприятиях развитых стран в настоящее время в 1,5–3 раза ниже, чем в России, а выбросы пылевидных отходов в атмосферу — в 8 раз. Утилизация твердых отходов на предприятиях полного металлургического цикла в Германии достигла 95–99%, в Швеции — 93%, в Японии — 97–99%. В последние годы зарубежные металлургические предприятия взяли курс на 100%-ное обратное использование образующихся отходов.

Вследствие неэффективного использования материально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов их доля в себестоимости продукции российских металлургических предприятий существенно превышает уровень развитых стран, составляя 66,6–73,1%, в то время как в США она равна 60,1%, Германии — 60,9%, Японии — 53,8%, Франции — 61,7%. В условиях постоянного роста стоимости сырья и энергии снижение их удельных расходов на единицу произведенной продукции является одной из важнейших проблем, стоящих в настоящее время перед российской металлургией.

### **ТЕХНОГЕННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАКОПЛЕННЫХ ОТХОДОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Если образующиеся в настоящее время на промышленных предприятиях отходы производства в каком-то количестве подвергаются утилизации, то отходы, образовавшиеся до 1993 г., остаются лежать на поверхности, формируя техногенные массивы. Общее количество

накопленных отходов в целом по России оценивается в 80–100 млрд т. Metallургия наряду с угольной промышленностью лидирует по количеству накопленных отходов.

Несмотря на наличие технологических возможностей по переработке значительной части образующихся отходов в собственном производстве и увеличение в последние годы на российских металлургических предприятиях доли перерабатываемых отходов до 80–90%, все еще велико и с каждым годом растет количество отходов, размещаемых в отвалах, шламонакопителях, хвостохранилищах. Текущие тенденции образования отходов в условиях экономического развития российских металлургических предприятий обуславливают дальнейшее обострение и без того непростой экологической ситуации в регионах их размещения.

Накопления отходов металлургической и связанной с ней горнодобывающей отрасли на территории Урала и Кузбасса превышают 50 млрд т, а общая площадь занятых под их складирование и нарушенных вследствие этого экосистем составляет более 60 тыс. га. В Центрально-Черноземном районе основными объектами накопления техногенных отходов черной металлургии являются бассейн КМА, отвалы и шламонакопители Ново-Липецкого металлургического комбината (НЛМК) и ОАО «Северсталь».

На территории мест размещения отходов формируются новые месторождения полезных ископаемых — техногенные. Огромные накопленные запасы отходов и истощение природных ресурсов делают крайне актуальной проблему их разработки. Заскладированные в отвалах отходы могут служить сырьем для предприятий различных отраслей, способствуя сокращению потребления природных ресурсов. За время существования ОАО «Северсталь» на его собственной и прилегающих к нему территориях сформировалось новое антропогенное образование, сравнимое по мощности с крупным месторождением полиметаллического сырья, которое содержит более 200 тыс. т цветных и редких металлов, около 18 тыс. т мышьяка и до 3,5 тыс. т фтора. По ориентировочным расчетам, на территориях Магнитогорского, Новолипецкого, Нижнетагильского металлургических комбинатов существуют техногенные месторождения объемом более 1 млн т цветных и редких металлов каждое.

Таким образом, в объектах размещения отходов промышленности сосредоточены колоссальные объемы выведенных из хозяйственного оборота различных видов сырья, сконцентрированного на сравнительно небольших и более доступных для разработки площадях по сравнению с природными месторождениями. По запасам и содержанию полезных компонентов многие из таких объектов могут быть отнесены к техногенным месторождениям. Техногенные месторождения являются важным источником многих видов минерального сырья.

Суммарное содержание полезных компонентов, накапливающихся за десятки лет в техногенных месторождениях, сопоставимо, а иногда и превышает их количество в ежегодно добываемых рудах. Например, содержание железа в отходах черной металлургии нередко превышает 30%, что позволяет считать их полноценным вторичным железорудным сырьем, которое может быть подвергнуто обогащению для получения железорудного концентрата. Кроме того, некоторые виды металлургических отходов не нуждаются даже в обогащении и могут быть приравнены к рудным концентратам. Накопленные техногенные отходы также могут служить сырьем для производства продукции для промышленности строительных материалов и дорожного строительства, химической отрасли, сельского хозяйства, цветной металлургии, для получения драгоценных и редкоземельных металлов.

Необходимо отметить, что до настоящего времени в России не существует единого реестра объектов размещения отходов и тем более отсутствует идентификация объектов размещения промышленных отходов как техногенных месторождений. Ю. С. Юсфин отмечает, что «техногенные месторождения, в отличие от природных месторождений, возникли как unplanned продукция, и их запасы формировались стихийно. Отраслям народного хозяйства было выгодно использовать первичное сырье, и анализом техногенных месторождений практически никто не занимался. Можно сказать, что техногенные отходы — это сырье неизвестно для чего, сырье без дальнейшей судьбы».

В настоящее время в РФ в отвалах и хвостохранилищах находится около 80 млрд т отходов от добычи и переработки полезных ископаемых. В 12 млрд т накопленных твердых

отходов содержание ценных компонентов нередко выше, чем в рудах природных месторождений. К тому же эти отходы по своим технологическим свойствам и запасам зачастую превосходят руды, добываемые из недр.

Наиболее значительными по объему являются гидроотвалы и хвостохранилища. По данным Госгортехнадзора РФ, в 2000 г. в эксплуатации находилось 300 хвостохранилищ. Наибольшее количество отходов накоплено на Урале, в Приморском крае, в Мурманской, Белгородской, Кемеровской и Тульской областях.

В табл. 18.2 показана структура металлургического производства Российской Федерации по экономическим районам, которая свидетельствует о неравномерности распределения по регионам стадий металлургического производства, являющихся основным источником образования отходов: добычи и обогащения железных руд, выплавки чугуна и стали.

Таблица 18.2. Структура металлургического производства Российской Федерации (по экономическим районам)

Экономические районы	Добыча железных руд	Обогащение железных руд	Выплавка чугуна	Выплавка стали
Северный	+	+	+	+
Северо-Западный	-	-	-	+
Центральный	+	-	+	+
Волго-Вятский	-	-	-	+
Центрально-Черноземный	+	+	+	+
Поволжский	-	-	-	+
Северо-Кавказский	-	-	-	+
Уральский	+	+	+	+
Западно-Сибирский	+	+	+	+
Восточно-Сибирский	+	+	-	+
Дальневосточный	-	-	-	+

На основании анализа статистических отчетов металлургических предприятий, содержащих данные о динамике развития различных отраслей металлургического производства за период с 1913 по 1995 г., ориентировочно оценены объемы накопления отходов, которые авторы относят к техногенным грунтам (табл. 18.3).

Как видно из табл. 18.3, отходы металлургии присутствуют во всех экономических районах Российской Федерации, что подтверждает актуальность и необходимость проведения работ для сокращения отходов.

Общие объемы накопленных отходов черной металлургии на 1995 г. оценены в 16,5 млрд м<sup>3</sup>. Наиболее значительные объемы отходов накоплены в Уральском и Центрально-Черноземном экономических районах.

Огромные площади на территории России — около 1 млн га — занимают шлаковые отвалы металлургического производства. К наиболее насыщенным шлаковыми отвалами относится Уральский регион. Например, площадь шлакового отвала Челябинского электрометаллургического комбината (ЧЭМК) составляет 38 га, высота его бортов — 28 м, а мощность самого тела, по данным бурения скважин Южно-Уральской геологоразведочной партии, колеблется от 16,4 до 31 м. Аналогичная ситуация и на НЛМК. На территории комбината размещены шлаковые отвалы площадью около 40 га, на которых хранится около 3 млн т доменных шлаков, шламонакопители доменной газоочистки площадью около 180 га, полигоны твердых, жидких и маслоотходов.

Таблица 18.3. Характеристика накопления объемов основных типов отходов черной металлургии (млн м<sup>3</sup>)

Экономические районы России	1913–1969 гг.	1970–1979 гг.	1980–1989 гг.	1990–1995 гг.	Общие объемы
Объемы вскрышных пород					
Северный	37,0	136,1	381,9	195,9	750,9
Центральный	27,3	–	–	–	27,3
Центрально-Черноземный	678,5	493,3	777,1	285,4	2234,3
Уральский	3953,66	67,4	184,8	92,8	4298,7
Западно-Сибирский	236,34	189,24	11,95	6,8	444,3
Восточно-Сибирский	45,5	133,2	215,8	121,1	515,6
ВСЕГО	4978,3	1019,24	1571,6	702,0	8271,1
Объемы хвостов обогащения					
Северный	72,3	205,7	359,1	243,7	880,8
Центрально-Черноземный	3,7	230,0	607,9	378,0	1219,6
Уральский	88,6	288,2	562,9	305,0	1244,7
Западно-Сибирский	н. д.	н. д.	(с 1985 г.) 42,6	28,4	71,0
Восточно-Сибирский	29,6	143,8	153,3	89,5	416,2
ВСЕГО	194,2	867,7	1725,8	1044,6	3832,3
Объем доменных шлаков					
Северный	23,4	51,0	60,22	40,4	175,02
Центральный	19,2	19,59	20,67	11,6	71,06
Центрально-Черноземный	59,5	69,6	91,16	39,6	259,86
Уральский	316,2	219,7	257,56	111,8	905,26
Западно-Сибирский	97,6	88,1	93,17	41,1	319,97
ВСЕГО	516,0	447,9	522,8	244,5	1731,17
Объемы сталеплавильных шлаков					
Северный	58,1	65,08	83,5	50,65	257,3
Северо-Западный	22,6	11,3	12,7	4,73	51,2
Центральный	13,9	14,4	13,41	4,55	46,3
Центрально-Черноземный	89,9	65,48	93,76	47,76	296,9
Волго-Вятский	8,9	16,58	18,26	7,16	50,9
Поволжский	36,9	24,5	28,8	9,56	99,8
Северо-Кавказский	23,7	14,1	13,82	5,28	56,9
Уральский	449,8	362,2	403,5	16,62	1381,7
Западно-Сибирский	123,91	97,44	117,14	50,57	389,1
Восточно-Сибирский	6,43	5,7	6,7	2,29	21,6
Дальневосточный	8,01	8,69	10,51	4,26	31,5
ВСЕГО	812,1	686,0	802,1	353,0	2682,7

Наиболее значительное количество техногенных месторождений сформировалось на Урале. За 300-летний период интенсивного горно-металлургического производства на Урале накоплены миллиарды кубометров отходов. Среди учтенных техногенно-минеральных объектов преобладают объекты с запасами отходов до 5 млн т (107 объектов). На 59 объектах сосредоточено отходов от 5 до 50 млн т. Только на 22 объектах запасы накопленных техногенных отходов составляют свыше 50 млн т на каждом из них (Гороблагодатское РУ, Высокогорский и Качканарский ГОКи, Ураласбест, Первоуральское РУ и др.). В отвалах горнодобывающих предприятий накоплено: Гороблагодатское рудоуправление — вскрышных пород 322,6 млрд м<sup>3</sup>, хвостов обогащения — 143 млрд м<sup>3</sup>; Первоуральское рудоуправление — вскрышных пород 35 млрд м<sup>3</sup>, скальных пород 21,7 млрд м<sup>3</sup>, хвостов СМС 35 млрд м<sup>3</sup>; Качканарский ГОК — вскрышных пород 575 млрд м<sup>3</sup>, хвостов ММС 741 млрд м<sup>3</sup>;

Магнитогорский МК — вскрышных пород 769 млрд м<sup>3</sup>, хвостов ММС 36,3 млрд м<sup>3</sup>; Бакальское р/у — вскрышных пород 336 млрд м<sup>3</sup>, хвостов ММС 37 млрд м<sup>3</sup>; Орско-Халиловский МК — вскрышных пород 14 млрд м<sup>3</sup>. Наибольший объем размещения отходов — у Качканарского ГОКа. На территории Черемшанского шламохранилища Высокогорского ГОКа площадью 260 га накоплено свыше 40 млн т отходов обогащения железных руд. На территории металлургического завода им. А. К. Серова расположено шлакохранилище (42 га) доменных и мартеновских шлаков и шламохранилище. На Верхнесалдинском металлургическом производственном объединении (ВСМПО) накоплены отвалы высокотитанистых литейных шлаков (36,1 тыс. т). На территории НТМК находятся такие крупные техногенные месторождения, как отвал доменных шлаков (30 млн т) и отвал сталеплавильных шлаков (21 млн т), а также шламохранилище конвертерных пылей и шламов доменного и мартеновского производств в количестве 361,8 тыс. т. На Алапаевском метзаводе скопилось свыше 100 тыс. т доменных шламов.

Отходы черной металлургии Южной Сибири и Кузбасса сосредоточены в 44 породных отвалах объемом 320 млн м<sup>3</sup>, в 18 отвалах сухой магнитной сепарации (83,5 млн м<sup>3</sup>), в отвалах мокрой магнитной сепарации Абагурской и Мундыбашской агломерационно-обогачительных фабрик (более 100 млн т), в шлаковых отвалах доменного производства Кузнецкого (КМК) и Западно-Сибирского (ЗСМК) металлургических комбинатов (соответственно 36 и 29,4 млн т), в отвалах сталеплавильных шлаков КМК и ЗСМК (соответственно 14,4 и 28 млн т). Только на территории г. Новокузнецка — промышленного центра Кузбасса — находится 2 крупнейших объекта размещения техногенных отходов: хвостохранилище Абагурской ОАФ площадью 400 га и шламонакопитель ЗСМК площадью 300 га. Шламонакопитель ЗСМК является формирующимся техногенным месторождением с расчетными запасами железосодержащего сырья со средней концентрацией 54,27% свыше 700 тыс. т.



Рис. 18.1. Объекты размещения техногенных отходов в Кемеровской области:

- а) хвостохранилище Абагурской ОАФ; б) шламонакопитель Западно-Сибирского металлургического комбината; в) отвал отходов коксохимического производства; г) флотхвостохранилище отходов углеобогащения ЦОФ «Абашевская»

Необходимо отметить, что стимулом для вовлечения в переработку железосодержащих отходов за рубежом является высокая плата за их складирование в отвалах, которая в США и Канаде, например, составляет 85–90 долл./т, т. е. около 6 000 руб./т. В России плата за размещение таких отходов, как правило, относящихся к IV классу опасности, в 2018 г. составила 663 руб./т, то есть примерно в 9 раз ниже. Поэтому развитие технологий переработки вторичных ресурсов в значительной степени зависит от мер государственного регулирования и стимулирования этого направления.

## ПОТЕНЦИАЛ ОТХОДОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

### Металлургические шлаки

Шлак сопутствует всем современным технологическим процессам производства черных металлов. Шлаки доменного производства содержат невосстановленные соединения, а в состав сталеплавильных шлаков входят вновь образовавшиеся продукты окисления и соединения, поступающие при плавлении.

Металлургические шлаки представляют собой многокомпонентные системы, в которых оксидами, определяющими их состав, являются CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO и FeO. Кроме этого, они содержат оксиды Mn, P, Cr, V, Ti и др. Высоким содержанием остаточного железа характеризуются только конвертерные шлаки, в то время как доменные и электросталеплавильные шлаки имеют преимущественно алюмосиликатный состав.

В табл. 18.4 представлены данные о химическом составе шлаков доменного и сталеплавильных (конвертерный, электросталеплавильный) процессов и видах традиционно производимой в мире шлаковой продукции.

Таблица 18.4. Химический состав металлургических шлаков и виды шлаковой продукции

Вид шлака	Содержание компонентов, %								Виды продукции
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	TiO <sub>2</sub>	FeO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
Доменный	43–50	32–40	6–9	4–8	0,1–1,0	0,2–1,4	0,2–0,9	–	Гранулированный шлак — производство цемента Шлаковая пемза — заполнитель легких бетонов Известковое удобрение Щебень, песок — дорожное строительство, бетоны, шлакоминеральные активные смеси, обратные засыпки в строительстве
Конвертерный	41–56	11–22	1–3	2–5	3–6	–	8–20	0,1–10	Дробленый шлак — для выплавки чугуна Щебень и песок — дорожное строительство Известковые и фосфорные удобрения
Электросталеплавильный	3–45	15–26	3–11	10–20	1–8	–	1,3–1,8	–	Щебень и песок — дорожное строительство Известковое удобрение

Основными видами продукции из шлаков как в России, так и за рубежом являются гранулированный шлак, щебень и песок, оборотный продукт для металлургии, пемза, известковые и фосфорные удобрения. Менее массовым является производство шлаковой ваты, литых



изделий, высокоглиноземистого клинкера. Вторичным продуктом, производимым из гранулированных шлаков, являются шлакоситаллы.

### Мелкодисперсные отходы металлургического производства

Мелкодисперсными отходами в черной металлургии являются пыли и шламы газоочистных сооружений и аспирационных устройств. Шламы и пыли в металлургии представляют собой остатки сырья и продуктов его переработки, возникающие в процессах металлургического производства. Основные виды мелкодисперсных отходов представлены в табл. 18.5.

Металлургические пыли и шламы относятся к группе железосодержащих отходов, которые классифицируются по массовой доле железа на:

- а) богатые — массовая доля железа 55–67% (шлам и пыль газоочисток конвертерных цехов);
- б) относительно богатые — массовая доля железа 40–55% (шламы и пыли аглофабрик, газоочисток и подбункерных помещений доменных печей);
- в) бедные — массовая доля железа менее 40% (шлам и пыль газоочисток электросталеплавильных печей).

Химический состав пылей и шламов зависит от состава сырья и технологического процесса и может меняться в существенных пределах на различных заводах и в разные периоды времени.

В табл. 18.5 приведены усредненные данные о химическом составе пылей и шламов черной металлургии.

Таблица 18.5. Химический состав пылей и шламов черной металлургии, %

Элементы и соединения	Агломерационные	Доменные	Конвертерные	Эл./стале-плавильные
Fe <sub>общ</sub>	22–58	40–55	41–67	30–55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27–70	20–60	39–78	
FeO	3–22	5–9	5–67	
CaO	2–21	4–10	3–20	1,5–17,0
SiO <sub>2</sub>	4–10	6–11	1,4–2,9	2–12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5–3	2–4	0,11–0,36	0,3–10,0
MgO	1–6	1–3	0,15–1,48	5,0–27,0
K <sub>2</sub> O	0,09–0,22	0,12–0,53	0,1–0,26	0,3–1,0
Na <sub>2</sub> O	0,05–0,16	0,1–0,3	0,1–0,61	1,0–2,0
TiO <sub>2</sub>	0,1–0,37	0,1–0,4	0,03–0,05	0,2–0,6
Mn	0,08–0,41	0,1–0,5	0,74–1,68	1,5–5,5
P	0,02–0,27	0,03–0,23	0,04–0,18	0,02–0,25
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01–0,04	0,01–0,14	0,01–0,06	До 0,36
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01–0,08	0,01–0,1	0,01–0,23	0,01–0,1
S	0,14–0,78	0,2–0,9	0,04–0,32	0,02–0,5
BaO	0,01–3,49	0,03–0,86	0,01–0,03	
Ni	0,004–0,079	0,01–0,03	0,01–0,04	0,02–8,0
Cu	0,01–0,04	0,01–0,02	0,01–0,07	0,1–0,5
Zn	0,01–0,09	0,5–15,4	0,18–4,16	До 30,0
Pb	0,01–0,10	0,1–0,6	0,01–0,61	До 5,0
Mo	0,002–0,004	0,002–0,02	менее 0,002	0,01–0,09
Sr	0,004–0,10	0,001–0,01	0,004–0,02	
As	0,002–0,03	0,002–0,005	0,002–0,02	
C	1,78–12,06	6–26	0,7–4,32	0,5–3,0

Известно, что шламы, содержащие от 37 до 52%  $Fe_{\text{общ}}$ , от 4 до 15% С, оксиды кальция, магния, марганца, алюминия, кремния, относятся к ценному техногенному сырью. Согласно техническим требованиям к качеству железосодержащих пылей и шламов, при их утилизации в металлургии суммарное содержание в них железа, углерода, а также оксидов Са и Mg должно быть не ниже 45%. Наибольшую ценность для черной металлургии имеет железо, содержание которого в мелкодисперсных отходах достигает 55–67%. Пыль электропечей, основная составляющая шихты которых — металлолом, содержит значительные количества цветных металлов: Zn (до 30%), Pb (до 8,0%) и др.

Ускоренное развитие прокатного производства привело к значительному увеличению расхода воды на охлаждение оборудования и образованию прокатной окалина. По химическому составу окалина близка к чистому магнетиту (65–72% Fe), а по гранулометрическому составу представлена в основном фракцией менее 0,2 мм. Прокатная окалина из отстойников прокатных станов (вторичная, или замасленная) имеет влажность 20–30%, содержание смазок — 2–3%, содержание железа — 60–70%.

## **РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

### **Историческое развитие переработки металлургических шлаков**

Переработка металлургических шлаков получила широкое распространение в мире. На современных металлургических заводах не только утилизируются все образующиеся шлаки, но и постепенно разрабатываются старые шлаковые отвалы. Переработка и использование шлаков в настоящее время представляют собой самостоятельную подотрасль металлургического производства.

В 1901 г. А. И. Брезгунов предложил применять основные мартеновские шлаки в шихте доменных печей и этим положил начало использования шлаков в самой металлургии. Однако в анализе состояния переработки и использования шлаков в США указывается, что на протяжении долгой истории развития черной металлургии было разработано и применено много выдающихся открытий для улучшения производства чугуна и стали, но даже в 1966 г. не было единого высокоэффективного метода, который позволил бы перерабатывать значительное количество шлака в продукцию, удовлетворяющую основным требованиям потребителя.

В 1908 г. компания «Карнеги Стил» (США) начала исследование возможных областей применения доменного шлака. В 1911 г. в отчете компании «Карнеги Стил» «Использование доменного шлака в производстве бетона» впервые обоснованно говорилось о возможности использовать доменный шлак в производстве бетона.

Потребители не сразу оценили по достоинству шлаковые материалы. Дорожники возражали против использования шлаков, так как из-за шероховатой поверхности и пористости шлака расходовалось больше асфальта. Строители определили шлак как нежелательный материал для использования в бетонных конструкциях. Железнодорожники скептически отнеслись к балласту из шлака, опасаясь, что высокое содержание металла в нем может вызывать замыкание сигнальных автоматических систем.

К 1917 г. стало очевидно, что шлак является ценным продуктом и что компаниям — производителям шлака стоит объединиться для более эффективного продвижения нового продукта.

Для координации решений технических проблем, возникающих при развитии новых направлений использования шлаков, разработки технических условий и усиления контроля за производством шлаковой продукции в 1918 г. в США была создана Национальная шлаковая ассоциация, заслугой которой стало создание шлакоперерабатывающей индустрии в США.

Позже во многих странах были созданы специальные институты и организации, занимающиеся вопросами использования шлака в строительстве, иногда на базе металлургических заводов: во Франции — Техническая ассоциация по изучению и использованию доменных шлаков, в Канаде — Национальная шлаковая ассоциация, в Англии — Британская ассоциация шлака. В 2000 г. Европейской конференцией по шлакам в Дюссельдорфе была основана общеевропейская ассоциация шлаков ЕВРОШЛАК, ядром которой стал немецкий исследовательский институт металлургических шлаков РЕПЗ.

