

УДК 669.168

П.А. Кравченко, С.М. Балашов, О.Н. Сезоненко, А.Н. Приступа

## ВЫПУСК ФЕРРОСИЛИЦИЯ ИЗ ПЕЧИ С РАЗЛИВКОЙ В ПОЛОСТИ ИЗ ОТСЕВОВ ДРОБЛЕНИЯ

*Аннотация:* Процесс перехода на выпуск и разливку ферросилиция без применения ковша и мульт, путем выпуска расплава из печи через желоб, копильник и формирование слитков в полостях из отсевов ферросилиция. Влияние технологии выпуска с разливкой металла на качество ферросилиция и показатели производства.

*Ключевые слова:* ферросилиций, выпуск металла, разливка металла, печь, кремний, ликвация, отсевы ферросплавов, ковш, мульты.

*Анотація:* Процес переходу на випуск і розливання феросиліцію без застосування ковша і мульт, шляхом випуску розплаву з печі через жолоб, копильник і формування злитків в порожнинах з відсіви феросиліцію. Вплив технології випуску з розливанням металу на якість феросиліцію і показники виробництва.

*Ключові слова:* феросиліцій, випуск металу, розливання металу, піч, кремній, ліквация, відсіви феросплавів, ковш, виливниці.

*Abstract:* The process of transition to the production and casting of ferrosilicon without bucket and troughs, through the issuance of the melt from the furnace through a chute, forehearth and the formation of bars in the cavities of the screenings of ferrosilicon. Influence release technology with metal casting quality and ferrosilicon production figures.

*Keywords:* ferrosilicon, metal production, metal casting, furnace, silicon, segregation, screenings ferroalloys, bucket, trough.

Процесс производства ферросилиция наиболее энергоемкий, в сравнении с производством других массовых марок ферросплавов. В условиях постоянного роста цен на используемые при производстве ферросплавов ресурсы, необходим постоянный поиск решений, направленных на снижение расходов сырья и электроэнергии, а также материалов на обеспечение технологии. Эффективность и реализация ресурсосберегающих решений, является важным фактором обеспечения рентабельности в конкурентной борьбе на рынке ферросплавов, снижает зависимость от политики цен, усиливает позиции надежного партнера и поставщика качественной продукции.

В последнее время, в условиях роста спроса рынка на высококремнистые марки ферросилиция, на ПАО «ЗФЗ» увеличены мощности его производства, однако, с ростом спроса, изменяются и предъявляемые требования к его качеству (рис.1).

Одним из факторов ситуации на рынке ферросплавов, является снижение потребности кускового ферросилиция и увеличение спроса на фракционированный металл, в том числе и фракцию размером 10-50мм. При фракционировании металла образуется невостребованная мелкая фракция – отсевы, которые необходимо в дальнейшем переработать. На сегодня важными задачами по эффективности предпродажной подготовки металла, являются снижение образования отсевов и переработка отсевов дробления с наименьшими потерями и затратами.

В части снижения образования отсевов дробления ферросилиция с учетом факторов, влияющих на образование мелочи, актуальна публикация обобщенных материалов теоретических и экспериментальных исследований, а также промышленного опыта разливки кремнистых ферросплавов, выплавленных в электропечах. Данная публикация касается тематик механизации разливки и фракционирования кремнистых ферросплавов [1].

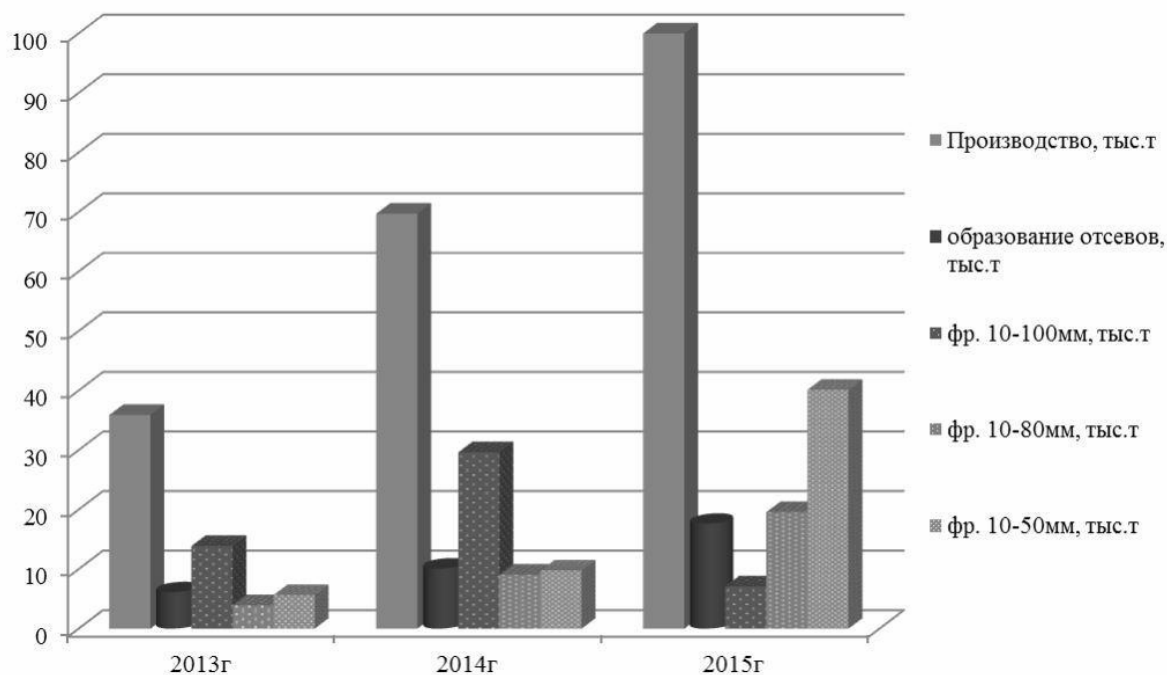


Рисунок 1 – Динамика производства ферросилиция на ПАО «ЗФЗ»

Дополнительно, с увеличением объемов производства ферросилиция, происходит накопление вторичного сырья металлосодержащего (ВСМ), эффективными способами и в полном объеме, на сегодня переработать крайне затруднительно.

С целью определения перспективы и реализации энергоэффективных и рациональных методов в технологических цепочках производства, в 2015 году на ПАО «ЗФЗ» реализован комплексный проект по переводу печи цеха №3 на выплавку ферросилиция. Первоначальные цели перевода – переработка отходов производства ферросилиция альтернативным способом и увеличение производства ферросилиция. На печи №27 выполнен ремонт с модернизацией основных узлов и механизмов. Базовая конструкция печи цеха №3 РКО-7, была предусмотрена под выплавку марганцевых сплавов периодическим процессом. Модернизация печи выполнена с учетом основных требований базовой технологии выплавки ферросилиция и включала:

- замену футеровки печи №27 с периклазовой на угольную;
- усиление и увеличение высоты металлоконструкций кожуха печи;
- переоборудование металлоконструкций механизмов загрузки;
- изменение распада электродов с 1250мм до 1450мм и переоборудование механизма перепуска;
- переключение короткой сети печного трансформатора на двойной треугольник;
- монтаж устройства электропрожига летки.

Принципиально новым и перспективным направлением модернизации, явилось изменение системы выпуска сплава из печи с разливкой металла, что включило (рис.2):

- установку выпускного желоба, копильника и горновой телеги под емкость для формирования полостей из отсеков с переоборудованием горнового мостика и увеличением его ширины.