Организация переработки шлаков в разных странах неодинакова, что объясняется специфическими условиями каждой страны. Первые шлакоперерабатывающие заводы были пущены в США самими металлургическими предприятиями. В 1919 г. в США существовало 14 компаний — производителей шлака, которым принадлежало 32 завода. Позже шлаки передали специализированным объединениям. В настоящее время в США переработка шлака осуществляется в основном компаниями, независимыми от металлургов. В Англии и Германии шлаковую продукцию получают непосредственно на металлургических заводах, в других странах шлак в жидком состоянии или частично обработанный передают компаниям и специальным фирмам по производству строительных материалов.

В настоящее время в мире перерабатывается около 100% доменных шлаков и 80–90% сталеплавильных. В табл. 18.6 приведены данные о переработке металлургических шлаков за рубежом к началу XXI в. без учета их потребления на собственные нужды металлургических предприятий.

Таблица 18.6. Использование металлургических шлаков за рубежом

Страна	Образование шлаков, млн т/год			Переработано, %, доменные/сталеплавильные	Направления использования
	всего	доменные	сталеплавильные		
Япония	> 40	28–30	8–10	> 90/80	Строительные материалы (щебень, цемент, бетон и др.), дорожное строительство, стекольное производство, удобрения
Германия	15–16,5	11–11,8	4	100/>90	Строительные материалы (щебень, брусчатка, цемент, шлаковата, пемза, газобетон и др.), удобрения
США	27	20	> 6	95/>70	Строительные материалы (щебень, пемза, цемент и др.), тарное стекло, покрытие дорог, удобрения
Франция	> 16	14	2,3	> 90	Строительные материалы (щебень, пемза, наполнители бетонов), покрытие дорог, литейное производство, удобрения
Великобритания	> 13	10–11	> 2	100/90	Дорожное, аэродромное и промышленное строительство (щебень — > 70%, шлаковая пемза, бетоны, шлакоситалл, шлаковата и др.)
Канада			1,5	100/90	Строительные материалы (щебень, гранулированная пемза, цемент, кирпич), покрытие дорог

Металлургический шлак признан минеральным сырьевым материалом. В США, Великобритании, Германии, Франции воздушно охлаждаемые металлургические шлаки в основном перерабатывают на щебень, применяемый в качестве балласта при строительстве железных дорог, а также используют в качестве заполнителя при сооружении аэродромных покрытий

и автомобильных дорог. Асфальтобетонные покрытия с применением шлакового заполнителя характеризуется высокой прочностью, устойчивостью к истиранию, большим коэффициентом сцепления, отсутствием сдвиговых деформаций. Вся продукция шлакопереработки экономически выгодна. Например, шлаковый щебень в 1,5–2 раза дешевле природного и требует в 4,5 раза меньше удельных капитальных вложений. Шлаковая пемза в 3 раза дешевле керамзита и требует в 1,5 раза меньше удельных капитальных вложений.

На рис. 18.2 представлены направления использования металлургических шлаков на заводах крупнейшей в мире международной металлургической компании ArcelorMittal, имеющей производственные мощности в 18 странах.

В СССР показатели по переработке и использованию доменных и сталеплавильных шлаков в течение многих лет были существенно ниже, чем в странах с развитой металлургией. В настоящее время в России 86% металлургических шлаков используется в качестве сырья в промышленности строительных материалов и как замена природного щебня, 10% — в качестве металлосодержащего сырья для передела на металлургических заводах в РФ и 4% — экспортируется как стройматериал или металлургическое сырье.



Рис. 18.2. Направления использования металлургических шлаков на заводах компании ArcelorMittal

### Доменные шлаки

Выдающийся металлург академик И. П. Бардин писал, что шлаки — это не отходы, а ценное строительное сырье.

Самая ранняя попытка использования доменного шлака относится к 1589 г., когда в Германии из него отливали пушечные ядра. В то же время в Европе шлак не имел широкого практического применения до конца XIX в. Впервые гранулированный шлак был применен в качестве добавки при производстве цемента в Германии в 1892 г.

В России шлаки начали применять в конце XVIII — начале XIX в., когда доменные печи достигли сравнительно больших размеров. Литые шлаковые камни в те времена использовали при возведении фундаментов для зданий. В XX в. начался новый этап интенсивных поисков рациональных путей использования и переработки металлургических шлаков. Серьезным тормозом применения шлаков было недостаточное знание их свойств. С развитием металлургии и силикатной промышленности во второй половине XIX в., когда расширилось производство искусственного технического камня, возникла потребность изучения структуры и фазового состава шлаков для определения возможных путей их использования. Однако поскольку в дореволюционной России металлургия и промышленность строительных материалов развивались слабо, такие исследования не носили целенаправленного характера.

В СССР, начиная с первых пятилеток, вопрос о применении шлаков в народном хозяйстве встал очень остро. При интенсивной реконструкции действующих и строительстве новых

предприятий потребовалось огромное количество строительных материалов. В поисках сырьевых ресурсов внимание было обращено на металлургические шлаки, количество которых одновременно с темпами роста производства чугуна и стали быстро возрастало. Период с 1933 по 1937 г. характеризовался для СССР интенсивными исследованиями, выполнением опытных и проектных изысканий по использованию доменных шлаков, для чего в Москве в 1933 г. была создана Всесоюзная контора по шлакопереработке.

В Великобритании, Люксембурге, Германии, Канаде 100% доменных шлаков перерабатывалось еще в конце 80-х гг. XX в., в США — 95%, во Франции и Японии — 90%. При переработке производились следующие виды продукции:

- США — щебень (89%), гранулированный шлак (6%), пемза (5%);
- Германия — щебень (57%), гранулированный шлак (27%), пемза (7%), другое (9%);
- Франция — щебень (40%), гранулированный шлак (50%), другое (10%);
- Япония — щебень (88%), гранулированный шлак (12%);
- Великобритания — щебень (76%), гранулированный шлак (2%), пемза (2%), другое (10%).

По данным общеевропейской ассоциации шлаков ЕВРОШЛАК, из 25 млн т доменных шлаков, образовавшихся в 2000 г. в европейских странах, почти 100% было использовано: около 60% — в производстве цемента, а остальная часть — в других сферах строительной индустрии: при изготовлении бетонных изделий и строительстве дорог.

Наиболее крупными потребителями доменного шлака являются цементная промышленность (в Японии — 70% доменного шлака, в Германии — 55%) и дорожное строительство (в Японии — 20%, Германии — 40%).

Исторически сложилось так, что доменные гранулированные шлаки в России и некоторых европейских странах используются преимущественно для производства вяжущих материалов, особенно для производства шлакопортландцемента. Шлакопортландцемент — это гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее в воде и на воздухе, получаемое совместным тонким измельчением портландцементного клинкера и гранулированного шлака. Содержание шлака в шлакопортландцементе по ГОСТ 10178–85 должно составлять 21–60% массы цемента. По американскому стандарту содержание шлака должно составлять от 25 до 65%, по английскому — не больше 65%. В Германии стандартизованы два вида шлакопортландцемента: железопортландцемент, содержащий не более 35% шлака, и доменный цемент с содержанием шлака от 31 до 85%. Во Франции выпускают 4 вида шлакопортландцемента: железопортландцемент с 20–30% шлака, смешанный металлургический цемент с 50% шлака, доменный цемент с 70% шлака и шлако-клинкерный цемент, содержащий не менее 80% шлака. Каждый из этих видов цемента делится на две марки по прочности. В Германии каждый вид шлакопортландцемента имеет три марки по прочности, а в Англии и США — только одну марку, как и обыкновенный портландцемент.

Шлакопортландцементы широко применяются в настоящее время во многих странах для общих строительных работ, для гидротехнических сооружений и для сборных железобетонных изделий (например, бетонные трубы). По прочности они не уступают портландцементу, но нуждаются в более тщательном уходе при повышенных и пониженных температурах.

В Российский справочник наилучших доступных технологий (НДТ) ИТС 6-2015 «Производство цемента» включена замена природных сырьевых компонентов отходами производства, прежде всего, металлургическими шлаками (до 80% карбонатного или алюмосиликатного компонента), а также железосодержащими хвостами, шламами и пылями черной металлургии (до 100% железосодержащего компонента). В то же время в России в последние годы наблюдается снижение использования доменных гранулированных шлаков цементной промышленностью в связи с падением спроса на шлакопортландцемент. В связи с этим приобретает большое значение расширение масштабов производства шлакового заполнителя, в том числе шлаковой пемзы, которая является заменителем керамзита, а также литого шлакового щебня для тяжелых бетонов.

Бетоны с заполнителем из доменных гранулированных шлаков отличаются рядом преимуществ перед традиционными бетонами. Доменный шлак в составе портландцементного бетона выполняет функцию активного заполнителя, т. е. его поверхностный слой реагирует с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе алита. При этом образуется дополнительное количество гидросиликатов кальция, которые создают чрезвычайно прочную связь заполнителя с цементной матрицей; полностью исчезают капиллярные каналы, которые в результате усадки цементного камня образуются между ним и поверхностью заполнителя. Это приводит к значительному повышению коррозионной стойкости бетона с активным заполнителем по сравнению с традиционными составами в большинстве агрессивных сред, в том числе даже против такого грозного вида химической агрессии, как кислотная. Кроме этого, благодаря специфической структуре и отсутствию микрозазоров на границе раздела вяжущего и заполнителя, такие бетоны обладают отличительными физико-механическими характеристиками. Именно этим обусловлено широкое применение бетонов на шлаковом заполнителе в США, Японии и других странах.

В мировой практике нет единого направления в применении шлаков и продукции из них, что объясняется спецификой каждой страны. Так, в Великобритании и Германии шлак перерабатывают непосредственно на металлургических заводах, а в США шлак перерабатывали в середине XX в. 36 компаний, в том числе: 18 производили шлаковую пемзу, 17 — гранулированный шлак, 39 — водоохлажденный шлак.

В США гранулированные доменные шлаки используют для производства цемента и удобрений, для известкования кислых почв, в производстве бетона, тарных стекол (содержание шлаков в шихте до 30%), битумных масс для автомобильных дорог, железнодорожного балласта, для восстановления нарушенных земель.

Во Франции граншлак из доменных шлаков и шлаковый щебень используют для строительства дорог, в качестве наполнителя бетонов.

В Японии щебень из доменных шлаков используют для инженерной подготовки местности, дорожного строительства, гранулированный шлак — для производства различных строительных материалов (заполнителей бетонов, цементов и др.) и изделий (противопожарных панелей, волнорезов и др.).

В Великобритании большую часть доменных шлаков в гранулированном виде применяют со шлаковой пемзой для производства бетонов, шлаковаты, шлакокерамики.

В Канаде производят окомкованный доменный шлак, который используют в качестве вяжущего в строительстве.

В Австрии из доменных гранулированных шлаков получают высококачественные изоляционные материалы сложной конфигурации, которые применяются в строительстве, электротехнике и в химической промышленности (кислотостойкий материал).

В Германии шлаковый щебень используют для дорожного, аэродромного и промышленного строительства, из гранулированных доменных шлаков производят шлаковый цемент, шлаковую пемзу используют в качестве пористого заполнителя для изготовления теплоизоляционных и легкобетонных изделий, молотые фосфатшлаки применяют в сельском хозяйстве. Спрос цементной промышленности на гранулированный доменный шлак в Германии превышает объемы его производства вследствие: снижения общего энергопотребления при производстве клинкера, экономии природных ресурсов (известняка, мергеля), высокой стоимости сертификатов на выброс углекислого газа, при этом выбросы CO<sub>2</sub> снижаются более чем в 3 раза при 75%-ной замене клинкера шлаком.

В СССР длительное время изучением, использованием и даже переработкой металлургических шлаков занимались организации строительной отрасли. В 1966 г. при УралНИИЧМ был создан научно-исследовательский отдел — головной по шлакам в СССР. Отдел шлакопереработки был создан также в Гиромезе. В результате внедрения отечественных разработок в 70-х гг. XX в. уровень использования доменных шлаков резко возрос и составил

в 1977 г. 80,1%. Была поставлена задача к 1980 г. перевести все металлургические предприятия на работу без шлаковых отвалов и к 1990 г. ликвидировать существующие отвалы.

На металлургических заводах СССР к началу 90-х гг. XX в. из доменных шлаков производили следующие виды продукции:

- гранулированный шлак (72%);
- щебень (23%);
- пемза (4%);
- шлаковата (0,3%);
- высокоглиноземистый клинкер (0,2%);
- литые изделия (0,1%).

В 1990-х гг. эксплуатировалось 40 установок по производству гранулированного лака, в том числе 25 установок использовали полусухой способ грануляции (17 — гидрожелобной, 8 — барабанный), 11 установок применяли мокрый способ (желобной — 1, бассейновой — 10) и 4 припечные установки.

Гранулированный шлак начали получать еще в XIX в., охлаждая расплавленный доменный шлак водой. В дальнейшем технологии грануляции шлака развивались и совершенствовались.

Из всех существующих способов грануляции доменных шлаков используют в основном три:

1. Мокрое гранулирование — на текущую струю расплавленного шлака подают струю воды, и обе струи падают в бассейн с водой. В результате расплавленный шлак разбрызгивается, и эти брызги затвердевают в воде в виде мелких зерен, или гранул.

2. Полусухое гранулирование — расплавленное вещество, смешанное со струей воды, подают на вращающийся барабан с лопастями, с которых оно отбрасывается в виде капель. При падении в воздухе эти капли затвердевают.

3. Сухое гранулирование — расплавленное вещество гранулируют под воздействие сжатого воздуха, азота или водяного пара.

По размещению грануляционных установок способы грануляции подразделяются на центральные (внепечные) и припечные.

Грануляция в бассейнах — самый старый способ, еще встречающийся на практике и заключающийся в том, что шлаковый расплав из ковшей сливают в бассейн с водой, в некоторых случаях — в промежуточный наклонный желоб.

В России основная масса гранулированного шлака (88,3%) производится на центральных установках преимущественно полусухим гидрожелобным способом.

Гидрожелобные установки в СССР начали вводить в действие с 1958 г. Установка состоит из 6–9 гидрожелобных агрегатов, каждый из которых включает стальной гидрожелоб длиной 9–10,5 м, установленный под углом 3° с подъемом к концу, к которому примыкает приемная ванна. С торца гидрожелоба смонтирована гидронасадка, в которую подается вода под давлением 0,4–0,8 МПа, которая подхватывает стекающий в гидрожелоб жидкий шлак, дробит его на капли, охлаждает и отбрасывает на расстояние до 40 м. При штабелировании шлака происходит частичное обезвоживание продукции, а стекающая вода возвращается в систему обратного водоснабжения.

Недостаток центральных грануляционных установок, расположенных за пределами доменного цеха, состоит в том, что для них требуется значительная протяженность железнодорожных путей, большой парк шлаковозных ковшей и локомотивов. За время транспортировки температура огненно-жидкого шлака снижается на 100–150°С, что ухудшает качество гранулята как материала для производства вяжущих веществ. Кроме того, 30–35% шлака уходит на образование корок, коржей и настелей в ковшах. Это определяет относительно низкий выход гранулированного шлака (не более 75%) из исходного огненно-жидкого шлака.

Наиболее рациональным методом переработки шлака является грануляция шлака на припечных установках, исключая из эксплуатации парк шлаковозных ковшей, что значительно упрощает организацию и удешевляет производство. Эксплуатационные затраты при припечной грануляции шлака на 44% ниже, чем при центральной грануляции; капитальные затраты ниже на 55%. Установки припечной грануляции шлака распространены в Японии, Франции, Германии.

На заводах Японии распространен способ припечной грануляции, разработанный компаниями «Раза трейдинг» и «Ниппон кокан».

Выпускаемый из печи шлак поступает в гидрожелоб, куда подается вода. Шлаководяная пульпа из приемного бункера насосом перекачивается в обезвоживающие резервуары с перфорированными стенками и дном, через которые осуществляется фильтрация воды, возвращаемой на грануляцию.

В Германии система грануляции разработана компанией «АИО-Штальбау и Хеш» и используется на многих заводах. Основные технологические операции: грануляция путем впрыскивания воды в поток шлака; подача пульпы в обезвоживающие резервуары; обезвоживание через фильтрующий слой.

Использование воды в мокрых способах грануляции шлака требует значительных затрат на организацию оборотного водоснабжения, ее очистку и обезвоживание получаемого граншлака. Поэтому более современными и перспективными являются технологии полусухого (барабанный) или сухого гранулирования.

Сухая грануляция проводится воздухом или газом под давлением порядка 0,4–0,6 МПа, которые воздействуют на струю шлакового расплава и измельчают его. Гранулы, пролетая несколько метров, охлаждаются, затвердевают и попадают в емкость для сбора. Сухой способ грануляции доменного шлака с применением сжатого воздуха используется компанией «Синнихон сэйтэцу» (Япония), расход воздуха составляет 2400 м<sup>3</sup>/мин при давлении 6,5 кПа.

Японскими компаниями «Мицубиси дзюкоге», «Ниппон кокаи» и «Тайхэйе киндзоку» разработаны установки воздушной грануляции доменного и конвертерного шлаков, которые эксплуатируются на заводах фирмы в Фукуяме. Шлаковый расплав из ковша подается в отделение предварительной обработки, где в него вносят, для улучшения качества продукта, различные добавки для регулирования температуры и вязкости расплава. После этого расплав по желобу поступает в грануляционную камеру, где его дробит струя воздуха, подаваемого под давлением. Для достижения заданных свойств гранулированного шлака в зависимости от свойств расплава регулируют соотношение скоростей движения потоков воздуха и жидкого шлака. Тепло утилизируется излучением из потока частиц, а также из слоя, в который падают частицы. На одной из доменных печей в Фукуяме работает установка придоменной грануляции расплава, в которой струю расплава направляют в лоток между двумя вращающимися в разные стороны барабанами, поверхность которых охлаждается водой. В установке используется до 38% тепла жидких шлаков.

Фирма «Сумито киндзоку коге» создала установку сухой грануляции доменного расплава с утилизацией его тепла. Процесс грануляции расплава осуществляют на вращающемся барабане. Гранулят затем затвердевает в псевдооживленном слое твердого шлака. Установка работает при температуре нижнего слоя до 700°С и производительности до 50 т/ч. Вращающаяся чаша — воздуходувный распылитель, полученный гранулят отличается большой плотностью (2,8–2,9 г/см<sup>3</sup>) и пригоден в качестве мелкого заполнителя для бетонов. На установке утилизируется 55% физического тепла шлака.

В Швеции в Swedish State Steel Company, Merax LTD развивается процесс грануляции и утилизации тепла шлака. Шлак гранулируется ударением падающего слоя частиц ранее отвердевшего шлака. Пленка разрушается на гранулы, которые затем падают в многоярусный псевдооживленный слой, из которого утилизируется тепло. По этому методу более 60% тепла



шлака утилизируется в виде пара. Большое содержание стеклофазы в данном шлаковом продукте делает его пригодным для производства цемента.

В Австрии для размельчения шлакового расплава используют устройство распылительной камеры круглого сечения, по оси которого из промежуточного ковша поступает струя жидкого шлака, разбиваемая двумя рядами подающих горячий газ, или топливных горелок. Частички шлака на дне камеры попадают на вращающийся диск, разбрасывающий их центробежной силой в кольцевую приемную камеру с подогреваемыми стенками в зоне поступления раздробленных частичек шлака и с охлаждаемыми со стороны кольцевой разгрузочной камеры.

Компания Paul Wurth (Люксембург) подошла к решению проблемы сухой грануляции шлака, предложив простой, но эффективный метод: стальные шарики смешиваются с жидким шлаком для быстрого охлаждения доменного шлака. При этом получают желаемый продукт с максимальной возможной долей энергии. Основываясь на результатах многочисленных экспериментальных исследований, подтвердивших качество шлака и его пригодность для использования в цементном производстве, компания Paul Wurth соорудила полномасштабную пилотную грануляционную установку на доменной печи № 4 завода Rogesa. Первая очередь пилотной установки была успешно введена в эксплуатацию в конце 2013 г. и может обрабатывать до 8 т/мин жидкого доменного шлака.

В России различные варианты технологии воздушной грануляции шлаковых расплавов разработаны ОАО «Уральский институт металлов», которые опробованы в промышленных условиях на ОАО «Северсталь». Сравнение эксплуатационных затрат показывает, что воздушная грануляция шлаковых расплавов в 1,5–2 раза экономичнее водных способов грануляции. Получаемый граншлак имеет низкие значения влажности и пористости и может быть использован в производстве строительных материалов.

В СССР свыше 80% минераловатных изделий производилось из шлаковой ваты, которая изготавливалась как непосредственно из жидких доменных шлаков, так и путем переплавки твердого шлака (щебня). Различают ванный и ваграночный способы производства минеральной ваты. Наиболее распространенным способом является ваграночный, а наиболее рациональным — ванный с использованием жидкого шлака, заливаемого в отапливаемую газом или мазутом ванную печь-миксер регенеративного типа.

Жидкий шлак сливают в шлакоприемник, откуда он по желобу поступает в ванную печь, где его подогревают до 1400–1450°С и затем выпускают с помощью фидеров.

Переработка доменного шлака с получением пемзы в СССР была вторым по важности видом производства после грануляции, что связано с высокой потребностью в пористых заполнителях для крупнопанельного строительства. Технологию производства шлаковой пемзы начали осваивать с 1932 г., а промышленный выпуск начался со второй половины 1950-х гг. В 1974 г. шлаковую пемзу в СССР производили на 7 предприятиях с общим выпуском около 2 млн м<sup>3</sup> в год. Для производства шлаковой пемзы применяли следующие способы: траншейно-брызгальный, бассейновый, вододутьевой и гидроэкранный. Самым простым и надежным в эксплуатации являлся траншейно-брызгальный, наиболее перспективным зарекомендовал себя гидроэкранный.

В траншейно-брызгальных установках шлаковый расплав по мере слива в траншею пронизывается водяными струями, подаваемыми через брызгала под давлением 0,6 МПа. Образуется пористый шлаковый «пирог», который подают в дробильно-сортировочное отделение. Недостатками способа являются низкая производительность и недостаточно высокое качество получаемой пемзы.

Гидроэкранный способ заключается в многократном воздействии на шлаковый расплав струей воды в открытых желобах, оборудованных экранами.

Гидроэкранный способ позволяет получить высококачественную пемзу с равномерной мелкопористой структурой.

Производство шлаковой пемзы, как и гранулированного шлака, сопровождается образованием и накоплением в парогазовой смеси сернистых соединений. Однако скорость охлаждения поризованной массы при гидроэкранным способе получения пемзы значительно ниже, чем гранулированного шлака. В этих условиях десульфурация шлака достигает 40% (по сравнению с 10% при грануляции), что обуславливает увеличение сернистых выбросов в 4 раза. Наряду с сернистыми соединениями в парогазовой смеси, особенно в период охлаждения вспученной массы, имеется пыль, содержание которой доходит до 3–4 г/м<sup>3</sup>.