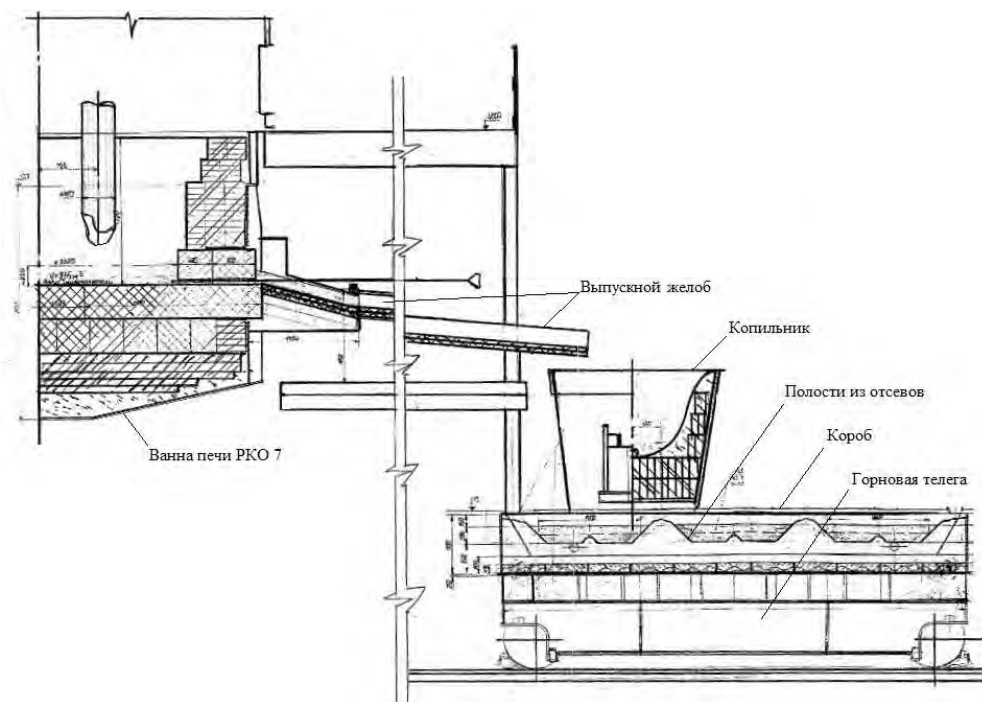


Рисунок 2 – Схема системы выпуска сплава из печи с разливкой металла

Основные цели работ по изменению системы выпуска и разливки:

- снижение затрат на использование сменного оборудования (ковши и материалов для их футеровки, мульды или изложницы). На предприятии имеется опыт внедрения разливки ферросиликомарганца в отсевы в условиях цеха №1, где с конца 2011г и по настоящее время, снижение затрат составляет более 33млн. грн.;
- снижение времени на операции, выполняемые с помощью крана в разливочном пролете;
- снижение отходов производства или оборотных материалов;

Цель на перспективу:

- вовлечение отсевов фракционирования в эффективную переработку.

Основные параметры ванны печи после модернизации:

Печь рудовосстановительная, круглая, открытая, с мощностью трансформатора 7МВА

- диаметр кожуха ванны печи – 5040мм (без изменений);
- высота кожуха ванны печи – 3360мм (в том числе 610мм увеличение высоты);
- рабочая часть футеровки состоит из 2х рядов угольных блоков подины, общей высотой – 800мм и 1ряд обстановочных блоков высотой 400мм, а также 2 леточных блока (один блок на резервной летке);
- кладка стен выполнена из электродинасового кирпича марки ЭД-1-2 высотой кладки 1365мм;
- внутренняя глубина ванны печи по футеровке – 1765мм;
- внутренний диаметр ванны печи по футеровке (обстановочных блоков) – 3320мм.

Диаметр распада электродов 1450мм.

Описание новых элементов выпуска и разливки металла из печи:

Выпускной лоток печи переходит в выпускной желоб 6м длиной, который футеруются графитовыми плитами 50x250x1000мм

Под желобом установлен стационарный копильник, футерованный шамотным кирпичом, с первоначальным внутренним объемом 0,5м<sup>3</sup>, имеет выпускное отверстие по подовой части футеровки копильника и переходной лоток.

На горновой телеге установлен сварной короб из листовой стали, для формирования в нем полостей из отсевов фр.0-10мм дробления ферросилиция выпускаемой марки.

Операции, выполняемые по выпуску и разливке ферросилиция на печи №27:

Подготовка к выпуску (рис. 3а):

- Перед очередным выпуском, производится досыпка отсевов в полости 100-200кг/плавку и поправка для формирования слитка. Полости формируются из расчета 1х1,5м, глубиной не более 250мм, на 3 полости в канаве. Для уменьшения ликвации при выпуске-разливке металла в полости, производилось формирование полостей на одном уровне, между полостями выполняются переходные канавки для перетекания в последующую полость жидкого металла, в зависимости от его температуры и жидкоподвижности.

- Очистка копильника с образованием ВСМ 80-100кг/плавку, заправка песком и утепление коксовой мелочью;

- Очистка выпускного желоба с образованием 30-50кг ВСМ/плавку. Утепление и формированием канавки постелью на желобе, из отсевов электродной массы и коксовой мелочи.

- При съеме на плавку в пределах 7,5-10тыс.кВтч, и в соответствии с графиком 9-10 плавов в сутки, производится разделка летки стальным прутком диаметром 25мм с диэлектрической насадкой с использованием электропрожиг. Съем тока производится с графитового квадрата 100х100х1000мм, расположенного на уровне летки. Подвод тока к электропрожигу осуществляется от шины короткой сети.

Для открытия летки используется 2-4 стальных прута, продолжительность 15-20 мин.

Выпуск и разливка металла (рис. 3б):

- Через леточное отверстие диаметром до 120 мм - выход расплава. Температура металла на выходе из печи находилась в пределах 1500-1850°C;

- Через желоб, футерованный графитовыми плитам, расплав перетекал в копильник с рабочим объемом ~1м<sup>3</sup>, где по мере наполнения, утепляли коксовой мелочью;

- По мере наполнения 1/2 объема копильника, прощуровывали заранее перекрытое выпускное отверстие, далее выпуска производили через открытое отверстие, откуда металл без наличия шлака перетекал в полости из отсевов;

- По мере наполнения полостей из отсевов на уровень 100-150мм, производили перемещение телеги на следующую полость.



(а)



(б)

Рисунок 3 – Подготовка к выпуску (а) и выпуск ферросилиция (б)

Продолжительность выпуска при нормально работающей печи 20-30 минут.

Работа с металлом:

- Кристаллизация и остывание слитков в полостях на протяжении 60-90 мин после закрытия летки, во время этого, температура на поверхности слитков снижалась до уровня 450-650°C, далее клещами производили извлечение слитков в короб (рис. 4);

- В коробах по мере остывания, металл по возможности очищали от неусвоенных, налипших отсевов, с дальнейшим их использованием в формировании полостей, а также производили разбивку слитков для обеспечения фракции не более 300мм;

- После остывания металла, производили его отправку в СГП цеха №4 для дальнейшей подготовки к отгрузке.



Рисунок 4 – Извлечение слитков

В условиях формирования слитка в полостях, сформированных из отсевов, наблюдается изменение структуры строения слитка в сравнении со стандартными условиями формирования слитка в мультях разливочной машины.

Первой особенностью ферросилиция, есть относительно низкие температуры ликвидуса  $t_L$  солидуса  $t_S$  и что особенно важно обозначать, большие температурные интервалы  $\Delta t = t_L - t_S$ , что обуславливает определенные трудности обеспечения равномерного химического состава ферросилиция различных марок при разливке. Вторая особенность печных расплавов ферросилиция в том, что температура восстановительных реакций в ванне рудотермической печи (1650-1750°C), которые приводят к получению железокремнистых сплавов, намного превышают температуру ликвидус ферросилиция на выпуске из печи и тем выше, чем выше содержание кремния в сплаве.

Третью особенность сплавов системы Fe-Si в жидком состоянии относят, главным образом, к высококремнистым маркам ФС65, ФС70, ФС75 и далее, и состоит в том, что вследствие склонности кремния к ликвации при кристаллизации расплавов, может иметь сильное развитие явления ликвации, что сопровождается разным содержанием кремния по высоте слитка. По тем же причинам примеси в виде элементов Ca, Al, P, и As также сильно ликвируют, что приводит к самовольному рассыпанию отдельных районов слитка или полному рассыпанию их до порошкообразного состояния [1].