По экологическим соображениям и из-за высокой насыпной плотности в 1990 г. прекращено производство шлаковой пемзы на комбинате «Азовсталь» траншейно-брызгальным способом, и до последнего времени ее производили гидроэкранным способом на Новолипецком, Череповецком, Челябинском и Криворожском металлургических предприятиях. В настоящее время из-за больших парогазовых выбросов прекращено производство пемзы этим способом на НЛМК.

Наиболее распространенным в мире способом переработки доменного шлака является производство шлакового щебня, который используется в качестве заполнителя в строительной отрасли. Это направление позволяет вовлечь в строительный комплекс значительно большее количество шлака, чем в производство из него вяжущих веществ. Особенно эффективно производство шлакового щебня при использовании технологии придоменной переработки шлака. При этом используется та тепловая энергия, которая была аккумулирована шлаковым расплавом в процессе производства чугуна. Такая технология позволяет достичь значительной экономии топливно-энергетических ресурсов.

Необходимо отметить, что за рубежом шлаковый щебень производят преимущественно из литого шлака. В Великобритании на этот вид продукции расходуется 90%, в США — 80%, в Германии — свыше 70%, во Франции — более 60% текущего образования доменных шлаков. Это связано с меньшей стоимостью литого щебня в сравнении с обычным, из горных пород, и более высоким его качеством, чем у щебня из отвальных шлаков.

Производство литого щебня — прочного и тяжелого заполнителя для конструктивных бетонов и элементов дорожного строительства — реальный путь в короткие сроки и с большим экономическим эффектом возместить недостаток в нерудных строительных материалах. Для получения литого щебня изготавливают длинные желоба, ведущие в траншеи, которые поочередно заполняются расплавом. После затвердевания шлак убирают с помощью экскаватора и направляют на дальнейшую переработку. Это самый дешевый и наиболее производительный способ получения литого щебня.

Во Франции шлаковым щебнем укрепляют все шоссейные дороги, по которым передвигается тяжелый транспорт. Шлак в битумных дорожных смесях — хороший противоскользкий материал, поэтому покрытия многих больших автомагистралей США и Канады выполнены с использованием шлакового щебня.

При сооружении самых высоких зданий между Нью-Йорком и Чикаго, в том числе в многоквартирных жилых комплексах, компания «Юнайтед Стрейтс Стил» использовала шлак в качестве заполнителя в конструктивных бетонах для фундаментов.

В США компанией «Хьюстон слэг Мэтириэлз» был специально построен завод по производству дробленого доменного шлака, используемого в качестве материала для оснований автодорог и железнодорожного балласта производительностью 250 т/ч. Технологическая схема включала охлаждение шлака в траншеях, отделение чугуна на двухступенчатом грохоте, двухстадийное дробление в щековой и конусной дробилках с получением 5 фракций: 38–22, 22–16, 16–12, 12–6 и менее 6 мм.

Компания «Фаунтин сэнд энд стил» (США) производит щебень для железнодорожного балласта на установке производительностью 600 тыс. т в год.

В Великобритании работает целый ряд дробильно-сортировочных заводов по производству шлакового щебня для дорожных покрытий: завод «Тиспорт Уоркс оф тармак роудстоун» — 1,2 млн т/год, в Скэнтропе — 800 тыс. т/год, в Стэнтоне — 100 т/ч.

В России шлаковый наполнитель используется сравнительно редко, поэтому имеются огромные резервы расширения производства бетонов на шлаковом наполнителе, что позволит ускорить переработку шлаковых отвалов в районах расположения металлургических заводов России.

*Сталеплавильные шлаки*

Сталеплавильные шлаки включают шлаки конвертерного производства стали — около 60% всего объема, электросталеплавильного — около 30% и шлаки вторичных металлургических процессов — около 10%. В отличие от массово перерабатываемых доменных шлаков, сталеплавильные шлаки в массовом масштабе начали использовать в мире с 1967 г.

В настоящее время коэффициент использования шлака за рубежом достигает 90% и более. За рубежом сталеплавильные шлаки применяют в трех основных направлениях: в сельском хозяйстве — для известкования почв, в дорожном строительстве — в строительстве дорог, а также в качестве железосодержащего материала для вторичной переплавки в доменных печах. Существуют возможности повторного использования сталеплавильного шлака и в самом сталеплавильном производстве:

- в шихте для ускорения шлакообразования;
- оставление части шлака предыдущей плавки в конвертерах и электропечах;
- для внедоменной обработки чугуна.

Однако возможности использования шлаков непосредственно на металлургических заводах ограничены, поэтому за рубежом активно разрабатывают способы применения шлаков в смежных отраслях.

Направления использования конвертерных шлаков за рубежом показаны на рис. 18.3.

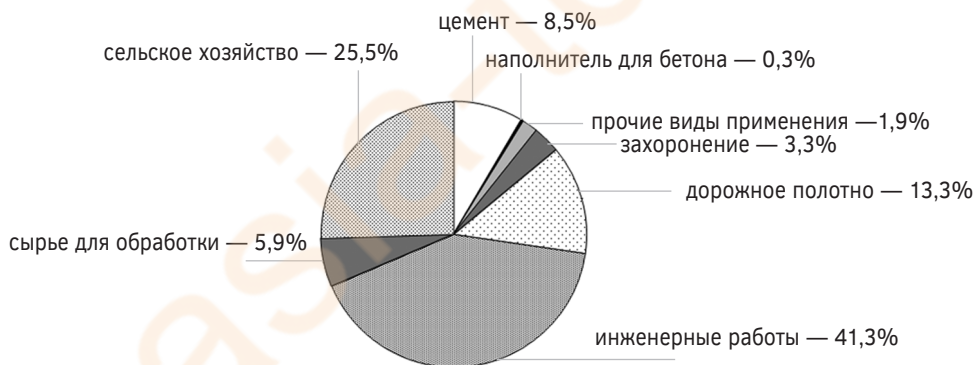


Рис. 18.3. Использование конвертерного шлака за рубежом

В среднем в сталеплавильных шлаках содержится 20–25% железа, в том числе 10–15% металлического железа. Значительная доля железа содержится в виде оксидов FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и запутавшихся корольков железа. Поэтому проблема обеспечения металлургических предприятий железосодержащим сырьем в определенной степени решается путем переработки шлаков. Для эффективного использования сталеплавильных шлаков необходимо подвергать их комплексной переработке с максимальным извлечением металла, получением щебня, отсевам мелких фракций и их доизмельчением при производстве шлаковой муки.

Важным этапом технологии переработки сталеплавильных шлаков является извлечение из них металла. Основным продуктом шлакопереработки является металлопродукт различных классов по крупности и содержанию железа, который, как правило, возвращается в металлургический передел, заменяя часть первичного сырья. Известно, что металлургический завод фирмы POSCO в Южной Корее производительностью 2,5 млн т стали в год получает экономию от использования металлопродукта, составляющую 3,44 млн долларов.

В США из сталеплавильных шлаков извлекается около 50% содержащегося в них железа, которое направляется в агломерационное или доменное производство, а остаток после извлечения железа применяется в дорожном и гражданском строительстве. Во Франции после извлечения из сталеплавильных шлаков металла неметаллическую фракцию перерабатывают в щебень и порошок для сельского хозяйства. В Великобритании сталеплавильные шлаки используют в битумных бетонных смесях для дорожных покрытий, в производстве щебня, в сельском хозяйстве. В Японии сталеплавильные шлаки используют для собственных нужд предприятий в качестве оборотного продукта, для инженерной подготовки местности, дорожного строительства, для производства различных строительных материалов (заполнителей бетонов, цементов и др.) и изделий (противопожарных панелей, волнорезов и др.), для снижения кислотности почв и в качестве удобрений.

Использованию сталеплавильных шлаков в дорожном и гражданском строительстве препятствует наличие свободной извести. Шлаки, содержащие избыток основных оксидов над кислотными, склонны к самопроизвольному распаду под воздействием влажного воздуха. Такие шлаки непригодны для получения бетона. Шлак расширяется в объеме до 10% вследствие гидратации извести и окиси магния. Необходимо по крайней мере 6 мес. для старения шлака по CaO и несколько лет для завершения гидратации окиси магния. Ранее шлак длительное время хранили в отвалах и стабилизировали известь путем естественного старения. В настоящее время разработаны новые технологии, например, шлак сразу после выпуска из конвертера подвергают обработке водяным паром, достигая эффекта старения, и это позволяет его использовать сразу, без длительной выдержки. Обработанный таким образом шлак дробят, путем магнитной сепарации удаляют металл, который затем возвращают в шихту конвертеров и дуговых печей, а шлак подвергают грохочению и после сортировки отгружают потребителям.

В Японии переработка конвертерного шлака предусматривает извлечение металла и его возврат в производство, немагнитная часть используется для производства щебня и удобрений для сельского хозяйства. По данным компании «Кобэ Сейкодзе», которая создала технологию полной утилизации конвертерных шлаков, технология позволяет из 1 т шлаков получить 720 кг цемента, 30 кг заменителя железистого песка, 50 кг марганцевой руды, 10 кг оксида ванадия, 107 кг удобрений, 165 кг стали.

Как правило, для переработки сталеплавильных шлаков используют стандартное оборудование, предназначенное для горнорудной промышленности или производства строительных материалов.

Мировой опыт показывает, что для максимального извлечения металла (до 94%) из шлака требуется очень тонкое измельчение, осуществляемое за рубежом, как правило, в две стадии на щековых и конусных дробилках: завод компании «Хьюстон слэг мэтириэлз» (США), завод компании «Син ниппон сэйтэцу» (Япония). Безаварийная работа стандартных дробилок при дроблении сталеплавильных шлаков возможна в условиях тщательно организованной системы удаления металла. Основная часть металла должна быть извлечена во время первичной обработки шлака, а оставшаяся — магнитными сепараторами, установленными перед дробилками.

Простая схема была реализована на заводе «Фест» в Линце (Австрия), где частично разрушенные термоударным способом шлаки измельчают на щековой дробилке до крупности 0–100 мм. Перед дроблением и после него проводят магнитную сепарацию. Такой способ позволял извлечь металл в количестве 10% от массы шлака.

По данным английских исследователей, немагнитную часть сталеплавильных шлаков можно использовать без ограничения в качестве железнодорожного балласта, в основаниях дорог, обочин, тротуаров.

В Великобритании в 1960-х гг. запущен в эксплуатацию полностью автоматизированный завод, выпускающий 120–160 т/ч щебня из сталеплавильных шлаков, а также разные виды дорожных материалов. Завод обслуживают 2 оператора: один с помощью электронной системы управляет процессом, второй следит за производством щебня.

В Японии компания «Кавасаки стил» в 1970-х гг. запущено производство по переработке сталеплавильных шлаков с получением балласта и удобрений.

Среди специализированных шлакоперерабатывающих предприятий представляет интерес завод в Техасе, запущенный в конце 1960-х гг., на котором перерабатываются доменный, конвертерный и электросталеплавильный шлаки и выпускается 5 фракций доменного шлака и 3 фракции сталеплавильных шлаков, которые используются в качестве железнодорожного балласта и в дорожном строительстве.

Щебень из сталеплавильных шлаков является полноценным заменителем гранитного щебня, и стоимость его в 2–3 раза ниже стоимости щебня из горных пород. Используется шлаковый щебень в строительстве железных и автомобильных дорог, в общестроительных работах и в качестве сырья для производства цемента.

Наиболее широко применяется шлаковый щебень в строительстве автомобильных дорог для устройства оснований дорожных одежд. Особой популярностью у дорожников пользуется крупный щебень 40–70 мм. Установлено, что при строительстве 1 км дороги шириной 7 м необходимо использовать 5000–6000 т щебня и песка. Под строительство такого же участка дороги шлака используется 700–800 т.

Конвертерный шлаковый щебень характеризуется способностью схватываться без доступа воздуха, зерна связываются друг с другом путем формирования гидратов, и при этом постепенно повышается предел прочности при сжатии. Предел прочности на сжатие у конвертерного шлака незначительно ниже по сравнению с данной характеристикой природного материала. Увеличивает предел прочности на сжатие добавка доменного шлака в количестве до 25%.

Кроме дорожных одежд, щебень можно успешно применять в составе асфальтобетонного покрытия. Шлаковые асфальтобетонные покрытия отличаются высокой сдвигоустойчивостью, водо- и морозостойкостью, долговечностью и стабильными фрикционными свойствами в процессе эксплуатации. С введением в асфальтобетон шлаковых материалов коэффициент сцепления колеса с покрытием значительно увеличивается. Большой опыт применения конвертерного шлака в составе асфальтобетонных покрытий дорог наработан в США и Великобритании. Промышленные испытания показали, что шлаковые смеси обладают значительным сопротивлением износу поверхностей и антискользким действием аналогично базальтовым покрытиям. Особенностью асфальтобетонных покрытий, изготовленных с применением сталеплавильных шлаков, является отсутствие деформации сдвига даже при интенсивном движении тяжелого транспорта.

Конвертерный шлаковый щебень является отличным путевым балластом на железных дорогах. Этому способствует его высокая износостойкость и сопротивление истиранию, высокое электрическое сопротивление, чем обеспечивается отсутствие помех для проводимости рельсов. Высокая удельная масса и угловатая форма кусков конвертерного щебня обеспечивает высокое сопротивление боковому смещению на кривом пути. Высокая пористость обеспечивает хороший дренаж ливневых вод.

В общестроительных работах шлаковый щебень используется при изготовлении бетонных изделий. При изготовлении бетона конвертерные шлаки могут использоваться как в качестве одного из компонентов вяжущего, так и в качестве крупного или мелкого заполнителя. Щебень из конвертерных шлаков является эффективным крупным заполнителем для бетонов вместо дорогостоящих природных материалов — андезита, базальта, диабазы. Механическая прочность шлакового щебня на 70–80% выше, чем прочность природных материалов. Кроме того, более интенсивное взаимодействие на границе шлакового щебня с цементными фазами снижает расход вяжущего примерно на 10% по сравнению с использованием природного, например, гранитного щебня. Многочисленными исследованиями доказано, что цемент, полученный с добавкой конвертерного шлака в сырьевую смесь, имеет более высокую начальную прочность. Так, в Польше получен шлаковый цемент с повышенной прочностью, составной частью сырьевых материалов которого является смесь шлаков: гранулированный доменный шлак (около 2 частей) и конвертерный шлак (1 часть).

В Китае основное внимание уделяется использованию сталеплавильного шлака в качестве сырья для производства цемента. Для производства цемента используются в составе сырьевых компонентов 35–45% доменного и 35–45% конвертерного шлака. Производство 1 т цемента из шлака позволяет сэкономить около 10 кВт·ч электроэнергии и 25 кг угля по сравнению с производством обычного портландцемента. Для цемента, изготовленного из сталеплавильного шлака, не характерны быстрое схватывание и ранние прочностные свойства (быстрое твердение). Цемент характеризуется низкой теплотой гидратации, малым тепловым расширением, хорошей непроницаемостью, хорошим сопротивлением истиранию, поэтому может быть использован при строительстве плотин, бетонных конструкций электростанций. Цемент на основе сталеплавильных шлаков широко используется в гражданском строительстве при строительстве высотных зданий, при создании фундамента, колонн с балками, плит перекрытия, лестниц, больших стеновых панелей, для создания бетонного покрытия шоссе и взлетно-посадочных полос в аэропортах, при производстве железобетонных шпал для железных дорог и т. п.

В Европе отмечено существенное использование сталеплавильных конвертерных шлаков в качестве удобрений. Например, в Германии в качестве удобрений используется около 20% шлаков.

Из сталеплавильных шлаков производят шлако-фосфорные и шлако-известковые удобрения для сельского хозяйства. Пригодность шлака к применению в качестве удобрения объясняется тем обстоятельством, что он содержит значительное количество оксида кальция при относительно меньшей доле оксида кремния. Это делает возможным использовать его для известкования кислых почв взамен извести. Наличие в нем марганца, железа, кремния, алюминия и других элементов повышает его ценность в сравнении с известью, т. к. эти соединения в качестве микроэлементов необходимы для развития растений. Шлаки, содержащие оксид кальция до 52% и оксид магния до 10–12%, в результате силикатного распада на воздухе превращаются в тонкий порошок и вносятся в почву без помола.

Фосфатные шлаки, полученные при переделе фосфористых чугунов на сталь, являются фосфорным удобрением типа суперфосфата. Впервые в этом качестве стали использовать мартеновские шлаки комбината «Азовсталь», содержащие 10–12%  $P_2O_5$ . Шлакопомольное отделение работает с 1955 г. на немецком оборудовании. Шлаковую муку получали также на НЛМК и заводе «Амурсталь». На конвертерных фосфатшлаках Карагандинского меткомбината отработана технология получения гранул фосфатшлаковых удобрений на водной основе с необходимыми для растений солевыми добавками. Технология выгодно отличается от известных зарубежных аналогов и позволяет получать гранулы, близкие по форме к сферическим с минимальным разбегом по крупности. Гранулированные металлургические удобрения не пылят при перевозках, пересыпках и внесении в почву.

При переработке сталеплавильных шлаков особенно большое значение придается повышению эффективности извлечения из шлаков железа. Для извлечения железа из металлургических шлаков традиционно используют магнитную и электромагнитную сепарацию. Если при переработке доменных шлаков в извлечении железа нет необходимости ввиду его низкого содержания (менее 1%), то при переработке сталеплавильных шлаков эта технологическая операция является обязательной, так как содержание железа в них является значительным (более 10%). В настоящее время наиболее перспективными для извлечения металла из шлаков являются магнитные сепараторы (железоотделители) с электромагнитами, что обусловлено их способностью создавать магнитные поля высокой напряженности в значительных рабочих объемах. Такие сепараторы выпускают многие зарубежные фирмы, в основном США и Германии. Наиболее широко применяют подвесные электромагнитные сепараторы: извлекающие или саморазгружающиеся. Основные изготовители: США — «Эриз мэньюфекчуриг», «Стернз Магнетик», «Дингз» и др.; Германия — «Штайнерт», «Швермашиненбау», «Крупп» и др.; Япония — «Канецу Когойо»; Франция — ПИК, ИФЕ; Великобритания — «Виттонкет и Юнимаг».

Одним из первых заводов, перешедшим на полную переработку шлаков сталеплавильного производства, в СССР был Днепропетровский завод им. Петровского. На заводе были введены в эксплуатацию две установки для магнитной сепарации металла и получения щебня: одна — для переработки мартеновского шлака, другая — конвертерного общей мощностью 250 тыс. т в год.

В настоящее время в России сталеплавильные шлаки перерабатываются на ряде металлургических предприятий.

В 1994 г. на Магнитогорском меткомбинате для переработки текущих конвертерных и мартеновских шлаков была пущена в эксплуатацию стационарная установка АО «Хеккет Мультисерв Россия» производительностью 2,0–2,2 млн т в год и 2 передвижные установки SKI (Финляндия) для переработки текущих и отвальных мартеновских шлаков. Стационарная установка включает 5 стадий грохочения, 3 стадии сухой магнитной сепарации и 1 стадию самоизмельчения. Передвижные установки состоят из двух агрегатов: один предназначен для классификации шлака по фракциям и выделения из него магнитного продукта, второй — только для отделения магнитного продукта.

Получаемый магнитный продукт фракции 0–10 мм (Fe = 36–40%), 0–15 мм, 10–50 мм (Fe = 66–75%) используется в агломерационном и доменном производствах в качестве металлосодержащего компонента в количестве 35,6 кг/т агломерата и 2–12 кг/т чугуна. Скрап фракции 50–350 мм применяют в металлошихте конвертерной плавки (10–15% от массы металлолома). Фракционированный щебень отгружается потребителям.

На Нижнетагильском металлургическом комбинате в сентябре 1996 г. введен в действие цех переработки техногенных образований (ЦПТО), построенный по технологии фирмы Э. Фридриха (Германия). Оборудование поставлено германской фирмой «Клекнер-Хумбольдт-Дойц» (КХД), проект выполнен КХД-НТМК. Это крупнейшее в Европе предприятие по переработке шлаков производительностью 3,1 млн т в год. Технологическая схема включает участок буровых работ, два участка экскаваторного извлечения крупного металла, дробильно-сортировочную установку и установку по обогащению и сортировке железосодержащего материала. Переработка отвального шлака производится по следующей схеме. На участке экскаваторной разработки отвалов извлекается крупный металл, который по мере накопления отправляется в копровый цех. Извлечение крупного металла производится также и при загрузке шлака в бункер дробильно-сортировочной установки на колосниковой решетке с размером ячейки 300 мм. Прошедший через решетку материал питателем равномерно подается в галтовочный барабан с продольными полками, где куски шлака частично разрушаются с выделением металлических включений. Затем вся масса материала пропускается через магнитный барабан. После барабана немагнитная часть отправляется на дробильно-сортировочную установку для переработки в щебень и песок, а магнитная на двух последовательно расположенных грохотах разделяется на фракции. Продукция цеха: щебень фракции 0–10, 10–20, 20–40, 40–70 мм; металлопродукт фракции 0–10, 10–40, 40–70, 70–120, более 120 мм; шлакометаллическая смесь (ШМС) фракции 0–10 мм, огнеупорный лом (шамотный и магнезиальный). Годовое производство металлопродукции составляет 425 тыс. т, в том числе:

- 35 тыс. т металлопродукта 0–10 мм, Fe = 35–70%, реализуется аглофабрикам;
- 40 тыс. т металлопродукта 10–120 мм, Fe = 59–87%, используется в шихте доменных печей (18 кг/т чугуна);
- 120 тыс. т металлопродукта более 120 мм, Fe = 75–95%, используется в шихте мартеновских печей;
- 230 тыс. т ШМС 0–10 мм, Fe = 22–35%, реализуется аглофабрикам (100 кг/т стали).

В последние годы на металлургических предприятиях России, Украины, Белоруссии, Грузии широко используются установки, производимые компанией Amcom LLC. Компания Amcom LLC была основана в 1996 г. в Нью-Йорке, США. В предлагаемой технологии

переработки сталеплавильных шлаков используется метод магнитной сепарации с применением принудительной очистки лома в дробильных устройствах. Налажено производство мобильных и стационарных установок по переработке шлака с производительностью до 375 т/ч, позволяющих получать фракционированный щебень, огнеупоры, лом черных и цветных металлов.

Комплексы по переработке сталеплавильных шлаков компании Amcom LLC включают магнитные сепараторы, галтовочные барабаны, барабанные и двухъярусные грохоты, вибрационные питатели, систему конвейеров.

За период с 2000 по 2018 г. было спроектировано и внедрено в эксплуатацию восемнадцать комплексов по переработке отходов металлургического производства производительностью от 150 до 375 т/ч и ассортиментом конечного продукта:

- НЛМК, конвертерный шлак (2016 г.), 350 т/ч. Продукция: щебень фракционированный крупностью 0–10, 10–20, 20–40, 40–70 мм; металлопродукт крупностью 0–10, 10–100, 100–300, +300 мм;
- ЕВРАЗ ЗСМК, конвертерный шлак (2014 г.), 240 т/ч. Продукция: щебень крупностью 0–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–80, 80–250, +250 мм;
- Белоруссия, Гомель (2013 г.), электросталеплавильный шлак, 300 т/ч. Продукция: щебень фракционированный крупностью 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм;
- ММК, 375 т/ч, отвальные шлаки мартеновского и конвертерного производств (2009–2010 гг.). Продукция: щебень фракционированный 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм;
- Азовсталь, Украина, 300 т/ч (2002–2004 гг.), отвальный мартеновский и конвертерный шлак. Продукция: щебень фракционированный 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм;
- ДМЗ, Украина (2007 г.), 250 т/ч, отвальные шлаки мартеновского и электросталеплавильного производств. Продукция: щебень фракционированный 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм;
- Руставский метзавод, Грузия (2008 г.), 300 т/ч, мартеновские и конвертерные шлаки. Продукция: щебень фракционированный 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм.