Температурный интервал двухфазного состояния сплава с 68% Si составляет ~53°C, с 74 % Si ~113°C. Наличие примесей в промышленном ферросилиции, влияет на температуры ликвидуса и солидуса а значит и процессы ликвации макро- и микроструктуры слитков ферросилиция. Однако следует отметить, что

химический состав металла печи №27 принципиально не имел отличий от состава металла полученного в цехе №4, а значит, влияние примесей в сравнении способов разлива минимизируем.

Визуально наблюдается отличие в структуре слитка ферросилиция разлитого в мульды, который имеет однородное кристаллическое строение и плотную структуру, что свидетельствует об отсутствии явной ликвации. Излом слитка разлитого в полости из отсеков ферросилиция, в период отработки технологии, имеет явно-выраженную неоднородную структуру по высоте слитка, что характеризуется изменением содержания кремния по высоте  $\Delta[\text{Si}]=1\%$  абс., а также имеет низкую плотность и повышенную пористость.

Отличительным фактором, повлиявшим на более выраженную ликвацию внутри слитка, является:

- трудности обеспечить оптимальную высоту слитка не более 90-100мм, где структура слитка получалась плотная и равнострунная, при извлечении таких слитков с помощью специальных захватов, увеличиваются риски их неконтролируемого разлома. Фактическая высота слитков в некоторых случаях составляла 100-200мм, высота меняется по местам падения струи и интенсивности потоков жидкого металла во время выпуска-разливки.

- полость для разлива сформирована из отсеков, которые по низкой удельной плотности создают термически изолирующий слой. Наблюдались случаи извлечения слитков, с температурой на поверхности 450-650°C и наличием вытекающей жидкой фазы внизу слитка, по температуре солидуса, промышленного ферросилиция марки ФС65, она составляет 1176°C, т.е. разница температур (интервал) в теле слитка, через 60-90мин после разлива, составляет более 526°C.

Основные факторы, влияющие на структуру слитка в зависимости от способа выпуска и разлива ферросилиция:

При разливе с ковша в мульды на разливочной машине:

- ликвация в жидком ферросилиции, находящемся в ковше, степень которой зависит от содержания кремния в металле и продолжительности времени выпуска, транспортировки и разлива металла. Как обобщающая характеристика, которая учитывает влияние веса плавки  $P$  и продолжительности нахождения ферросилиция в ковше  $\tau$  авторы [2] приняли производную  $P \cdot \tau$ , и нашли, что  $\Delta[\text{Si}]$  есть функция производной двух переменных  $P \cdot \tau$  и эта связь описана уравнением (рис. 5)

$$\Delta[\text{Si}] = 0,0064 P \cdot \tau - 1,4. \quad (1)$$

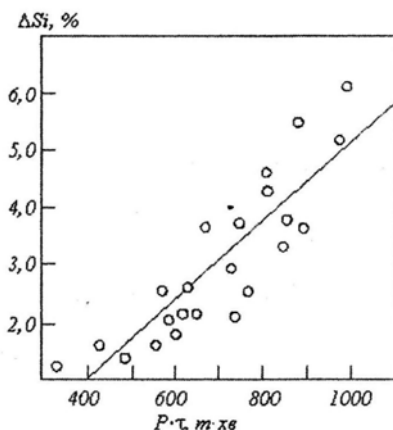


Рисунок 5 – Зависимость ликвации кремния от производной веса плавки на продолжительность выдержки металла в жидком виде

С учетом выполнения цехом №4 мероприятий, ликвация при разливе металла на разливочных машинах, не допускается:

- использование антипригарного раствора известкового «молока» на поверхности мульд, слой покрытия достигает до 1мм. Взаимодействие жидкого ферросилиция с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  сопровождается повышенным содержанием водорода в сплаве и частично загрязняет ферросилиций дополнительной примесью. Известковый слой также остается на поверхности слитка, после дробления ферросилиция, в большей степени концентрируется в отсевах. Повторная переработка отсевов ферросилиция внепечным способом, влечет за собой поступление в жидкий металл известковых включений, которые выделяется на границах зерен, а также с ними вносится водород, что ухудшает строение слитка.