### **Технологии переработки металлургических пылей и шламов**

Уровень переработки железосодержащих пылей в странах Европы составляет в среднем около 70%, при этом в некоторых европейских странах (Бельгия) достигает 100%. На всех металлургических заводах Японии коэффициент оборотного использования металлургической пыли также близок к 100%.

В отличие от металлургических шлаков, переработка которых организована на большинстве металлургических заводов, промышленная переработка мелкодисперсных металлургических отходов в России не имеет широкого распространения. На большинстве металлургических заводов традиционно утилизируют агломерационные шламы, для обезвоживания которых построены комплексы обезвоживания, а также перерабатывают на аглофабриках пыль газоочисток доменных печей (колошниковая пыль). Сталеплавильные шламы утилизируют на Новолипецком и Челябинском заводах, доменные шламы в промышленном масштабе не перерабатываются.

Основным методом использования железосодержащих металлургических пылей и шламов (агломерационные, доменные, конвертерные и др.) в мире является их добавка к агломерационной шихте в количестве до 10–15% (по массе) шихты при сохранении прочности агломерата и производительности агломашиин.



Основные требования к металлургическим пылям для их утилизации в агломерации:

- суммарное содержание полезных компонентов — железа, углерода и оксидов кальция при утилизации в аглошихте — не менее 45%;
- концентрация цинка при использовании на аглофабриках — не более 1%;
- влажность при использовании в аглошихте — не выше 8–9%, в отдельных случаях — не более 12%;
- максимальный размер комков при использовании в аглошихте — 6 мм;
- при использовании в аглошихте — хорошая слипаемость.

Основными критериями пригодности железосодержащих отходов к применению в аглопроизводстве являются также их сыпучесть, транспортабельность, возможность дозирования и перегрузок в технологическом цикле аглофабрики, способность равномерно распределяться в массе аглошихты.

Пыли металлургического производства обычно не требуют какой-либо предварительной подготовки перед утилизацией. Шламы, прежде чем их использовать (например, в качестве компонента шихты), необходимо подвергнуть обезвоживанию (сгущению, фильтрованию, сушке).

На зарубежных предприятиях железосодержащие пыли и шламы перерабатываются большей частью в аглопроизводстве, а также в доменном и конвертерном производствах только в подготовленном виде, главным образом в виде безобжиговых окатышей или брикетов. Для возврата отходов в агломерацию получают окатыши небольшого размера, диаметром 2–3 мм. Примеры такой технологии: заводы в Бейлихеме и Спарроус-Пойнте, США; завод компании «Эстель Хюттенверке» в Дортмунде, Германия; заводы компании «Крупп», Германия; компаний «Кавасаки Сэйтэцу» и «Кавасаки Дзэкоге», Япония; «Фос-сюр-Мор», Франция и многие другие. В качестве связующего используют главным образом известь с получением окатышей влажностью 7–12%.

Сталелитейная компания «Сидерар» (Аргентина) создала установку для гомогенизации твердых отходов, которые затем используются в аглошихте в количестве 300 кг на 1 т агломерата. Установка агрегата для гомогенизации позволила обеспечить утилизацию 10–12 видов твердых отходов (отсевы сырья из-под бункеров шихтоподачи, шлаки и шламы конвертерного производства, шламы и рудная мелочь аглодоменного производства, колошниковая пыль, прокатная окалина и др.), причем на агрегате получают однородный материал со стабильным химическим составом.

Технологии окомкования металлургических пылей в безобжиговые окатыши на связке широко применяются в Японии с конца 1960-х — начала 1970-х гг. На ряде металлургических предприятий Японии работают промышленные установки по подготовке пылей и шламов для ввода их в аглошихту. В качестве шихтовых материалов в производстве агломерата используют шламы, прокатную окалину, пыль аглофабрик, известковую пыль и др. На заводах компаний «Син Ниппон Сэйтэцу» и «Ниппон кокан» работают промышленные установки (1000 т/мес.) для окомкования конвертерной пыли с получением гранул с содержанием 60% Fe, которые после упрочнения вводят в аглошихту.

Средние затраты на производство сырых окатышей из конвертерных шламов по 25 предприятиям США и Канады составляют 36,5 долл./т, что более, чем в 2 раза меньше, чем затраты на их складирование в отвалах (85–90 долл./т).

Металлургические пыли и шламы содержат железо главным образом в оксидной форме ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Восстановление железа из оксидов может происходить в доменной печи, где перерабатываются агломерат или окатыши, либо в отдельных восстановительных агрегатах, куда пылевидные отходы загружаются в окускованном виде в форме окатышей или брикетов. При восстановлении железа происходит одновременное восстановление содержащихся в отходах цветных металлов, в частности цинка и свинца.

Цинксодержащие пыли не могут быть направлены в агломерационное производство, так как при попадании агломерата в доменную печь возгонка цинка приводит к образованию

настывает при его конденсации как в верхних горизонтах доменной печи, так и в системе отвода и очистки технологического газа. Содержание цинка в доменных шламах обусловлено его концентрацией в агломерате, в конвертерной и электросталеплавильной пыли — переработкой лома оцинкованных изделий (кузова автомобилей, строительные конструкции). В высокотемпературных металлургических агрегатах цинк возгоняется и затем конденсируется в системе газоочистки, концентрируясь в уловленной пыли, концентрация цинка в электросталеплавильной пыли может достигать 40%.

В США мелкодисперсные отходы доменного производства: сухие пыли (390 тыс. т/год) с содержанием железа 10–35% и углерода 30–75% и шламы (650 тыс. т/год) с содержанием железа 10–48% и углерода 20–65% используются в агломерационном производстве или в брикетированном виде возвращаются в доменный передел. Конвертерные (1,21 млн т/год) шламы с содержанием железа 50–63% и электросталеплавильные (850 тыс. т/год) пыли с содержанием железа 20–40% используются после извлечения из них цинка.

Большое распространение получило производство металлизированных окатышей с использованием в качестве восстановителя угля во вращающихся (трубчатых) печах. Отличаются они в основном технологией подготовки исходных материалов. В последние годы на таких установках вместе с вращающейся печью работает устройство типа аглоленты, на которой осуществляются сушка и предварительный нагрев окатышей теплом газов, отходящих из трубчатой печи: решетка — трубчатая печь. Готовые окатыши используют в качестве вторичного сырья при выплавке стали в конвертерах.

Исследования в области утилизации мелкодисперсных металлургических отходов начались за рубежом в конце 50-х гг. XX в. В 1963 г. компанией «Крупп» (ФРГ) была создана опытно-промышленная установка по переработке доменных шламов, включающая систему обезвоживания отходов (фильтрация — сушка), окомкование в тарельчатых грануляторах без добавления связующих веществ, вращающуюся трубчатую печь для восстановления окатышей длиной 14 м при температуре 1050°С и аппаратуру для улавливания возгонов цинка и свинца. В качестве восстановителя использовался лигнит, получаемый продукт — металлизированные окатыши, степень металлизации — 92–95%, степень улавливания возгонов цинка и свинца — 98–99%, а в уловленных возгонах их содержание составляло около 45%. Упрочненные при обжиге металлизированные окатыши содержали около 70% железа и использовались при выплавке чугуна и частично — стали. Эта технология использовалась компанией «Лурги» с 1975 г., которая в результате промышленных экспериментов создала промышленную установку для переработки 400 тыс. т в год Fe-содержащих доменных и конвертерных пылей и шламов с использованием вращающейся печи длиной 70 м и диаметром 6 м.

Процессы производства металлизированных окатышей из доменных и сталеплавильных шламов и пылей были разработаны компаниями «Кавасаки сэйтэцу», «Сумитомо киндзоку коге» (Япония) и «Лурги» (Германия). Общим этих процессов является использование в качестве восстановительного агрегата вращающейся (трубчатой) печи, различия заключаются в подготовке шихтовых материалов.

Компания «Кавасаки сэйтэцу» построила промышленную установку производительностью более 240 тыс. т металлизированных окатышей в год из доменных и конвертерных шламов. Отличительной особенностью разработанной технологии является окомкование Fe-содержащих отходов без связующих, роль которых выполняет конвертерная пыль. В качестве восстановителя использована коксовая мелочь. После окомкователя сырые окатыши поступают на решетку (конвейерная машина), где они высушиваются и подогреваются дымовыми газами, отходящими от трубчатой печи, отапливаемой мазутом. Затем окатыши загружаются вместе с коксовой мелочью в печь, где восстанавливаются. Восстановленные окатыши из печи направляются в барабанный охладитель, а затем на виброгрохот и в магнитный сепаратор. Степень металлизации составила около 95%, содержание металлического железа в продукте составляло более 70%, степень извлечения цинка, свинца и соединений щелочных металлов достигала 99%.

Аналогичные установки построены на заводах «Сумитомо киндзоку коге» по способам Dust Reduction и SPM (Sumitomo Prereduction Method) производительностью 20 и 18 тыс. т металлургических пылей в месяц соответственно. На этих установках осуществляют окускование пылей и шламов во время их восстановления во вращающихся трубчатых печах длиной 80 м с использованием в шихте мелкого антрацита или коксика, 0,5–1% бентонита в качестве связующего. Сырые окатыши подвергают предварительному подогреву до 250°С в целях упрочнения и затем прокаливают во вращающейся печи при 1050–1150°С, степень удаления цинка — 90–96,4%, степень металлизации продукта — 88,8%, окатыши используются в доменных печах.

На одном из металлургических заводов компании «Ниппон Кокан» работает промышленная установка (350 тыс. т в год) для утилизации различных пылей и шламов по технологии СЛ-РН с использованием в качестве восстановителя угля.

Все образующиеся на металлургическом заводе Fe-содержащие отходы высушивают, смешивают (оптимально: по 30% доменного шлама и конвертерной пыли, 40% тонкоизмельченной железной руды), подвергают совместному измельчению в шаровых мельницах и последующему окомкованию с добавкой бентонита на трех тарельчатых грануляторах диаметром 6 м. Сырые окатыши направляются в конвейерную обжиговую машину длиной 62 м, где они сушатся, упрочняются и частично восстанавливаются углеродом, содержащимся в доменном шламе. Горячие окатыши и уголь-восстановитель с высоким выходом летучих веществ подвергают восстановительному обжигу во вращающейся печи длиной 70 м. Получаемым продуктом является губчатое железо с содержанием железа до 95%, которое затем используется в шихте доменных печей. В процессе восстановления из шихты удаляется до 95% цинка.

Распространенным способом окускования мелкодисперсных материалов является брикетирование, позволяющее путем прессования получать прочные куски одинакового размера, формы и массы. Кроме того, процесс брикетирования позволяет вводить в состав брикетов полезные добавки, улучшающие показатели технологических процессов. Влажность брикетируемой шихты может достигать более высокого уровня, что особенно актуально для переработки шламов.

Одно из первых предприятий по брикетированию металлургических отходов (колошниковая пыль и др.) было запущено в ФРГ еще в начале 1960-х гг.

Брикетиrowание осуществлялось на вальцевых прессах производительностью 10–15 т/ч с использованием в качестве связующего 50%-ного сульфитного щелока, полученные брикеты обжигались при 600–900°С в атмосфере  $CO:CO_2 = 3:1$  и использовались для выплавки чугуна.

Компания «Аугуст Тиссен-Хютте» (Германия) разработала и реализовала в промышленном масштабе метод брикетирования Fe-содержащих пылей и шламов в смеси с угольной пылью и связующим, которые при условии незначительного содержания цинка, свинца и щелочей (K, Na) используются в металлургическом переделе.

В конце 1970-х гг. образование мелкодисперсных отходов в металлургии США составляло около 6 млн т/год. Для их брикетирования был разработан процесс Ferro-Carb, обеспечивающий утилизацию всех Fe- и углеродсодержащих пылей, очищенных от цинка, путем изготовления брикетов для доменного производства. Технология включала 4 основные стадии: сухое смешивание Fe- и углеродсодержащих пылей в любом соотношении, нагрев шихты с введением расплавленного (или разогретого) связующего и перемешивание, брикетирование на вальцевых прессах, нагрев брикетов в окислительной среде для дегидратации и полимеризации связующего. Готовые брикеты обладали высокой механической прочностью (86–500 кг/брикет), водо- и термостойкостью и использовались в доменном производстве. По мнению производителя, эта технология характеризуется значительно меньшими капитальными и эксплуатационными затратами по сравнению с другими способами получения окускованного сырья.

Компания FERCO на заводе в Ривер Руж (шт. Мичиган) с 1988 г. производит брикеты для доменного производства на основе отходов металлургических производств следующего химического состава (в среднем): 61% Fe, 11% C, 7% CaO, 4% SiO<sub>2</sub>, 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В результате многочисленных исследований установлено, что при замене в шихте доменной печи 5% офлюсованных окатышей комплексными брикетами расход кокса уменьшился на 18 кг, производительность печи повысилась на 5% на 1 т чугуна.

Компания «Крупп» (Германия) по соглашению с компанией «Хеккет Инжиниринг» (США) эксплуатирует промышленное предприятие по брикетированию различных отходов — от мелочи рудных окатышей до высоковлажных шламов мокрой газоочистки производительностью 400 тыс. т/год. Металлизированные брикеты используются в сталеплавильном и литейном производствах.

Компания SSAB Mercox AB (Швеция), являющаяся дочерним предприятием SSAB Oxelosund и SSAB Tunnpilat, с 1993 г. специализируется на переработке побочных продуктов металлургического производства и осуществляет производство брикетов из отходов по традиционной технологии производства бетонных блоков. Металлопродукт крупностью 0–8 мм смешивается с другими металлосодержащими отходами: прокатная окалина, несколько видов пыли и шлам кислородно-конвертерного процесса. В качестве связующего используется портландцемент. Материал поступает в пресс-форму, под которую предварительно помещен деревянный поддон, подвергается виброуплотнению при одновременном приложении невысокого давления прессования. Брикеты производятся шестиугольной формы 60 × 60 мм, вес 500 г. После 24-часовой выдержки в камере брикеты хранятся на открытой площадке приблизительно в течение 3 недель, после чего используются в доменных печах и конвертерах.

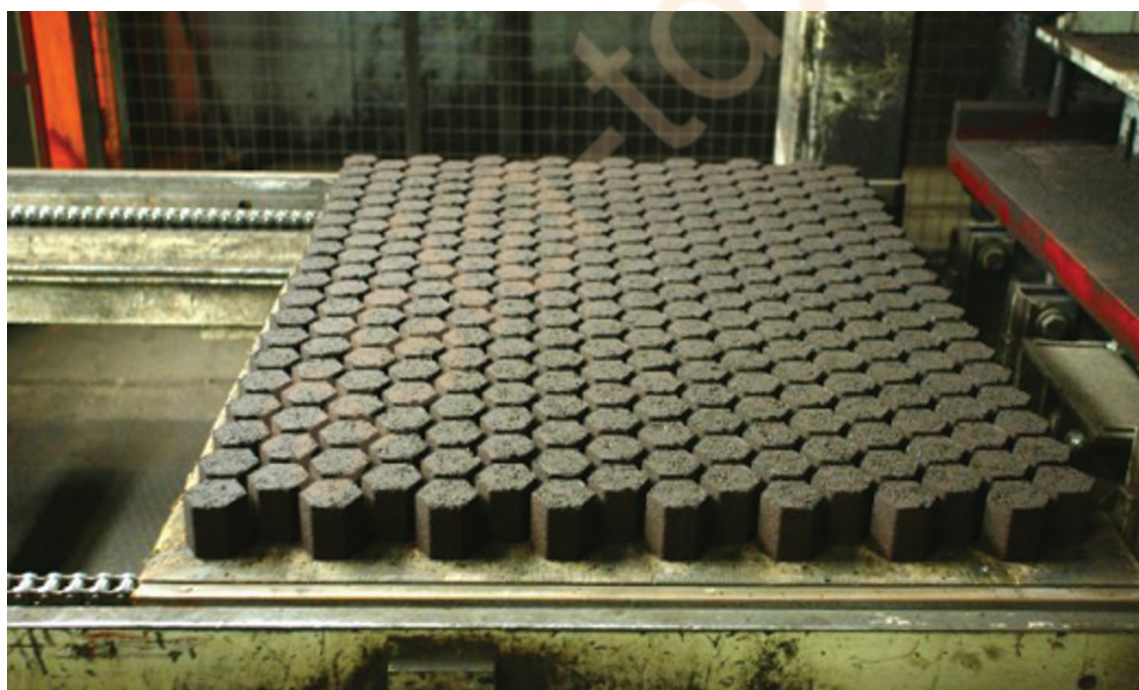


Рис. 18.4. Брикеты, производимые компанией SSAB, на заводе в Лулео (Швеция)

В 1986 г. начато производство брикетированного сырья для доменных печей. В период с 1991 по 1996 г. на открытой площадке произведено 230 тыс. т брикетов из пылей и шламов. В 1998 г. в доменном производстве переработано 110 тыс. т брикетов, что соответствует 75 кг/т чугуна, или 4% общей массы доменной шихты.

В конце 1950-х гг. в США появились первые установки по горячему брикетированию Fe-содержащих отходов. Их производительность составляла 5 т/ч. В 1966 г. на одном из заводов компании «Грей айрон фаундри» была пущена в эксплуатацию установка

производительностью 30 т/ч. Аналогичная установка для утилизации Fe-содержащих пылей и шламов (доменная пыль, прокатная окалина, тонкоизмельченный металллом) с 1966 г. работала на заводе компании «Доминион фаундри энд стил». Нагрев шихты производили в печах кипящего слоя при 800–1000°С, затем ее брикетировали на вальцевых прессах.

Компания «Дофаско» разработала технологию, предусматривающую ввод в состав шихты из Fe-содержащих отходов колошниковой пыли, содержащей углерод, или углеродистого восстановителя для более быстрого восстановления сырья при последующем переделе; это позволило также снизить температуру нагрева шихты. По этой технологии в США работало несколько промышленных установок производительностью 5 т/ч. Промышленная установка с большей производительностью (65 тыс. т/год) по брикетированию Fe-содержащих отходов эксплуатируется на заводе компании «Люкене стил» в г. Котсвилле, брикеты используются в дуговых электропечах. Затраты составили около 1 млн долл.

Компании «Фест-Альпине» (Австрия) и «Тиссен» (Германия) производят брикеты из конвертерной пыли, уловленной в сухих электрофильтрах, методом горячего брикетирования. Брикет из пыли возвращается в сталеплавильный процесс, где используется в качестве охладителя при повышенной доле чугуна в шихте. На заводе «Фест-Альпине» в Линце внедрен замкнутый процесс переработки пыли.

На выходной стороне обычной системы отвода конвертерного газа находится сухой электрофильтр. Содержание в пыли цинка контролируется оптическим лазерным измерителем. Если это содержание превышает 20%, то включается система разгрузки и обогащенная цинком пыль выгружается из системы. Из системы таким способом выводится 4% пыли, которая также находит сбыт. Остальная масса пыли подвергается брикетированию и непрерывно повторно используется в конвертерном процессе. Так как 90% всех действующих конвертеров не оборудованы системой сухого пылеулавливания, разработана схема обогащения цинкосодежающей пыли применительно к мокрому пылеулавливанию. Обогащение до 20%-ного содержания цинка осуществляется путем отдельного сбора пыли, образующейся в первые 4–5 мин конвертерной продувки, когда шихта теряет основную массу присутствующего в ней цинка и свинца.

В Японии эксплуатируется несколько установок брикетирования железосодержащих отходов. Компания «Ниссен сэйко» кек после фильтр-прессов для обезвоживания шламов с исходной влажностью 98% и сушки в барабанных сушилках смешивают с окалиной и пылью из систем газоочистки, затем брикетируют со связующими на вальцевых прессах. Сырые брикеты упрочняют и подсушивают до влажности 2% в сушилках конвейерного типа. Ввод в брикетируемую шихту крупных частиц прокатной окалины в количестве до 30% способствует повышению прочности брикетов. Готовые брикеты используют в шихте электропечей. Цинк, содержащийся в брикетах, испаряется в плавильной электропечи и улавливается тканевым фильтром в виде оксидов. Содержание цинка в уловленной пыли составляет 10–20%, и она используется как сырье для производства цинка.

Установка на базе печи с вращающимся подом компании Lucchini (Италия) спроектирована для ежегодной обработки около 60 тыс. т железосодержащих отходов (сухая масса).

Установка успешно функционирует в качестве агрегата предварительного восстановления нового процесса получения чугуна Redsmelt NST. Основной шихтовой материал представляет собой смесь пыли доменного и конвертерного производств, из которой производят самовосстанавливаемые окатыши, т. е. окатыши, в которых содержится достаточно углерода из доменной пыли для полного восстановления содержащегося железа без дополнительного ввода угля. На установке производится металлизированный продукт в виде горячебрикетированного железа, которое используется в доменном производстве. Загрузка в доменную печь горячебрикетированного железа позволяет получить следующим результат:

- сэкономить около 1,1 т коммерческих окатышей;
- уменьшить примерно на 250 кг расход кокса;
- увеличить на 0,5 т объем производства чугуна.

Доменные и сталеплавильные пыли и шламы представляют собой сырьевой источник для получения не только черных, но и цветных металлов. Однако в настоящее время в мире перерабатывается только 45–50% цинксодержащих металлургических пылей. Для получения продукта, пригодного для дальнейшей переработки на предприятиях цветной металлургии, необходимо предварительное обогащение пылей и шламов цинком и другими цветными металлами до таких концентраций, которые требуются для экономической переработки известными способами утилизации.

В настоящее время известно множество технологий извлечения цинка из доменных и сталеплавильных пылей и шламов, которые можно подразделить на следующие группы:

- механические (гидроциклоны, обдирка);
- гидрometаллургические (выщелачивание);
- пирометаллургические;
- плазменные;
- процессы жидкофазного восстановления.

Довольно распространена обработка пылей и шламов перед использованием в аглошихте в гидроциклонах, обеспечивающая концентрацию цинка в верхнем продукте, существенно уменьшая количество цинка, поступающего в доменную печь.

Разработка фирмы British Steel предусматривает обработку в гидроциклоне колошниковой пыли. После экспериментов на полупромышленной установке на заводе в Скаторпе в декабре 1993 г. была введена в эксплуатацию промышленная установка на заводе в Ллоуэрне, а в апреле 1994 г. — в Тиссайде.

Разработка японской фирмы Rasa Corp. (способ DeZn) включает классификацию в вакуумном гидроциклоне доменного шлама. Для переработки пылей и шламов с высоким содержанием цинка японской компанией «Раса Коге» разработан процесс «Раса-НГП» с использованием гидроциклона и специального агрегата для снятия (обдирки) поверхностного слоя, в котором концентрируется цинк и другие примеси. Установки конструкции «Раса Коге» позволяют осуществлять обдирку поверхностного слоя пыли, где преимущественно сосредоточены соединения цинка и свинца, с помощью скальпирующего аппарата «Вольтекс» и последующую высокоэффективную классификацию шлама в гидроциклоне особой конструкции (гидронегаклоне). Гидроциклон отличается наличием насоса, создающего вакуум в аппарате. В процессе классификации тонкодисперсные частицы, содержащие 80% цинка, уходят со сливом, а в осадке, составляющем 75–80% (по массе) твердого вещества, остается продукт с низким содержанием цинка. Капитальные и эксплуатационные затраты на подготовку шлама в этом случае в 10–15 раз ниже, чем при получении из отходов металлургических окатышей. К 1990 г. в Японии было построено 6 таких установок производительностью по сырью 120 тыс. т/год каждая («Ниппон стил», «Ниппон кокан» и др.).

При использовании механических способов степень извлечения цинка на 10–15% меньше, чем при применении пирометаллургических, однако реализация первых значительно дешевле, а установки проще в эксплуатации, и их реализацию производят на серийно выпускаемом оборудовании.

В течение последних 30 лет многочисленные технологические разработки, основанные на гидро- и пирометаллургических принципах, были основными в этой области.

Гидрometаллургические методы основаны на выщелачивании цинка, свинца и других цветных металлов растворами кислот или щелочей и последующем их осаждении химическими или электрохимическими методами. Переработка цинксодержащей пыли методами гидрometаллургии реализована на некоторых заводах Италии и США. Однако гидрometаллургические методы оказались неэффективными, т. к. не позволяют извлечь цинк из труднорастворимого феррита цинка — наиболее распространенного соединения цинка в металлургических пылях.

Альтернативным процессом является пирометаллургический метод, основанный на карботермическом восстановлении. Пирометаллургические технологии позволили создать и опробовать различные процессы в пилотном и промышленном масштабе.

Доминирующим процессом в настоящее время является переработка в вельц-печи (Waelz), используемая в мире с 1970-х гг. Технология Waelz в настоящее время рассматривается как наилучшая доступная технология на ближайшие 25 лет. Вельц-процессы используются в США, Европе, Юго-Восточной Азии (Тайланд) и на Ближнем Востоке (Саудовская Аравия). Только один завод GSD в Таиланде может переработать до 110 000 т в год стале-плавильной пыли и произвести до 40 000 т в год оксида цинка. Впервые в РФ проведена промышленная переработка пыли ЭДП ОАО «Северсталь» с использованием вельц-печи большой мощности (более 350 т/сут.). Испытания подтвердили эффективность использования для этой цели вельц-процесса как экологичной и надежной технологии переработки различных видов отходов и промпродуктов черной и цветной металлургии.

В основе процесса лежит восстановление цинка, кадмия и свинца из предварительно окомкованной шихты (60%), а также коксовой мелочи (25%) и флюса  $\text{SiO}_2$  (15%). Шихта загружается во вращающуюся трубчатую печь, где выдерживается 4 часа при температуре 1200°С. Возгоняясь, пары цинка и других ценных компонентов удаляются из печи вместе с отходящими газами. При охлаждении отходящих газов происходит конденсация паров металлов в виде мелкодисперсной пыли. Попадая в систему газоочистки, пыль улавливается в фильтрах и представляет собой сырой оксид цинка (50–60% Zn), или «вельц-оксид».

Полученный продукт направляется в цинковое производство, а шлак используется в качестве строительного материала или при строительстве дорог.

Преимущества вельц-процесса:

- низкое энергопотребление;
- хорошо отработанная и оптимизированная технология;
- простота технологического процесса в одну ступень.

Недостатки:

- низкое качество продукта («грязный» оксид цинка), который может быть использован только как заменитель руды в первичной металлургии цинка;
- большое количество вновь образующихся отходов (около 700–800 кг/т загруженной пыли);
- извлечение только одного ценного металла.

При высоком содержании в отходах свинца Pb (до 1–2%) и цинка Zn (4–7%) на целом ряде предприятий за рубежом проблему их утилизации решили путем получения металлизированных окатышей. Технологический процесс их получения включает окомкование отходов в чашевых окомкователях, сушку и подогрев отходящими газами, последующую металлизацию во вращающихся печах при температуре 1100°С. При этом свинец и цинк улетучиваются на 99%, а щелочные металлы — на 85%. Далее их оксиды конденсируются в холодных частях газоотводящего тракта, а пыль осаждается в газоочистке. Получаемый металлизированный продукт используют в доменной плавке, а мелочь, образующуюся в процессе восстановления, добавляют к агломерационной шихте. При содержании цинка в пыли вращающихся печей 10–30% (по массе) ее используют в качестве сырья для цветной металлургии, металлизированные окатыши используют в доменном процессе. В Японии работало 6 таких установок производительностью от 60 до 180 тыс. т/год. Однако, начиная с 1977 г., такие установки больше не строят из-за высоких капитальных и эксплуатационных затрат.

Компаниями KobeSteel и Midrex direct reduction corporation разработаны и внедрены в производство процессы Fastmet и Fastmelt для переработки пылей от электросталеплавильных печей. Fastmet впервые запущен в эксплуатацию в 1995 г. на заводе в г. Какогава (Япония). Процесс основан на восстановлении железа во вращающихся кольцевых печах. Шихтовыми материалами являются восстановитель (коксовая мелочь) и пыль (в виде окатышей). Рабочие температуры 1300–1350°С, процесс восстановления происходит в течение 8–10 мин. Конечными продуктами являются: железо прямого восстановления (степень металлизации 75–94%) и сырой оксид цинка (50–65% Zn).

Процесс Fastmelt отличается от процесса Fastmet наличием электропечи. Основным преимуществом является возможность извлечения железа до 98%. Технология окупается при переработке не менее 200 тыс. т пыли ДСП в год.

Недостатки процесса:

- высокий расход газообразного топлива — около 100 м<sup>3</sup>/т перерабатываемой пыли;
- количество перерабатываемого сырья должно составлять не менее 200 тыс. т;
- нестабильный состав железа прямого восстановления;
- низкий выход сырого оксида цинка.

Компания Nippon Steel восстанавливает железо в железосодержащих пылях в печах с вращающимся подом по технологии RHF (rotary hearth furnace — RHF), разработанной в техническом центре Midrex Technical Center, США.

На металлургическом заводе компании Thyssen Stahl AG (Германия) сооружена специальная установка по переработке пылевидных отходов в целях максимального извлечения цинка и свинца.

После окомкования пыли полученные гранулы поступают в реактор кипящего слоя, где при температуре 1000°С в восстановительной атмосфере происходит возгонка примесей цветных металлов и удаление образующихся паров, содержащих цинк, свинец и щелочные элементы. Далее в циклонах продукты возгонки отделяются от пыли, а гранулы, состоящие в основном из оксидов железа, после охлаждения поступают на аглофабрику. Пыль, осажденная в циклонах, возвращается в реактор кипящего слоя, а возгоны после охлаждения отделяют от газа в рукавных фильтрах и направляют на рециклинг уловленных в них цинка и свинца, степень извлечения которых достигает 80%.

За последние 20 лет промышленного масштаба достигли следующие пирометаллургические технологии:

- Primus Process (Paul Wurth) — 1 установка производительностью 85 тыс. т отходов в год эксплуатируется в Люксембурге, вторая — на Тайване мощностью 120 тыс. т/год;
- ZincOx Resources — 1 действующее предприятие в Южной Корее производительностью 400 тыс. т отходов в год;
- технология переработки в индукционной печи (PIZO) — 1 предприятие в США;
- комбинация дуговой электропечи с гидрометаллургическим принципом Ezinex (Engitex) — 1 установка в Италии.

Одним из преимуществ этих процессов является возможность параллельного восстановления других ценных элементов наряду с цинком. К недостаткам можно отнести высокое энергопотребление, низкий выход и низкое качество получаемого оксида цинка и железной фазы. Кроме этого, относительно низкая производительность, а также взаимодействие возгоняемого цинка с огнеупорной футеровкой.

Пирометаллургическая технология Primus Process разработана старейшей люксембургской компанией Paul Wurth, основанной в 1870 г., для переработки отходов металлургических производств путем прямого восстановления.

Технология Primus используется для переработки доменных и конвертерных шламов, прокатной окалины, в том числе замасленной, пыли электросталеплавильного производства, в качестве восстановителя используется уголь. Технологический процесс — двухступенчатый, основными агрегатами являются многоподовая печь (MHF — Multi Hearth Furnace) и электродуговая печь. Максимальная рабочая температура не превышает 1100°С. За счет прохождения экзотермических реакций полного дожигания СО выделяется тепло, которое обеспечивает процесс необходимой энергией. Многоподовая печь состоит из нескольких камер одна на другой, соединенных между собой сквозными отверстиями, которые расположены в дне и потолке камер. По рукавам, оснащенным колосниковыми решетками, шламы проходят через различные камеры по пропускным отверстиям, постепенно опускаясь на дно печи. В твердом растворе концентрация окислов металлов, содержащихся в побочных продуктах, снижается. В отличие от железа, оксиды цинка и свинца выносятся вместе с газом



и улавливаются в рукавных фильтрах. Электродуговая печь, расположенная под многоподовой печью, переплавляет железо прямого восстановления в литейный чугун, который поставляется на сталелитейные заводы. В результате применения технологии Primus из них получают оксид цинка (с содержанием металла более 60%) и гранулированный чугун, который впоследствии переплавляется в литейный чугун. Образующийся шлак используется в дорожном строительстве.

Первая установка по технологии Primus была построена в Люксембурге на заводе Primores в 2003 г. Ее производительность составляет 85 000 т/год, что позволяет переработать весь объем тонкодисперсной пыли из электродуговых печей и шламов от прокатных станов, вырабатываемых сталелитейной промышленностью Люксембурга. В состав установки входят многоподовая печь с восемью подами внутренним диаметром 7,7 м и электродуговая печь мощностью 10 МВт с внутренним диаметром 3,5 м. На тонну шихты установка производит 250 кг чугуна, 350 кг вторичной пыли (концентрат оксида цинка) и 200 кг шлака при среднем расходе угля 320 кг, электроэнергии — 1,05 МВт. В 2009 г. запущена в эксплуатацию установка в Тайване на заводе Dragon Steel.

Технология компании ZincOx Resources основана на использовании в качестве основного агрегата вращающейся подовой печи и похожа на технологию Fastmet.

Технологический процесс включает брикетирование пылевидных железосодержащих отходов и угольной мелочи со связующим, прокалку их в печи с вращающимся подом при температуре > 1250°С. Уголь в брикетах действует как восстановитель, реагируя с оксидами цинка и железа, которые восстанавливаются до металлической формы. При температуре в печи металлический цинк представляет собой пар, который испаряется, но быстро реагирует с кислородом в верхней части печи, образуя очень мелкие частицы оксида цинка, которые выносятся с отходящими газами. Железо остается в брикете в виде очень мелких частиц, тесно связанных с другими элементами, которые образуют шлак. Отходящие газы охлаждаются, а твердые частицы регенерируют в обычной рукавной фильтровальной камере. Уловленный конденсат состоит в основном из оксида и солей цинка. Непрерывный характер процесса и дожигание газов в печи делают технологию очень энергоэффективной.

Фирма Kuttner разработала технологию переработки металлургических отходов Охусир. Мелкодисперсные отходы (пыль и шлак) смешивают с восстановителем, загружают в виде так называемых С-брикетов. Брикеты вместе с коксом, флюсами и другими железосодержащими отходами (сварочный шлак, скрапины и др.) загружают в шахтную печь.

Загрузка шихты осуществляется сверху и, находясь в противотоке с отходящими газами, она нагревается. При температуре около 1000°С происходят процессы восстановления металлов. Продуктами являются металл (чугун) и шлак, которые выпускаются непрерывно. При температуре 1500°С происходит выпуск чугуна с содержанием углерода около 4%. Испарившийся цинк удаляется из печного пространства вместе с колошниковыми газами, являясь вторичным продуктом.

Процесс PIZO разработан компанией Heritage (США) и позволяет перерабатывать пыль с получением сырого оксида цинка, чугуна и шлака.

PIZO — это непрерывный одностадийный процесс, обеспечивающий переход 95% железа в чугун при содержании цинка в сыром оксиде цинка 65–70%. Основной технологической установкой является индукционная печь.

Перспективными являются разработки вельц-технологии, комбинированной с выщелачиванием. Такая комбинация успешно реализована компаниями Horsehead (США), Glencore (Италия) и «Акита» (Япония). Очевидными преимуществами этой технологии являются:

- производство металлического цинка — и поэтому независимость от первичных цинковых заводов;
- возможность извлечения свинца и серебра;
- удаление хлора и фтора до минимального уровня.

Недостатками являются:

- высокие инвестиционные затраты, а значит, высокая стоимость цинка;
- не достигается восстановление железа;
- не достигается требуемое качество цинка при электролизе.

Перспективным направлением является использование плазменного нагрева для извлечения из пыли легко испаряющихся компонентов. Плазменные технологии достаточно гибки к изменениям параметров процесса и характеризуются надежными и управляемыми энергетическими параметрами. Преимуществом плазменной технологии является также возможность исключения стадии предварительного окускования пыли. После извлечения цветных компонентов обработанную пыль можно вернуть обратно, в металлургический цикл.

Существуют различные технологии плазменной переработки цинк- и свинецсодержащей сталеплавильной пыли (например, Tetronics, ScanDust и ArcFume, технология компании «Минтек», технология компании SKF, Davy, Mannesmann-Demag).

Примерами плазменного способа переработки железосодержащих отходов являются процессы шведских разработчиков: ScanDust и ArcFumes. Технология ScanDust позволяет перерабатывать пыль электросталеплавильного процесса, которая поступает в смеситель с коксом и водой и перемешивается. Лишняя вода удаляется, а смесь инжектируется в нижней части плазменного генератора. Конечными продуктами процесса являются металл, шлак и газ. Металл возвращают в металлургический цикл, шлак используют для дорожно-строительных работ, газ можно возвращать в плазменный генератор или использовать для теплоснабжения. Уловленный цинк отделяют и восстанавливают в других процессах.

Процесс ArcFume применяется в Норвегии в городе Хёйангер для восстановления оксида цинка из пыли и перерабатывает 50 000 т пыли в год. Использование данной технологии осложняется жесткими требованиями, предъявляемыми к качеству сырья: химический состав, размер частиц, содержание влаги. Пыль смешивается с восстановителем (углем, угольной пылью, коксом), полученная смесь подается в печь. Оксид цинка восстанавливается до газообразного металлического цинка и покидает рабочее пространство печи с восстановительным газом. Газовая смесь сжигается с помощью примеси сжатого воздуха непосредственно над шлаковой ванной. Пар цинка преобразуется в ZnO, а CO и H<sub>2</sub> окисляются в CO<sub>2</sub> и пар. Мелкие частицы оксида цинка переносятся отходящим газом через систему охлаждения газа и собираются в рукавный фильтр. Оксид железа восстанавливается до FeO, который образует шлак, содержащий в основном оксид железа, диоксид кремния и известь.

Компания Tetronics (Великобритания) имеет опыт переработки цинксодержащих пылей в плазменно-дуговой печи типа электросталеплавильной с центральным вращающимся наклонным плазмотроном (катодом) и ванной (анодом). Данная технология является одностадийным процессом с одним или несколькими электродами, печью постоянного тока и с атмосферой аргона.

В качестве шихтовых материалов (не требующих окускования) загружают пылевидные отходы, флюс, кокс. Восстановление происходит при температуре 1500–1550°С. Разложение органических и неорганических соединений происходит при температуре 1500°С (для большей части реактора) и около 10 000°С (для ядра плазменной дуги). Конечные продукты — чугуны, шлак и сырой оксид цинка.

Производители отмечают следующие преимущества технологии:

- минимальное воздействие на окружающую среду;
- простота управления и обслуживания;
- относительно низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы;
- универсальность, технология может перерабатывать широкий спектр отходов и др.

Плазменные установки компании Tetronics эксплуатируются в Японии, Великобритании, Италии, Германии и Корее.

Технология плазменно-дуговой переработки электросталеплавильной пыли, разработанная компанией «Минтек» (США), включает плазменно-дуговой комплекс из четырех печей мощностью от 30 кВт до 1 МВт. Печи работают на постоянном токе, графитовый электрод служит катодом, а расплав в ванне печи — анодом. Производительность процесса — от 5 до 100 кг/ч для печи мощностью 200 кВА. Плазмообразующий газ (азот или аргон) подается через центральное отверстие в графитовом электроде.

С начала 1970-х гг. в мире активно развиваются процессы жидкофазного восстановления железа из дисперсного вторичного сырья (доменные и конвертерные пыли и шламы, прокатная окалина), позволяющие получить из отходов дешевый чугун. Основными являются «Корекс» (Австрия, Германия, с 1977 г.), «Ромелт» (Россия, 1979 г.), HISMelt (Германия, 1984 г.), DIOS (Япония, 1988 г.), AusIron (Австрия, 1994 г.), Finex (Австрия).

Обычно жидкофазный процесс — двухстадийный: на первой стадии происходит нагрев и частичное восстановление (до 50%) сырья газом, отходящим из второй стадии процесса, на которой происходит окончательное восстановление продукта. Для предварительного восстановления используют шахтные печи или реакторы кипящего слоя. Окончательное восстановление происходит в низкошахтных печах (в т. ч. в электропечах) или в агрегатах конвертерного типа.

Наиболее освоенным из жидкофазных процессов является процесс «Корекс» (Corex), разработанный совместно компаниями Voest Alpine (Австрия) и Korf Engineering (Германия). В настоящее время работают установки производительностью 60 тыс. т/год (Германия) и 300 тыс. т/год компании ISCOR (ЮАР). Разработана конструкция установки «Корекс» второго поколения производительностью 600 тыс. т/год. Сущность процесса: предварительное восстановление в шахтной печи (типа печи «Мидрекс» с горячей разгрузкой) газом, отходящим из плавильного агрегата — газификатора, куда загружается предварительно восстановленный материал и где происходит его окончательное восстановление, а также газификация угля, вдуваемого в агрегат с кислородом.

Развитием процесса Corex является разработанный компанией Voest Alpine и исследовательским центром компании POSCO процесс Finex, в котором используется мелкое (крупность до 8 мм) железорудное сырье. В процесс Finex предварительное восстановление руды протекает в реакторах с кипящим слоем, а затем последующее получение чугуна из частично металлизированного сырья — в печи-газификаторе. Предварительно восстановленное сырье со степенью металлизации 85–90% брикетировано и через загрузочные люки подается в плавильную печь-газификатор. Процессы в печи-газификаторе агрегата Finex практически не отличаются от таковых в процессе Corex. Программа разработки и исследования технологии предусматривала переоборудование установки Corex производительностью 600 тыс. т чугуна в год в модуль Finex, испытание и отработку технологии, а затем строительство нового, более производительного модуля. Вторая (новая) установка Finex производительностью 1,5 млн т чугуна в год была запущена в апреле 2007 г. на заводе в Южной Корее.

Технология РОМЕЛТ, разработанная в МИСИС, реализована в опытно-промышленном масштабе в 1984 г. на НЛМК. В 1997 г. при участии компании Samsung Heavy Industries сооружена пилотная установка в городе Таеджон (Республика Корея) для отработки технологии переработки в печи «Ромелт» твердых бытовых отходов. В 2008 г. на заводе компании АВ Metals (г. Балхаш, Казахстан) пущена в эксплуатацию промышленная установка мощностью 32 тыс. т чугуна в год. В 2015 г. запущена в эксплуатацию установка в Мьянме мощностью 205 тыс. т чугуна в год.

Ромелт — это непрерывный способ получения чугуна из железосодержащего сырья и отходов с применением энергетических углей. В печь с расплавом шлака через нижние фурмы вдувается кислородно-воздушная смесь, которая интенсивно перемешивает шлак. В качестве железосодержащего сырья используются шламы доменного и сталеплавильного производств, колошниковая пыль, пыли электропечей, окалина прокатная (в том числе

замасленная) и конвертерная. Железосодержащая шихта и уголь непрерывно загружаются сверху на поверхность шлакового расплава с температурой 1400–1500°С. Предварительной подготовки пылевидного сырья или угля не требуется. Уголь выполняет две функции — топлива и восстановителя. Образующийся в результате восстановления чугуна осаждается на дно (подину) печи. Металл и шлак выпускают через отверстия (летки), выполненные на разных уровнях. Летучие элементы Zn, Pb, Ag выносятся с дымовыми газами и при охлаждении осаждаются в пыль, где их концентрация многократно возрастает. Пыль процесса «Ромелт» является сырьем для получения цветных металлов. Завод «Ромелт» производительностью 280 тыс. т отходов в год построен в Мьянме. Дальнейшего промышленного распространения технология не получила.

Процесс Dios впервые был реализован на полупромышленной установке с номинальной мощностью 180 тыс. т чугуна в год в 1993 г. на заводе «Кэйхин» фирмы НКК (Япония). Процесс трехстадийный, включающий подогрев шихты из мелкой руды и пылевидных отходов до 600°С в реакторе псевдосжиженного слоя, предварительное восстановление (степень восстановления 27–30%) в реакторе кипящего слоя при температуре 780°С и окончательное восстановление в реакторе жидкофазного восстановления под давлением  $2 \times 10^5$  Па.

Общим недостатком жидкофазных процессов является сложность промышленной реализации и высокая капиталоемкость.

### ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ МЕЖОТРАСЛЕВЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

Вторичными ресурсами металлургии наряду с отходами собственно металлургического производства являются отходы, образующиеся в других сферах деятельности. Замена используемых в металлургии природных ресурсов вторичными сырьевыми компонентами, полученными на основе отходов различных отраслей, способствует экономии материально-энергетических ресурсов.

Мировая практика показала, что основная масса всех образующихся техногенных отходов не может быть переработана на тех предприятиях, где эти отходы образуются. Все большее распространение получает практика использования отходов смежных отраслей. При решении этой проблемы особая роль отводится черной металлургии. Предприятия черной металлургии в состоянии переработать с высокой степенью эффективности подавляющее большинство отходов самых разных отраслей: от автомобильного металлолома до бытовых отходов.

Это обусловлено тем, что комплекс современных предприятий черной металлургии включает агрегаты и производства с полным набором возможных технологических характеристик:

- широкий температурный диапазон;
- нейтральная, окислительная или восстановительная атмосфера;
- активные шлаковые расплавы;
- диапазон давлений от 1 МПа и более до технического вакуума;
- полный набор оборудования для подготовки отходов (дробление, помол, сушка и пр.);
- полный набор для улавливания и очистки выделяющихся газов.

Переработка отходов в высокотемпературных металлургических агрегатах при температуре 1500–2000°С с активной окислительно-восстановительной атмосферой в присутствии соединений кальция обеспечивает полное разложение токсичных веществ до безопасных соединений, переход неразложившихся токсичных соединений в шлак и его остеклование.

В последние годы вовлечение металлургических агрегатов в переработку различных видов отходов наблюдается во всем мире. Металлурги разных стран мира, начиная со второй половины XX в., предлагают и успешно реализуют идеи утилизации в высокотемпературных металлургических агрегатах широкого спектра различных отходов, включая токсичные.

### Синтетические легкоплавкие флюсы для черной металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства

Фторуглеродистые отходы алюминиевого производства являются одним из наиболее массовых и экологически опасных видов отходов алюминиевой промышленности. Ежегодно на алюминиевых заводах России образуется более 70 тыс. т отработанной футеровки электролизеров (ОУФЭ) и около 100 тыс. т мелкодисперсных отходов (хвосты флотации угольной пены, шламы и пыли газоочисток и аспирационных установок). Количество отходов, накопленных в отвалах и шламонакопителях, составляет более 2 млн т. Перечисленные отходы содержат ряд токсичных компонентов: фториды, цианиды, полициклические ароматические углеводороды и др.

В то же время благодаря комплексному составу и уникальным свойствам фторуглеродистые отходы электролитического производства алюминия являются перспективным сырьем для производства уникальных синтетических легкоплавких флюсов, выполняющих в металлургических процессах одновременно несколько важных технологических функций:

- высокоэффективного разжижителя шлака вследствие наличия в их составе легкоплавких фторидов натрия и алюминия;
- дополнительного топлива благодаря достаточно высокому содержанию углерода;
- десульфуратора чугуна и стали благодаря содержанию активных соединений натрия.

Инновационным предприятием ООО «Экологический региональный центр» (Россия) разработан, запатентован и реализован на практике комплекс технологических решений по получению на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства кусковых и брикетированных синтетических легкоплавких флюсов для черной металлургии (рис. 18.5).



Рис. 18.5. Кусковые и брикетированные синтетические легкоплавкие флюсы на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства

Технология получения кусковых синтетических флюсов заключается в дроблении и сортировке кусковых фторуглеродистых отходов с получением фракций заданного размера, которые затем обрабатываются суспензией реагента, нейтрализующего токсичные соединения и повышающего рафинирующую способность флюса. Технология получения брикетированных синтетических флюсов заключается в смешивании мелкодисперсных фторуглеродистых отходов с водой и реагентом по определенному технологическому регламенту, выдерживании полученной шихты на воздухе и брикетировании.

Синтетические флюсы имеют следующие преимущества по сравнению с существующим аналогом (плавиковый шпат):

- более низкая температура плавления (на 250°С), что обеспечивает быстрое наведение жидкоподвижных шлаков в металлургических агрегатах;

- комплексный состав, включающий легкоплавкие фториды, углерод, соединения натрия и кальция, что обеспечивает его многофункциональность в металлургических процессах;
- низкое содержание примесных балластных компонентов;
- регулируемые состав и свойства с учетом требований потребителей благодаря технологии производства, включающей шихтование сырьевой смеси из фторуглеродистых отходов с различающимися свойствами (химсостав, крупность);
- низкая стоимость.

Кусковые синтетические флюсы впервые были испытаны в 1994–1995 гг. в доменном производстве ОАО «ЗСМК» на доменных печах № 1–3 для решения проблем дефицита кокса и проплавки тугоплавких титаносодержащих окатышей Качканарского ГОКа. В период испытаний было отмечено значительное улучшение жидкотекучести шлака при стабильной работе доменной печи. С 1 декабря 1994 г. комплексные флюсы были введены в шихту доменной печи № 3 и с 8 декабря — в шихту доменной печи № 1. Расход комплексных флюсов на доменной печи № 3 колебался от 29 до 109 т/сутки или от 6,7 до 20,0 кг/т чугуна (ср. 11 кг/т), на доменной печи № 1 — от 15 до 74 т/сутки или от 3,0 до 14,0 кг/т чугуна (ср. 6,0 кг/т). Всего за период опытно-промышленной кампании в 1994 г. было переработано 3192 т комплексных флюсов. В 1995 г. в доменных печах ОАО «ЗСМК» было переработано 22 692 т комплексных флюсов при среднем расходе на печах 8 кг/т чугуна при колебаниях расхода от 3 до 15 кг/т чугуна. Использование комплексных флюсов с расходом 12 кг/т чугуна при одновременной переработке неофлюсованных окатышей Качканарского ГОКа в количестве 20% обеспечило значительное улучшение жидкотекучести и обессеривающей способности шлаков. Достигнуто снижение содержания в чугуне серы в 2,4 раза, а также уменьшение расхода кокса на 5,2%, снижение образования шлака на 14–16% по сравнению с периодом, когда неофлюсованные окатыши перерабатывались без использования комплексных флюсов.

В 2001 г. комплексные синтетические флюсы внедрены в доменном производстве ОАО «КМК» (позднее ОАО «НКМК»). Начиная с 2002 г. комплексные синтетические флюсы постоянно использовались в доменных печах ОАО «НКМК». В 2002 г. на двух доменных печах переработано 3861 т флюса, удельный расход колебался от 0,7 до 8,7 кг/т чугуна (в отдельные периоды — до 10–15 кг/т), средний расход — 1,8 кг/т чугуна. Экономия кокса составила 2896 т.

Промышленные испытания опытной партии брикетированных синтетических флюсов в 350-тонном конвертере ОАО «ЗСМК» показали эффективность их применения в качестве разжижителей шлаков взамен традиционных, установлено отсутствие влияния брикетов на условия труда в конвертерном цехе.

### **Отработанные автомобильные покрышки (ОАП)**

В мире ежегодно образуется не менее 10 млн т отработанных автомобильных покрышек, в том числе в странах ЕС — 2,3 млн т, в США — 2,6 млн т, в СНГ — 2,5 млн т. Наиболее распространенным способом их утилизации является сжигание для получения тепла и электроэнергии. Резиновая составляющая покрышек характеризуется низкой зольностью — 2–3% — и высокой теплотой сгорания — на уровне 7000–9000 ккал/кг, что обуславливает их ценность как топлива. В связи с этим в США и Великобритании развивается строительство электростанций, использующих в качестве топлива автомобильные шины.

Благодаря высокой энергетической ценности отработанные автомобильные покрышки могут быть использованы в качестве вторичных энергетических ресурсов в металлургических процессах. Так, например, сталелитейная компания Nippon Steel в Японии использует отработанные автопокрышки как часть железосодержащего скрапа и угля в плавильных печах, таким способом утилизируется около 5 млн шин в год. Компания Stebbing Engineering Division Accelerated Technologies Corporation (США) запатентовала метод чистого сжигания

старых покрышек в электродуговых печах как способ использования покрышек и замену угля. Достигнуто 20%-ное уменьшение выбросов CO<sub>2</sub>, система отчистки дымового газа осталась без изменений, уровни серы часто ниже, чем при использовании угля, и улучшены результаты плавления из-за корда в покрышках.

На ОАО «ЗСМК» разработана и внедрена технология переработки отработанных автомобильных покрышек как альтернативного внешнего топлива в конвертерном процессе с предварительным нагревом лома. Целесообразность использования ОАП в данной технологии обусловлена следующими качественными характеристиками покрышек:

- 1) низкий уровень влажности и зольности;
- 2) высокая теплота сгорания, превышающая теплоту сгорания углей и даже кокса;
- 3) отсутствие подверженной выносу из конвертерной ванны мелочи;
- 4) высокий выход летучих веществ, горение которых обеспечит быстрый и равномерный прогрев лома;
- 5) наличие железа в корде.

Высокая температура (1300–1500°С) и избыток технически чистого кислорода (99,99%) в конвертерной ванне обеспечивают быстрое и полное сгорание покрышек без выделения сажи и других продуктов неполного сгорания, включая бензапирен. Наличие мощных газоочистных устройств мокрого типа с замкнутыми циклами оборотного водоснабжения практически полностью исключает вероятность загрязнения окружающей среды. При этом открывается возможность утилизации покрышек малого и среднего размера массой до 100 кг в целом виде без специального измельчения, что значительно сокращает себестоимость переработки.

В 2001–2002 гг. на Западно-Сибирском металлургическом комбинате проведена серия промышленных экспериментов, а начиная с 2003 г. освоена технология выплавки стали в конвертерах с использованием отработанных автомобильных покрышек для частичной замены каменного угля в период предварительного прогрева лома. Технология предусматривает ввод в конвертер на стадии предварительного нагрева лома при одновременной подаче кислорода средне- и малогабаритных автопокрышек в целом виде. Органическая часть покрышек сгорает с выделением значительного количества тепла, металлический корд расплавляется, заменяя часть металлолома.



Рис. 18.6. Переработка отработанных автомобильных покрышек в кислородных конвертерах Западно-Сибирского металлургического комбината

Установлено, что использование отработанных автопокрышек в технологии выплавки стали в конвертере при их расходе 3,3–5,5 кг/т стали, или 27–51% от общего расхода твердого топлива, обеспечивает снижение общего расхода топлива при отсутствии влияния на технологические показатели плавки и качество изготавливаемой стали. Показано, что технология переработки автопокрышек в кислородно-конвертерном процессе является

низкозатратным, экономически эффективным и экологически безопасным способом, обеспечивающим полную утилизацию покрышек, накопившихся в регионе расположения металлургических предприятий. Общий экономический эффект от внедрения технологии в условиях ОАО «ЗСМК» составил в 2005 г. 3,04 млн руб. В апреле 2006 г. общее количество переработанных автомобильных покрышек составило 1 млн штук.

В 2004 г. технология переработки отработанных автопокрышек в кислородных конвертерах стала лауреатом конкурса «Национальная экологическая премия» за вклад в укрепление экологической безопасности и устойчивое развитие России.

### Отходы пластмасс

Металлургические процессы традиционно являются мощными потребителями энергетических ресурсов, составляющих значительную долю в себестоимости продукции. В связи с устойчивой тенденцией роста цен на природные энергоносители, наблюдаемой в последние годы, проблема снижения их удельного расхода на 1 т металлопродукции приобретает особенно большое значение. Перспективным направлением решения этой проблемы является разработка новых технологий металлургического передела с использованием возобновляемых альтернативных видов энергоресурсов, одним из наиболее доступных из которых являются отходы пластмасс.

Металлургические компании Германии и Японии уже более 20 лет вдувают измельченные отходы пластмасс в форменную зону доменных печей, обеспечивая существенную экономию кокса. Пластмассы по химическому составу и теплоте сгорания подобны природным ископаемым топливам — природному газу, нефти, углям.

Германская фирма Stahlwerke Bremen GmbH перерабатывает в доменных печах свыше 70 тыс. т в год отходов пластмасс. Фирма Eko-Stahl в г. Айзенхюттенштадт вдувает отходы пластмасс в доменные печи с 1996 г. с устойчивым расходом 30–60 кг/т чугуна, обеспечивая экономию кокса и мазута.

В Японии использование отходов пластмасс в доменных печах ведется с 1993 г. В 1996 г. фирма «Ниппон Кокан» в г. Кейхане вдувает отходы пластмасс в доменную печь объемом 4907 м<sup>3</sup>, максимальный расход пластмасс составляет 200 кг/т чугуна.

В настоящее время система рециклинга пластмасс, разработанная фирмой «Ниппон Кокан», широко используется японскими металлургическими компаниями, которые, поддерживая международный стандарт ISO 14001, проводят политику «истинной защиты глобальной окружающей среды» даже в тех случаях, когда в некоторой степени повышаются расходы. В 2000 г. в доменных печах было сожжено 190 тыс. т пластиковых отходов, а годовой потенциал их использования достиг 300 тыс. т в 2001 г. (в 1997 г. — 40 тыс. т). Японская компания JFE Group разработала технологию повторного использования промышленных и бытовых пластмассовых отходов в качестве вторичных ресурсов при производстве чугуна: отходы электробытовых приборов, бутылки из полиэтилентерефталата (ПЭТ), одноразовая пластиковая посуда и др. В настоящее время Япония приближается к уровню 1 млн т в год отходов пластмасс, перерабатываемых в доменных печах, что составляет 10% от уровня их ежегодного образования. Это обеспечивает снижение энергопотребления в черной металлургии на 1,5%.

Для организации переработки пластмассовой тары и упаковки на территории металлургических комбинатов в Кейхане и Фукуяме сооружено и введено в эксплуатацию оборудование по переработке пластика в доменное сырье общей мощностью 120 тыс. т/год. На оборудовании для переработки отходов в доменное сырье прессованные и упакованные отходы, собранные муниципальными органами, сортированные и отвечающие установленным требованиям, подвергаются измельчению и поступают в виброклассификатор для разделения пластика по видам и удаления посторонних предметов. Твердые формованные детали, бутылки и другие изделия направляются на участок ручной сортировки, на котором удаляют



объекты, непригодные для переработки, после чего материал поступает в измельчитель, где дробится до определенной крупности. Пленочный пластик после измельчения предварительно подвергают грануляции в грануляторе, получая зерна определенного размера. На оборудовании для переработки отходов пластика в доменное сырье отделяют и отбраковывают поливинилхлорид, который считается непригодным.

В доменной печи отходы пластмасс вдувают в нижнюю часть печи через воздушные фурмы. В фурменной зоне в условиях высоких температур (1600–1800°С) происходит термическое разложение пластмасс с образованием восстановительных газов CO и H<sub>2</sub>, которые участвуют в восстановлении железорудного сырья. Восстановительная реакция проходит с участием водорода, поэтому по сравнению с плавкой только на коксе объем образующегося CO<sub>2</sub> уменьшается приблизительно на 30%. На восстановление железной руды расходуется около 60% вдуваемого пластика, а остальные 40% утилизируются в заводском хозяйстве как топливо для энергоагрегата и для доменных воздухонагревателей.

Регулярный мониторинг выбросов в атмосферу при переработке пластмасс в доменных печах германской фирмы Stahlwerke Bremen GmbH показал, что количество выбросов пыли, SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> при использовании пластмасс находится существенно ниже уровня предельно допустимых выбросов. В выбрасываемых в атмосферу газах были обнаружены следовые концентрации диоксинов — менее 0,001 нг/м<sup>3</sup>, что более чем в 100 раз ниже уровня предельно допустимой концентрации (ПДК) диоксинов в атмосферном воздухе, составляющей в Германии 0,1 нг/м<sup>3</sup>.

В Московском институте стали и сплавов (МИСИС) разработана технология переработки в доменных печах пластмасс, в том числе хлорсодержащих.

Авторы технологии отмечают, что в фурменной зоне доменной печи при температуре свыше 1800°С и в условиях достаточного количества щелочных металлов практически весь хлор связывается в соединения NaCl, KCl, вследствие чего образование таких хлорсодержащих супертоксикантов, как диоксины и фураны, практически исключается.

На Западно-Сибирском металлургическом комбинате разработана и запатентована технология переработки отходов пластмасс в кислородно-конвертерном процессе, которая прошла успешные испытания в 350-тонных конвертерах. Отходы пластмасс (полиэтилен, полипропилен, полистирол) использовались в качестве дополнительного энергоносителя в технологии выплавки стали с пониженной долей жидкого чугуна.



Рис. 18.7. Спрессованные пластмассы в загрузочном совке перед подачей в кислородный конвертер

В период опытно-промышленных испытаний отходы в спрессованном виде загружались в 350-тонный конвертер в период прогрева лома и полностью заменяли традиционно используемые внешние теплоносители (уголь, кокс). Результаты проведенных опытных плавков

показали, что отходы пластмасс могут быть использованы в конвертерной плавке в качестве альтернативных энергоносителей. Рекомендован расход отходов 1–2 кг/т стали.

Условия конвертерной плавки (высокая температура 1400–1500°С, атмосфера технического чистого кислорода, высокая интенсивность массообмена, длительность пребывания отходов в конвертере, наличие извести и основного шлака, загрузка отходов небольшими партиями) способствуют полному исключению образования диоксинов и диоксиноподобных веществ при сжигании даже хлорсодержащих пластмасс. На основании результатов анализа 17 изомеров диоксинов и диоксиноподобных соединений (ПХДД — полихлорированные дибензо-*p*-диоксины и ПХДФ — полихлорированные дибензофураны) в составе газообразных выбросов установлено отсутствие влияния отходов пластмасс на концентрацию анализируемых соединений.

## СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Вторичные ресурсы и произведенная на их основе продукция могут обеспечить равноценную или даже более эффективную замену природных ресурсов и первичного сырья в металлургии и других отраслях. Поэтому оценку эффективности технологий переработки вторичных ресурсов целесообразно производить по качественным показателям произведенной на их основе продукции в сравнении с продукцией из природного сырья, а также по технико-экономическим показателям производственных процессов их переработки.

### Переработка металлургических шлаков

Качество продукции из металлургических шлаков должно удовлетворять требованиям существующих стандартов и технических условий.

Щебень, песок и готовые щебеночно-песчаные смеси для дорожного строительства, получаемые из текущих и отвальных шлаков, предназначаются для устройства всех видов покрытий, оснований и других конструктивных слоев дорожных «одежд» и должны удовлетворять по качественным показателям ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия». Щебень и песок из шлаков для бетонов должны соответствовать требованиям ГОСТ 5578–94 «Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия». Качество гранулированных шлаков, используемых для производства цемента, определяется в соответствии с ГОСТ 3476–74 «Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цемента». Качество шлаковой пемзы, применяемой в качестве пористого заполнителя конструкционных и теплоизоляционных легких бетонов, определяется по ГОСТ 9760–75 «Щебень и песок пористые из металлургического шлака (шлаковая пемза)». Шлаки сталеплавильные для известкования кислых почв должны соответствовать техническим условиям ТУ 14–11–117–80 «Шлак сталеплавильный для известкования кислых почв».

Эффективность использования шлаковой продукции в сравнении с продукцией, произведенной из природного сырья, приведена в табл. 18.7.

Представленные данные показывают, что продукция, произведенная из металлургических шлаков, в случае ее соответствия требованиям стандартов или технических условий является эффективным заменителем продукции из природного сырья. Так, шлаковая пемза равноценна керамзиту, а шлаковый щебень — щебню из горных пород. Шлакопортландцемент заменяет портландцемент, а металлопродукт — амортизационный лом с коэффициентом замены 0,95. Шлаковая мука из сталеплавильных шлаков заменяет известковую муку с коэффициентом замены 0,94, а фосфат шлак заменяет суперфосфат с коэффициентом замены 0,80.

Таблица 18.7. Эффективность использования шлаковой продукции

Шлаковая продукция	Продукция из природного сырья	Коэффициент эффективности (замены)
Шлакопортландцемент	Портландцемент	0,95
Шлаковая пемза	Керамзит	1,0
Щебень шлаковый литой из доменных и сталеплавильных шлаков	Щебень из горных пород	1,0
Металлопродукт из шлаков	Амортизационный лом	0,95
Шлаковая мука из сталеплавильных шлаков	Известковая мука	0,94
Фосфатшлак	Суперфосфат	0,80

В табл. 18.8 приведены технологические показатели различных способов грануляции доменных шлаков и качества получаемой продукции.

Таблица 18.8. Технологические показатели различных способов грануляции доменных шлаков и качества получаемой продукции

Способ грануляции	Температура сливаемого шлака, °С	Расход шлака, т/мин	Расход воды, м <sup>3</sup> /т шлака	Давление воды, МПа	Влажность граншлака, %	Объемная насыпная плотность граншлака, кг/м <sup>3</sup>
Мокрые способы						
Бассейновый	1300–1400	6,0–4,6	1,5–2,0	–	15–30	600–1000
Желобной	1300–1400	3,0–2,6	1,3–2,0	0,3–0,4	15–20	800–1000
Полусухие способы						
Центральный гидрожелобной	1300–1350	6,0–2,5	1,1–3,5	0,4–0,6	12–20	700–1000
Припечной гидрожелобной	1480–1620	8,0–13,0	3,0–5,0	0,3–0,4	12–17	900–1200
Барабанный	1300–1400	4,6–3,6	0,8–2,0	0,2–0,4	10–15	1000
Сухие способы						
Вододутьевой	1400–1550	5,0–10,0	0,6–0,8	0,3–0,4	5–10	1300
Воздушный барабанный	1400–1550	8,0–10,0	–	–	< 5	> 1300

Мокрые способы грануляции (бассейновой, желобной) характеризуются простотой конструкции и эксплуатации, однако имеют низкую производительность, наихудшие качественные показатели получаемого граншлака по влажности и объемной насыпной плотности, требуют дополнительного обезвоживания получаемого гранулированного шлака, не экологичны.

Полусухие способы грануляции (гидрожелобной, барабанный) являются значительно более производительными и обеспечивают требуемое качество получаемого граншлака, благодаря чему получили наибольшее распространение.

Представленные данные показывают преимущества припечных грануляционных установок по сравнению с центральными на примере гидрожелобного способа грануляции:

- более высокая производительность и эффективность переработки шлака вследствие того, что при центральном способе 30–35% шлака уходит на образование корок, коржей и настелей в ковшах, что определяет относительно низкий выход гранулированного шлака (не более 75%) из исходного огненно-жидкого шлака;
- более низкое давление воды;
- более высокое качество гранулята, в частности более высокая объемная насыпная плотность при более низкой влажности вследствие того, что за время транспортировки при центральном способе грануляции температура огненно-жидкого шлака снижается на 100–150°С, что ухудшает качество гранулята как материала для производства вяжущих веществ;
- низкие транспортные расходы, исключение из эксплуатации парка шлаковозных ковшей, что значительно упрощает организацию и удешевляет производство.

Эксплуатационные затраты при припечной грануляции шлака на 44% ниже, чем при центральной грануляции, капитальные затраты ниже на 55%.

Наиболее прогрессивными и эффективными являются сухие способы грануляции, позволяющие исключить обратное водоснабжение и характеризующиеся высокой производительностью. Получаемый граншлак имеет низкие значения влажности и пористости и может быть использован в производстве строительных материалов. Сравнение эксплуатационных затрат показывает, что воздушная грануляция шлаковых расплавов в 1,5–2 раза экономичнее водных способов грануляции.

Одним из перспективных решений является охлаждение и затвердевание шлаковых расплавов в агрегатах с шаровой насадкой. Переработка жидких шлаков в таких агрегатах опробована практически на всех видах шлаков (доменные, сталеплавильные, ферросплавные).

В табл. 18.9 приведены технические характеристики основных способов грануляции металлургических шлаков и современный уровень требований к технологии и оборудованию.

Приведенные данные подтверждают преимущества воздушной грануляции металлургических шлаков, при этом наибольшей эффективностью характеризуется воздушный способ с охлаждением шлакового расплава в барабане с шаровой насадкой.

В табл. 18.10 приведены сравнительные технологические параметры шлакопемзовых установок.

Наиболее простым и характеризующимся наименьшими эксплуатационными затратами является траншейно-брызгальный способ, а наиболее сложным, затратным и взрывоопасным — бассейновый. По качеству получаемой продукции способы ранжируются следующим образом:

- 1) гидроэкранный;
- 2) вододутьевой;
- 3) бассейновый;
- 4) траншейно-брызгальный.

Таблица 18.9. Технические характеристики основных способов грануляции металлургических шлаков

Показатели	Водная грануляция	Воздушная грануляция	Воздушный с шаровой насадкой	Требуемый уровень
Вид шлака	Малая вязкость	Малая вязкость	Любой	Любой
Выход годного, %	50	90	100	100
Взрывобезопасность	Слабая	Высокая	Высокая	Очень высокая
Производительность, т/мин	1,5	2–2,5	1–3 (8)	3–5 (10)
Цикл процесса, мин.	5–6	1–2	1–2	1–2
Расход воды на охлаждение шлака, т/т	10:1	–	1:1	0,5:1
Давление в системе, МПа	0,25	0,35–0,6	0,3	0,4–0,6
Расход подаваемой воды, м³/ч	624	100	100–180	60–100
Вредные факторы	Парогазовая смесь	Шум 100 дБ	Парогазовая смесь	Парогазовая смесь
Фракционный размер частиц (> 90%), мм	< 5	< 6	< 10	< 10
Влажность гранул, %	15–20	< 5	< 5	< 5
Устойчивость структуры, потеря массы, %	< 3	> 5	< 3	< 3

Таблица 18.10. Технологические параметры шлакопемзовых установок

Способ	Температура сливаемого шлака, °С	Расход шлака, т/мин	Расход воды, м³/т шлака	Давление воды, МПа	Расход воздуха, нм³/т шлака	Давление воздуха, кПа	Длительность кристаллизации, ч
Гидроэкранный	1300–1350	3,0–12,0	0,3–0,4	0,4–0,8	–	–	16
Водовоздушный	1200–1300	2,0–3,5	0,4–0,6	0,6	100–170	9	4
Бассейновый	1250–1300	10,0–20,0	0,6	0,1	–	–	5
Траншейно-брызгальный	1250–1300	4,0–5,0	0,2–0,4	0,3–0,4	–	–	2
Барабанный	1200–1350	2,5–3,5	0,3–0,4	0,6	200–250	9	4

В табл. 18.11 приведены результаты расчетов, выполненных УралНИИЧМ, удельных капитальных затрат на организацию различных способов переработки доменного шлака в ценах 2018 г.

Таблица 18.11. Расчетная экономическая эффективность способов переработки доменного шлака

Продукция	Удельные капитальные затраты, руб./т	Эффект от переработки, руб./т
Граншлак	358,56	378,48
Шлаковая пемза	1733,04	298,8
Литой щебень	1235,04	7091,52
Шлаковая вата	8286,72	7748,88

Как следует из приведенных данных, наиболее экономически эффективным способом переработки доменного шлака является производство литого щебня и шлаковой ваты. Однако с учетом того, что организация производства шлаковой ваты требует наибольших капитальных затрат, производство литого щебня является наиболее эффективным.

### Технологии переработки металлургических пылей и шламов

Несмотря на простоту способа утилизации металлургических пылевидных отходов в агломерации, в мире активно разрабатываются технологии их переработки с получением продукции с более высокой добавленной стоимостью — частично восстановленного или металлизированного железосодержащего сырья, а также концентратов цветных металлов, главным образом цинка. В табл. 18.12 представлена сравнительная характеристика основных разработок в этой области.

Высокая степень металлизации содержащегося в отходах железа (более 90%) при одновременном эффективном извлечении цинка достигается при переработке предварительно окомкованных отходов в трубчатых вращающихся печах, которые получили широкое распространение в мире. Исключение стадии окускования обеспечивается при использовании плазменных технологий, а также процессов жидкофазного восстановления. Комбинирование процессов восстановления и плавления позволяет получить в качестве конечного продукта чугуна.

В большинстве используемых технологий цинк извлекается из отходов в виде оксида, концентрат которого может быть использован только как заменитель руды в первичной металлургии цинка. При использовании механических способов степень цинка может быть на 10–15% ниже, чем при применении пирометаллургических, однако реализация первых значительно дешевле, а установки проще в эксплуатации и их реализацию производят на серийно выпускаемом оборудовании. Получение металлического цинка обеспечивается при использовании вельц-технологии, комбинированной с выщелачиванием.

Таблица 18.12. Сравнительная характеристика технологий переработки металлургических пылей и шламов

Процесс, компания	Суть технологического процесса	Степень металлзации железа, %, где используется продукт	Степень извлечения цинка, %	Преимущества	Недостатки
Брикетиrowание					
Компания «Аугуст Тиссен», Германия	Брикетиrowание смеси пылей и шламов со связующим (50%-ный сульфитный щелок) и угольной пылью, обжиг при 600–900 °С в атмосфере CO:CO <sub>2</sub> =3:1	0, доменная печь	0		
Процесс Ferro-Carb, США	Сухое смешивание Fe- и C-содержащих пылей, нагрев и перемешивание шихты со связующим, брикетиrowание, нагрев брикетов в окислительной среде для дегидратации и полимеризации связующего	0, доменная печь	0		
Компания SSAB Merox AB, Швеция	Пыли и шламы конвертерного производства, прокатная окалина смешиваются со связующим (портландцемент), вибропрессование, 24-часовая выдержка в камере, упрочнение на открытой площадке в течение 3 недель	0, доменная печь	0	Технологическая простота, более низкие капитальные и эксплуатационные затраты по сравнению с другими способами получения окискованного сырья, экологическая безопасность	Ограничение по содержанию в отходах цинка, свинца и щелочей, необходимость предварительной очистки отходов от цинка
Компания «Дофаско», США	Брикетиrowание шихты из Fe-отходов и колошниковой пыли, содержащей углерод, на вальцевых прессах	0, дуговая электропечь	0		
Компания «Ниссен сэйко», Япония	Смешивание шламов после фильтров и сушилки в барабанных сушилаx с сухой пылью и прокатной окалиной, брикетиrowание со связующим, сушка брикетов в сушилаx конвейерного типа. Улавливание возгонов цинка в тканевом фильтре в виде оксидов	0, электропечи	10–20% оксидов цинка в уловленной пыли		

<p>ПАО «НЛМК», Россия</p>	<p>Гомогенизированную смесь железорудного концентрата, мелкодисперсных отходов и связующего непрерывно подают в экструдер, удаляют из нее воздух вакуумированием и продавливают через фильеру экструдера с получением пластичных стержней, которые в процессе транспортирования и штабелирования распадаются на брикеты, размерами которых управляют путем изменения площади и формы отверстий в фильере</p>	<p>0, доменная печь</p>	<p>0</p>	<p>Простота технологического процесса, исключение необходимости сушки брикетов, высокая производительность (до 100 т/час), широкие возможности по форме и размерам брикетов</p>	<p>Ограничение по содержанию в отходах цинка, свинца и щелочей</p>
<p>Горячее брикетирование</p>					
<p>Компания «Грей айрон фаундри», США</p>	<p>Нагрев шихты из смеси доменных пылей и шламов, прокатной окалины, тонкоизмельченного металлолома в печи кипящего слоя при температуре 800–1000°С, брикетирование на вальцевых прессах</p>	<p>0</p>	<p>0</p>	<p>Возможность брикетирования без связующих веществ, надежность технологии, получение металлизованных брикетов</p>	<p>Ограничение по содержанию в отходах цинка, свинца и щелочей, необходимость предварительной очистки отходов от цинка</p>
<p>Компани «Фест-Альпине», Австрия, и «Тиссен» (Германия)</p>	<p>Горячее брикетирование сухой уловленной в электрофильтрах конвертерной пыли</p>	<p>0, конвертер в качестве охлаждителя</p>	<p>0</p>		
<p>Компания Lucchini, Италия</p>	<p>Окомкование смеси доменных и конвертерных пылей, горячее брикетирование</p>	<p>Металлизованный продукт, доменная печь</p>	<p>0</p>		



Таблица 18.12 (продолжение)

Процесс, компания	Суть технологического процесса	Степень металлзации железа, %, где используется продукт	Степень извлечения цинка, %	Преимущества	Недостатки
Восстановительный агрегат — вращающаяся трубчатая печь					
Компании «Крупп», «Лурги», Германия	Металлизация окатышей из доменных и конвертерных шламов без связующих веществ при температуре 1050°С, восстановитель — лигнит	92–95	98–99	Возможность переработки широкого спектра отходов по химическому и гранулометрическому составу, получение металлосодержащего продукта (Fe <sub>мет</sub> — 70%) и концентрата цинка	Высокие капитальные и эксплуатационные затраты, значительные размеры трубчатой печи, сложность организации температурного контроля и управления тепловой и технологической работой печи, низкий КПД процесса металлзации
	Окомкование или брикетирование доменных и конвертерных шламов без связующих, сушка и подогрев на конвейере отходящими от печи газами, восстановление при 1050–1150°С, восстановитель — коксовая мелочь, барабанный охладитель, виброгрохот, магнитный сепаратор	95, доменная печь	99		
Компания «Сумитомо киндзоку коге», Япония	Окомкование пылей и шламов со связующим (0,5–1% бентонита), предварительный подогрев до 250°С, прокатка при 1050–1150°С, восстановитель — антрацит или коксик	88,8, доменная печь	90–96,4		
Компания «Ниппон кокан», Япония, технология СЛ-РН	Совместное измельчение и окомкование смеси пылей, шламов и тонкоизмельченной железной руды, обжиг и предварительное восстановление в конвейерной печи, восстановление во вращающейся печи, восстановитель — уголь с высоким выходом летучих веществ	Губчатое железо (Fe <sub>мет</sub> — 95%), доменная печь	95	Получение губчатого железа (Fe <sub>мет</sub> — 95%) и концентрата цинка	

Производство концентрата цинка					
Компания British Steel, Великобритания	Обработка колошниковой пыли в гидроциклоне, концентрация цинка в верхнем продукте	0, нижний продукт в агломерацию	99	Реализация на серийно выпускаемом оборудовании, капитальные и эксплуатационные затраты на подготовку шлама в 10–15 раз ниже, чем при получении из отходов металлургических окатышей	Невозможность получения восстановленного железа, низкая степень извлечения цинка — на 10–15% меньше, чем при применении пиromеталлургических
Способ DeZn, компания Rasa Corp., Япония	Обдирка поверхностного слоя частиц доменного шлама, высокоэффективная классификация в вакуумном гидроциклоне	0, осадок (75–80% твердого вещества) с низким содержанием цинка в агломерацию	80–90 со сливом	Низкое энергопотребление; хорошо отработанная и оптимизированная технология; простота технологического процесса в одну ступень	Низкое качество продукта («грязный» оксид цинка), который может быть использован только как заменитель руды в первичной металлургии цинка; большое количество вновь образующихся отходов (около 700–800 кг/т загрузочной пыли); извлечение только одного ценного металла
Вельц-процесс, с 1970-х гг. доминирует в разных странах, НДТ на ближайших 25 лет	Прокалка предварительно окомкованной шихты без восстановителя во вращающейся трубчатой печи при температуре 1200°С, улавливание возгонов цинка после конденсации в системе газоочистки	низкая	98, сырой оксид цинка (50–60% Zn)	Производство металлического цинка и поэтому независимость от первичных цинковых заводов; возможность извлечения свинца и серебра; удаление хлора и фтора до минимального уровня	Высокие инвестиционные затраты, высокая себестоимость цинка; низкая степень восстановления железа
Вельц-технология, компания Horsehead (США), Glencore (Италия) и «Акинта» (Япония)	Вельц-технология, комбинированная с выщелачиваем	низкая	Продукт — цинк металлический		

Таблица 18.12 (продолжение)

Процесс, компания	Суть технологического процесса	Степень металлзации железа, %, где используется продукт	Степень извлечения цинка, %	Преимущества	Недостатки
«Тиссен-Шталь», Германия	Прокалка окомкованной пыли доменного и сталеплавильного цехов в кипящем слое при температуре 1000 °С в восстановительной атмосфере, отделение продуктов возгонки от пыли в циклонах, улавливание возгонов после охлаждения и конденсации в рукавных фильтрах	до 97	80	Исключение стадии окислования пылевидных отходов, эффективный тепло- и массообмен, высокая энергоэффективность	Невысокая степень использования газа-восстановителя, повышенный расход тепла, нарушение стабильности кипящего слоя вследствие слипания частиц при стени металлзации свыше 25–30%
Компании KobeSteel и Midrex direct reduction corporation, процессы Fastmet и Fastmelt	Fastmet — восстановление электросталеплавильных пылей во вращающихся кольцевых печах при температуре 1300–1350 °С, Fastmelt — в электропечи	Fastmet — 75–94, Fastmelt — 98, электропечь	98–99, сырой оксид цинка (50–65% Zn)	Возможность извлечения железа, высокая производительность процесса (время восстановления — 8–10 мин.)	Высокие капитальные и эксплуатационные затраты, высокое энергопотребление, окупаемость при переработке не менее 200 тыс. т пылей, нестабильный состав железа прямого восстановления
Primus Process, компания Paul Wurth, Люксембург	Двухступенчатый процесс. Доменные и конвертерные шламы, замасленная прокатная окалина, пыль электросталеплавильного производства, восстановитель — уголь, загружаются в многоподовую печь, где происходит предварительное восстановление при температуре 1100 °С. Железо прямого восстановления пеллавуется в электродуговой печи в литейный чугуна	85–90, конечный продукт — чугуна для дуговой электропечи или литейного производства	Концентрат оксида цинка с содержанием цинка более 60%	Широкий спектр перерабатываемых металлургических отходов, получение высококачественного конечного продукта в виде литейного чугуна и концентрата оксида цинка, исключение стадии брикетирования отходов	Высокие капитальные затраты, высокое потребление энергоресурсов
Международная компания ZincOx Resources, основана в 1997 г.	Брикетирование пылевидных железосодержащих отходов и угольной мелочи со связующим, прокатка в кольцевой печи с вращающимся подом при температуре > 1250 °С, улавливание возгонов цинка в рукавных фильтрах после охлаждения и конденсации	85–90, содержание Fe <sub>мет</sub> в продукте — 61%	90, оксид и соли цинка	Высокая энергоэффективность благодаря непрерывному характеру процесса и дожиганию отходящих газов в печи	Высокие капитальные затраты

Технология Охусир, компания Kuttner, Германия	Брикетирующие смеси мелкодисперсных пылей и шламов и углеродистого восстановителя (кокс) на цементной связке, загрузка брикетов в шахтную печь, восстановление металлов при температуре 1000 °С, непрерывный процесс плавления брикетов в шахтной печи при температуре 1500 °С	85, процент — чугун с содержанием углерода около 4%	Улавливание возгон цинка в системе газоочистки (содержание цинка — более 30%)	Возможность переработки всех видов железосодержащих отходов, высокая производственная гибкость, экономичность и энергоэффективность вследствие повторного использования отходящих газов	Высокое потребление топлива, получение полупродукта цинка, который необходимо направлять на дальнейшую переработку в целях извлечения цинка
Процесс PIZO, компания Heritage, США	Непрерывный одностадийный процесс в индукционной печи	95	Содержание цинка в сыром оксиде 65–70%	Возможность параллельного восстановления других ценных элементов наряду с цинком	Высокое энергопотребление, низкий выход и низкое качество получаемого оксида цинка и железной фазы, относительно низкая производительность, взаимодействие с огнеупорной футеровкой
Плазменные технологии переработки цинксодержащей сталеплавильной пыли					
Технология ScanDust, Швеция	Перемешивание электросталеплавильной пыли с коксом и водой, инжектирование в нижнюю часть плазменного генератора, улавливание возгонов в газовом фильтре	Высокая, металл в металлургический цикл	Оксид цинка улавливают и восстанавливают в других процессах	Гибкость к изменениям параметров процесса, надежные и управляемые энергетические параметры, возможность исключения стадии окискования пыли	Высокие энергозатраты, жесткие требования к качеству сырья по химсоставу и крупности
Процесс ArcFume, Норвегия	Смешивание пыли с восстановителем (кокс, уголь, угольная пыль), подача в плазменную печь с восстановительной газовой атмосферой, улавливание частиц цинка в рукавном фильтре	Низкая, железо восстанавливается до FeO, который образует шлак	Оксид цинка улавливают и восстанавливают в других процессах		

Таблица 18.12 (окончание)

Процесс, компания	Суть технологического процесса	Степень металлзации железа, %, где используется продукт	Степень извлечения цинка, %	Преимущества	Недостатки
Компания Tetronics, Великобритания, компания «Минтек», США	Одностадийный процесс. Загрузка пылевидных отходов в плазменно-дуговые печи типа электростале-плавильной с центральным вращающимся наклонным плазмотроном (катодом) и ванной (анодом), плаз-мообразующий газ — аргон или азот. Восстановление при температуре 1500–1550 °С, разложение органи-ческих и неорганических соедине-ний при температуре 1500 °С (для большей части реактора) и около 10 000 °С (для ядра плазменной дуги)	Высокая, конеч- ный продукт — чугун	97–99, сы- рой оксид цинка	Исключение стадии окиско- вания пылевидных отходов, минимальное воздействие на окружающую среду, простота управления и обслуживания; относит- ельно низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы; универсальность технологии, возможность переработки широкого спектра отходов	Высокие энергозатраты
Процессы жидкофазного восстановления железа из отходов					
Процесс Finex, компании Voest Alpine, Австрия, Rosco, Южная Корея	Двухстадийный процесс. Предвари- тельное восстановление в шахтной печи (типа Мидрекс) отходящими газами из плавильного агрегата-га- зификатора, брикетирование пред- варительно восстановленного сырья и угля, газификация и расплавление восстановленного металлургического железа	85–90, получае- мый продукт — чугун	Возможно получение концентра- та цинка в уловлен- ной пыли в системе газо- очистки	Непрерывный процесс, возможность использова- ния некоксуемого угля, получение чугуна при большей экономичности по сравнению с доменным процессом	Сложность освоения промышленной технологии вследствие наличия двух отдельных ступеней и мно- гостадийности процесса, высокая капиталоемкость
Процесс «Ро- мелт», Россия	Одностадийный процесс. Непре- рывная загрузка отходов (шламы доменного и сталеплавильного про- изводств, колошниковая пыль, пыль электропечей, прокатная окалина) и восстановителя (уголь) сверху в шахтную печь с расплавом шлака, в которую через нижние фурмы вду- вается кислородно-воздушная смесь	80, получаемый продукт — чугун	Возможно получение концентра- та цинка в уловлен- ной пыли в системе газо- очистки	Непрерывный процесс, ис- пользование энергетических углей, простота в сравнении с двухстадийными процес- сами	Высокие капитальные затра- ты, сложность промышлен- ного освоения

### Вторичное сырье для металлургии на основе отходов других отраслей

На рис. 18.8 представлены сравнительные качественные показатели некоторых видов вторичного сырья на основе отходов, которое может эффективно заменить традиционно используемое первичное сырье в металлургии.

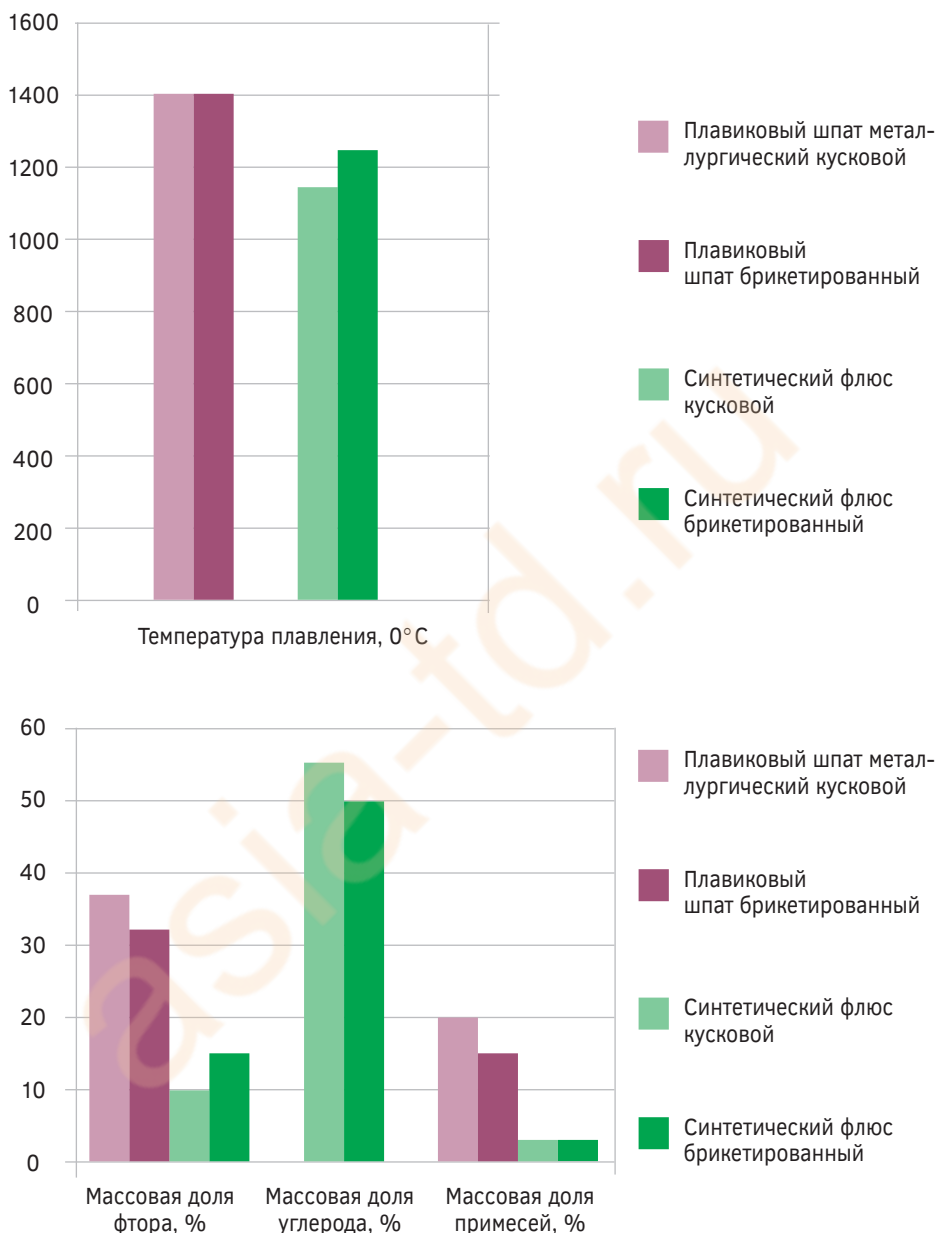


Рис. 18.8. Сравнительные качественные показатели синтетических легкоплавких флюсов на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства и плави́кового шпата

Синтетические флюсы имеют следующие преимущества по сравнению с существующими аналогами (кусовой и брикетированный плави́ковый шпат):

- более низкая температура плавления (на 150–250°С);
- низкое содержание фтора, являющегося токсичным;
- более высокая энергетическая ценность вследствие высокого содержания углерода;
- низкое содержание балластных компонентов;
- низкая стоимость.

На рис. 18.9 представлена сравнительная энергетическая эффективность используемых в металлургии традиционных видов топлива (кокс, уголь) и вторичных энергоресурсов (пластмассы, резина).

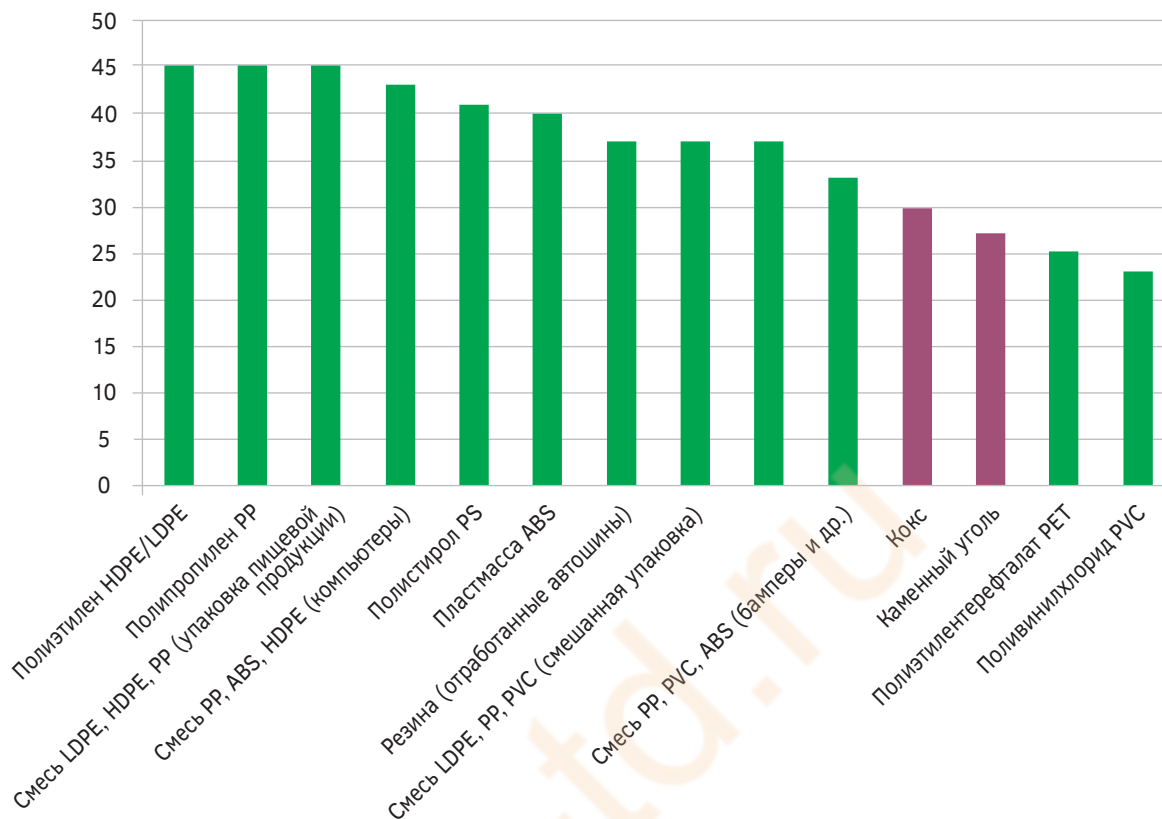


Рис. 18.9. Теплота сгорания вторичных энергоресурсов и традиционных видов топлива, МДж/кг

Представленные данные показывают, что теплота сгорания вторичных ресурсов очень высока и в ряде случаев существенно превышает теплоту сгорания таких традиционных видов топлива, как кокс и уголь.

### ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Как показывает мировой опыт, 97–100% металлургических отходов может быть вовлечено в переработку. Благодаря широкому спектру технологических процессов и оборудования, металлургические предприятия имеют возможность переработать также отходы целого ряда других отраслей.

Развитие переработки вторичных ресурсов в металлургии обуславливает переход к новому этапу развития экономики — циркулярной экономике, или экономике замкнутого цикла, набирающей популярность в мире благодаря создаваемым возможностям для сокращения потребления природных ресурсов, снижения негативного экологического воздействия и появления новых видов продукции.

Переход к циркулярной экономике стимулируется на государственном уровне. Например, стимулом для вовлечения в переработку железосодержащих отходов является высокая плата за их складирование в отвалах, которая в США и Канаде, например, составляет 85–90 долл./т,

т. е. около 6000 руб./т. В России плата за размещение таких отходов, как правило, относящихся к IV классу опасности, в 2018 г. составила 663 руб./т, т. е. примерно в 9 раз ниже. Поэтому перспектива развития технологий переработки вторичных ресурсов в значительной степени зависит от мер государственного регулирования и стимулирования этого направления.

Переработка и использование шлаков в настоящее время представляют собой самостоятельную подотрасль металлургического производства. Традиционно распространенная практически во всех странах переработка доменных шлаков развивается в направлении перехода на припечную грануляцию, увеличения объемов использования гранулированного шлака в цементной промышленности, а также производства высокопрочного литого щебня для строительства шоссежных дорог, по которым движется тяжелый транспорт, и аэродромов. В производстве гранулированного шлака наиболее перспективными и эффективными являются сухие способы грануляции с использованием воздушного охлаждения или агрегатов с шаровой насадкой.

Переработка сталеплавильных шлаков развивается в направлении комплексной переработки с максимальным извлечением металла в металлопродукт, получением щебня, известковых и фосфорных удобрений для сельского хозяйства. Наиболее перспективными в технологическом, экономическом, экологическом и эксплуатационном отношении представляются технические решения, направленные на получение широкого ассортимента товарной продукции непосредственно из жидких шлаков. Наиболее эффективным является производство литого щебня (из жидких, а не отвальных шлаков), используемого в строительстве железных и автомобильных дорог, в качестве сырья для производства цемента и бетона. Стабилизация содержащейся в сталеплавильных шлаках свободной извести обеспечивается обработкой водяным паром непосредственно после выпуска.

Развитие технологий переработки мелкодисперсных отходов металлургического производства (пыли, шламы, окалина) происходит в направлении получения продукции с более высокой добавленной стоимостью — частично восстановленного или металлизированного железосодержащего сырья, а также концентратов цветных металлов, главным образом цинка.

Развивающееся во второй половине XX в. направление брикетирования металлургических пылей и шламов, в том числе горячего, в последние годы вытесняется пирометаллургическими технологиями, обеспечивающими восстановление оксидов железа и цинка. Используемые высокотемпературные агрегаты весьма разнообразны: вращающиеся трубчатые печи, печи кипящего слоя, кольцевые печи с вращающимся подом, многоподовые печи, плазменные генераторы и плазменно-дуговые печи, шахтные плавильные печи. Широкому распространению той или иной технологии препятствуют главным образом высокие капитальные и эксплуатационные затраты, а также сложность промышленного освоения. Преимущество имеют одностадийные процессы над двухстадийными. Наиболее надежными в эксплуатации и управлении являются вращающиеся трубчатые печи, которые в случае прокалки отходов с восстановителем позволяют получить высокометаллизированный продукт (губчатое железо) и цинковый концентрат (оксид цинка). Для получения металлического цинка перспективной является вельц-технология, комбинированная с выщелачиванием. Перспективным направлением является использование плазменных технологий, что обусловлено простотой управления и обслуживания, относительно низкими капитальными эксплуатационными расходами, универсальностью и возможностью исключения стадии предварительного окускования пылевидных отходов. Процессы жидкофазного восстановления железосодержащих отходов широкого промышленного распространения не получили.

Общемировым процессом является развитие металлургии на базе вторичного сырья — вторичной металлургии. Экономический рост характеризуется не только степенью использования новых материалов, малоотходных технологий, но и долей вторичного сырья в общем балансе ресурсов, показателями его утилизации. В развитых странах вторичная металлургия производит около 40% общего объема металлов. При этом, помимо вовлечения в металлургический передел вторичного железосодержащего сырья, в мире получают развитие



металлургические технологии с использованием вторичного неметаллического сырья и вторичных энергоресурсов на основе различных отходов производства и потребления.

Возможности использования в металлургии отходов без какой-либо предварительной обработки очень ограничены. В настоящее время в мире, в том числе и в России, формируется и развивается новая самостоятельная отрасль промышленности — отходоперерабатывающая, задачей которой является реализация проектов по производству на основе отходов различных видов вторичного сырья и товарной продукции, удовлетворяющих требованиям потребителей. За рубежом инвесторами таких проектов нередко выступают крупные металлургические компании, предоставляющие собственные площади и производственные мощности специализированным отходоперерабатывающим предприятиям. Результатом такого сотрудничества является полная переработка всех видов образующихся металлургических отходов, обеспечение производства новыми видами вторичного сырья и топлива, внедрение инновационных технологий с их использованием, переход на экономику замкнутого цикла, что поддерживается на государственном уровне.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Алпатов, А. А.* Исследование процессов пылеобразования при дуговом нагреве металла и свойств пыли с целью ее утилизации : дисс. на соис. уч. степ. канд. тех. наук. — М. : НИТУ МИСИС, 2016.
2. *Антоненко, Л. К.* Проблемы переработки и захоронения отходов горно-металлургического производства / Л. К. Антоненко, В. Г. Зотеев // Горный журнал. — 1999. — № 2. — С. 70–72.
3. *Баркан, М. Ш.* Перспективы утилизации отходов горнометаллургических предприятий при добыче и переработке железорудного сырья / М. Ш. Баркан, Е. И. Кабанов // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения — 2017) : мат. Междунар. науч. конф., Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. — 452 с.
4. *Близнюков, А. С.* Новейшие достижения в переработке шлака / А. С. Близнюков // Новости черной металлургии за рубежом. — 2010. — № 4. — С. 83–88.
5. *Бобович, Б. Б.* Переработка отходов производства и потребления : справочное издание / Б. Б. Бобович, В. В. Девяткин ; под ред. Б. Б. Бобовича. — М. : Интернет инжиниринг, 2000. — 496 с.
6. *Волынкина, Е. П.* Синтетические легкоплавкие флюсы для черной металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевой промышленности / Е. П. Волынкина, Е. В. Протопопов, В. В. Макачук // XI междунар. конф. «Алюминий Сибири 2005» : сб. докл. — Красноярск, 2005. — С. 289–296.
7. *Волынкина, Е. П.* Технология утилизации отработанных автомобильных покрышек при производстве стали / Е. П. Волынкина, В. П. Долгополов, В. В. Соколов // Экологический вестник Западно-Сибирского металлургического комбината : тез. докл. заводской конф. — Новокузнецк, 2004. — С. 66–67.
8. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии / В. Г. Барышников, А. М. Горелов, Г. И. Папков : справ. — М. : Экономика, 1986. — Том 2. — 344 с.
9. *Гарабрина, Л. А.* Переработка сталеплавильных шлаков в ОАО «ММК» / Л. А. Гарабрина, Т. А. Курган, Н. С. Игнатъева. — М. : Металлург, 2000. — 101 с.
10. *Голов, С. В.* Переработка и использование техногенных отходов в ОАО «НТМК» / С. В. Голов, С. М. Ситников, Е. Г. Калимулинов // Сталь. — 2002. — № 5. — С. 96.
11. ГОСТ Р 55099–2012. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии обращения с отходами в цементной промышленности. Аспекты эффективного применения. — М. : Стандартинформ, 2013. — 18 с.
12. Государственные доклады об охране и о состоянии окружающей среды Российской Федерации // Минприроды России [официальный веб-сайт]. — URL: <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/list.php?part=1101>.
13. *Грановская, Н. В.* Техногенные месторождения полезных ископаемых / Н. В. Грановская, А. В. Навставкин, Ф. В. Мещанинов. — Ростов-н/Д. : ЮФУ, 2013. — 93 с.
14. *Данилов, Е. В.* Современная технология утилизации сталеплавильных шлаков / Е. В. Данилов // Металлург. — 2003. — № 6. — С. 38–39.
15. *Дембицкий, Ю. В.* Технология использования в аглошихте частично подготовленных шламов металлургического производства / Ю. В. Дембицкий, Н. Т. Демура, В. П. Падалка // Металл и литье Украины. — 1997. — № 6–7. — С. 9–13.
16. *Зайцев, А. К.* Экология и ресурсосбережение в черной металлургии / А. К. Зайцев, Ю. В. Похвиснев // Соросовский образовательный журнал. — 2001. — Т. 7. — № 3. — С. 52–58.
17. *Игошев, М. В.* Переработка сталеплавильных шлаков на комбинате «Северсталь» / М. В. Игошев, Е. И. Шакуров. — М. : Металлург, 2003. — 60 с.

18. Инженерная защита окружающей среды / под ред. Ю. А. Бирмана, Н. Г. Вурдовой. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2002. — 269 с.
19. Использование теплотехнического потенциала бытовых отходов в металлургии / Е. П. Волюнкина [и др.] // IV Межд. конгресс по управлению отходами ВЭЙСТТЭК : сб. докл. — М., 2005. — С. 278.
20. Использование углеродсодержащей отработанной футеровки электролизеров в шихте доменных печей / Е. П. Волюнкина [и др.] // Современная металлургия начала нового тысячелетия : сб. науч. тр. Всеросс. конф. — Липецк. — 2001. — Ч. 2. — С. 87–88.
21. ИТС 6–2015. Производство цемента / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2015. — 305 с.
22. ИТС 25–2017. Добыча и обогащение железных руд / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 247 с.
23. Казакова, Т. И. Направления снижения энергоемкости производства черных металлов / Т. И. Казакова, А. П. Кольцова // Сталь. — 2000. — № 2. — С. 79–81.
24. Кесселер, К. Шахтная печь: отсутствие отходов у компании Thyssenkrupp Stahl / К. Кесселер // Черные металлы. — 2005. — № 7–8. — С. 34–36.
25. Корж, А. Т. Организация подготовки железосодержащих отходов и использование их в производстве агломерата / А. Т. Корж, Ю. Г. Гердий // Металл и литье Украины. — 1996. — № 9–10. — С. 38–41.
26. Кудрин, В. А. Теория и технология производства стали / В. А. Кудрин. — М. : Мир, 2003. — 528 с.
27. Курунов, И. Ф. Брэксы — новый этап в окисковании сырья для доменных печей / И. Ф. Курунов, А. М. Бижанов // Металлург. — 2014. — № 3. — С. 49–53.
28. Леонтьев, Л. И. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды / Л. И. Леонтьев, В. Г. Дюбанов // Экология и промышленность. — 2011. — № 4. — С. 32–35.
29. Летимин, В. Н. Пыль и шлам газоочисток металлургических заводов и анализ путей их утилизации. Теория и технология металлургического производства / В. Н. Летимин, И. В. Макарова, М. С. Васильева, Т. М. Насыров. — 2015. — № 1 (16). — С. 82–86.
30. Лисин, В. С. Ресурсо-экологические проблемы XXI века и металлургия / В. С. Лисин, Ю. С. Юсфин. — М. : Высш. шк., 1998. — 447 с.
31. Майер, Г. Переработка пыли и шлама из газоочисток доменных и конвертерных цехов во вращающейся печи / Г. Майер, К.-Г. Фопель, В. Янссен // Черные металлы. — 1990. — № 5. — С. 3–7.
32. Металлургические методы переработки техногенного и вторичного сырья / Л. М. Симонян [и др.]. — М. : Изд-во НИТУ МИСИС, 2016. — 137 с.
33. Металлургические технологии переработки техногенных месторождений, промышленных и бытовых отходов : моногр. / С. Н. Кузнецов, Е. П. Волюнкина, Е. В. Протопопов, В. Н. Зоря. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. — 294 с.
34. Мустафин, С. К. Рециклинг отходов недропользования: проблемы и перспективы / С. К. Мустафин // Рециклинг отходов. — 2012. — № 2. — С. 2–7.
35. Набоко, Е. П. Пути утилизации отходов доменного производства / Е. П. Набоко // Актуальные вопросы современной науки. — 2013. — № 27. — С. 184–193.
36. Научно-технический прогресс в черной металлургии Японии : сб. статей. — М. : Наука, 1984. — URL: <http://nippon-history.ru/books/item/f00/s00/z0000004/index.shtml> (дата обращения: 24.10.2019).
37. Ниллс, Р. Новые тенденции в развитии металлургической технологии / Р. Ниллс // Черные металлы. — 2004. — № 10. — С. 19–25.
38. Нисидзава, С. Подход к защите окружающей среды в черной металлургии Японии / С. Нисидзава // Сталь. — 2003. — № 4. — С. 71–75.
39. Носков, В. А. Роль брикетирования в проблеме утилизации металлургических отходов / В. А. Носков // Теория и практика производства чугуна : тр. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию КГГМК «Криворожсталь», Кривой Рог, 24–27 мая, 2004. — Кривой Рог : Изд-во КГГМК «Криворожсталь», 2004. — С. 591–594.
40. Огородникова, Е. Н. Особенности распространения и состав техногенных грунтов — отходов черной металлургии / Е. Н. Огородникова, С. К. Николаева, И. Д. Черняева // Геоэкол. Инж. геология. Гидрогеол. Геокриол. — 2000. — № 1. — С. 53–58.
41. Опыт использования в шихте доменной печи брикетов из железацинкосодержащих шламов / И. Ф. Курунов [и др.] // Металлург. — 2003. — № 10. — С. 36–38.
42. Панфилов, М. И. Металлургический завод без шлаковых отвалов / М. И. Панфилов. — М. : Металлургия, 1978. — 248 с.
43. Переработка мелкозернистых отходов металлургического производства с получением гранулированного чугуна и извлечением цинка / Н. В. Панишев [и др.] // Вестник МГУ им. Г. И. Носова. — 2013. — № 4. — С. 26–29.
44. Переработка пластмассовых отходов в коксовых печах // Новости черной металлургии за рубежом. — 2003. — № 2. — С. 31–32.
45. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М. И. Панфилов, Я. Ш. Школьник, И. В. Орнинский. — М. : Металлургия, 1987. — 238 с.
46. Письмо Координационного центра по ценообразованию и сметному нормированию в строительстве от 12 января 2018 г. № КЦ/2018-01ти «Об индексах изменения сметной стоимости строительства по Федеральным округам

- и регионам Российской Федерации на январь 2018 года» // Гарант.ру : информационно-правовой портал. — URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/71869696/paragraph/1/doclist/0/selflink/0/highlightПисьмо%20Координационного%20центра%20по%20ценнообразованию%20и%20сметному%20нормированию%20в%20строительстве%20от%2012%20января%202018%20г./> (дата обращения: 24.10.2019).
47. Применение вельц-процесса для переработки цинксодержащих пылей АО «Северсталь» / И. Н. Белоглазов [и др.] // Сб. тр. 2-го межд. симп. «Проблемы комплексного использования руд», СПГГИ (ТУ), 19–24 мая 1996 г. — СПб., 1996. — С. 190.
  48. Проблемы экологии и утилизации техногенного сырья в металлургическом производстве / Ю. С. Карабасов [и др.]. — М. : Металлург, 2004. — С. 27–33.
  49. Производство и проплавка в доменной печи брикетов нового поколения / Й. К. Далмиа [и др.] // Металлург. — 2012. — № 3. — С. 39–41.
  50. Процесс Ромелт / под ред. В. А. Роменец. — М. : Руда и металлы, 2005. — 399 с.
  51. Симонян, Л. М. Оценка и пути достижения экологической чистоты металлургического производства / Л. М. Симонян, А. А. Хилько. — М. : Изд. дом МИСиС, 2014. — С. 29.
  52. Синтетические легкоплавкие флюсы для черной металлургии на основе фторуглеродистых отходов производства алюминия / Е. П. Волынкина [и др.] // Управление отходами — основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе : сб. докл. Первой межд. научно-практ. конф. — Новокузнецк, 2005. — С. 168–174.
  53. Сорокин, Ю. В. Переработка и использование техногенных отходов на предприятиях горно-металлургической отрасли / Ю. В. Сорокин, Л. А. Смирнов, Л. А. Шубина // Сталь. — 2005. — № 6. — С. 148–150.
  54. Сорокина, М. К. Анализ конкурентоспособности продукции черной металлургии в ценах мирового рынка / М. К. Сорокина // Бюллетень «Черная металлургия». — 2005. — № 7. — С. 51–53.
  55. Технология производства чугуна с применением металлизированных брикетов / Л. П. Брусов [и др.] // Металл и литье Украины. — 2004. — № 4. — С. 213–216.
  56. Утилизация отработанных автомобильных покрышек / Е. П. Волынкина [и др.] // Экология и промышленность России. — 1999. — № 3. — С. 16–19.
  57. Утилизация пылей и шламов в черной металлургии / А. И. Толочко [и др.]. — М. : Металлургия, 1990. — 143 с.
  58. Филипп, Т. Первый опыт работы по принципам устойчивого развития / Т. Филипп // Черные металлы. — 2001. — № 8. — С. 90–92.
  59. Филипп, Ю. А. Современное состояние и развитие охраны окружающей среды черной металлургии / Ю. А. Филипп // Черные металлы. — 2000. — № 4. — С. 26–35.
  60. Флайшандерл, А. ZEWA — новый процесс утилизации металлургических отходов / А. Флайшандерл, У. Геннари, А. Ллис // Сталь. — 2004. — № 12. — С. 118–123.
  61. Флейшандерл, А. Обращение отходов в прибыль / А. Флейшандерл, Дж. Песл, Ф. Соерт // Новости черной металлургии за рубежом. — 2002. — № 2. — С. 3–6.
  62. Черепанов, К. А. Утилизация вторичных материальных ресурсов в металлургии / К. А. Черепанов, Г. И. Черныш, В. М. Динельт. — М. : Металлургия, 1994. — 224 с.
  63. Черноусов, П. И. Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии : монография / П. И. Черноусов. — М. : Изд. Дом МИСиС, 2011. — 428 с.
  64. Шульц, Л. А. Энерго-экологические проблемы современного металлургического комбината / Л. А. Шульц // Изв. вузов. Чер. металлургия. — 2002. — № 11. — С. 65–70.
  65. Экстракция черных металлов из техногенного сырья / В. П. Чернобровин [и др.] // Челябинск : Изд. Центр ЮУрГУ, 2013. — 173 с.
  66. Юсфин, Ю. С. Промышленность и окружающая среда / Ю. С. Юсфин, Л. И. Леонтьев, П. И. Черноусов. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2002. — 469 с.
  67. Юсфин, Ю. С. Техногенные отходы и рециклинг / Ю. С. Юсфин // Рынок вторичных металлов. — 2002. — № 3. — С. 34–35.
  68. AMCOM L. L. C. [Официальный сайт]. — URL: <http://www.amcom-usa.com/ru/> (дата обращения: 24.10.2019).
  69. ArcelorMittal [official website]. — URL: <https://corporate.arcelormittal.com/> (accessed: 24.10.2019).
  70. Dust Recycling Ststem by the Rotary Hearth Furnace / H. Oda, T. Ibaraki, Y. Abe // Nippon Steel Technical Report. — 2006. — № 94. — P. 47–152.
  71. Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. May 2010 / European Commission.
  72. Nanaka, M. Управление промышленными отходами в Японии. Современное состояние и проблемы / M. Nanaka, T. Ikeguchi // Koshu eisei kenkyu. Bull. Inst. Publick Health. — 1997. — Т. 46, № 4. — С. 302–309.
  73. Optimization of Integrated Steel Plant Recycling: Fine-Grain Remains and By-Products Synergy / M. Garvilovski, Z. Kamberovic, M. Filipovic, N. Majinski // Strojarstvo. — 2011. — № 53 (5). — P. 359–365.
  74. Sehiselo, Ndlow. Waste Production and Utilization in the Metal Eaxtraction Industry / Sehiselo Ndlow, G. S. Simate, E. Matinde. — CRC Press, 2017. — 512 p.