При выпуске-разливке ферросилиция в полости из отсевов:

- так как отсутствует задержка жидкого металла в неподвижном состоянии, отсутствует возможность его ликвации до начала формирования слитка;

- с момента формирования слитка весом 0,4-0,6т в полостях из отсевов, происходит ликвация, общее количество выбранного металла с отклонением содержания кремния мене 63% и более 68% не соответствующего ДСТУ 4127:2002 составила 3,5%, металл который в дальнейшем направлен на переплав;

- в альтернативе 100% перехода на разливку ферросилиция в отсевы, поступления известковых включений в металл исключаются, что понизит негативное влияние на ликвацию металла.

#### Выводы

С сентября по ноябрь 2015 года, на печи №27 произведена отработка технологии выплавки ферросилиция по базовой технологии, получен металл марки ФС 45 в объеме 401т и ФС 65 – 254т. Реализованные мероприятия, позволили на сегодня достигнуть следующих показателей эффективности:

1. Снизить затраты на использование сменного оборудования.

По базовой технологии цеха №4, стойкость ковша 1,5сут с наливной футеровкой, позволяет пропустить через него в среднем 84т ферросилиция. Эксплуатационная стойкость 1 мульды, по разливке в нее металла, в среднем – 61т ферросилиция.

По технологии с выпуском и разливкой металла в отсевы, стойкость футерованного копильника 1месяц, позволила пропустить через него в среднем 328тонн ферросилиция. Также были использованы графитовые плиты размером 50x250x1000мм для футеровки переходного желоба с расходом 18шт на 655тонн ферросилиция.

Снижение затрат за счет данного фактора составляет до 130грн. с НДС на тонну продукции.

2. Снижение операций выполняемых с помощью крана в разливочном пролете.

По базовой технологии: снятие ковша с горновой телеги и транспортировка на РМ; далее снятие ковша с РМ, транспортировка и чистка ковша от шлако-металлической смеси и замена или установка ковша на горновую телегу – в общем, занимает 25-35мин на 1 выпуск.

По технологии с выпуском и разливкой металла в отсевы: с помощью крана производится досыпка отсевов в полости и извлечение слитков из полостей занимает 15-25мин на 1 выпуск.

3. Снижение образования шлако-металлической смеси (в дальнейшем вторичное сырье металлосодержащее – ВСМ) на 120кг/1т ФС65, при том, что обеспечена чистота слитков от неметаллических включений за счет полного отделения металла от шлака в копильнике.

Образование ВСМ при производстве ФС65 в цехе №4 составляет в среднем 265кг/т, в том числе:

- чистка ковша 124кг/т или 47%;
- ковшевые остатки 141кг/т или 53%.

Образование ВСМ при производстве ФС65 на печи №27 составляет 145 кг/т, в том числе:

- с желоба 45кг/т или 30%;
- с копильника 100кг/т или 70%.

Таким образом, уменьшение образования шлако-металлической смеси на 120кг/1тФС65 сопоставимо с объемом материала образующегося из ковшевых остатков при применении ковша, позволяет уменьшить фактор их накопления и необходимость вторичной переработки, а также снижение затрат за счет дополнительного образования готовой продукции без повторной переработки.

Учитывая ограниченные возможности переработки вторичного сырья ферросилиция на собственной технологии – не более 55кг/т ФС 65, эффект от снижения образования ВСМ достигается за счет уменьшения затрат на их вторичную переработку. На предприятии, по опыту вторичной переработки оборотных материалов в печах ОСС цеха №1, установлено, что для увеличенной переработки ВСМ65 из расчета 1 кг/т металла, необходимо дополнительно затратить электроэнергии 1,23 кВтч/1т металла, полученного с увеличенным использованием в шихте ВСМ65. Таким образом, снижение образования ВСМ, позволяет уменьшить их накопление и дополнительные затрат на вторичную переработку.

4. Вовлечение отсевов фракционирования в эффективную переработку. Наименьшие потери при переработке отсевов фракционирования ферросплавов, установлены при использовании их в разливке металла, составляют в пределах 3%, также не затрачивается электроэнергия.

Таблица 1

Баланс производства с использованием отсевов

Способ разливки	Выпущено металла	Использовано отсевов	Получено ФС65	Использовано отсевов	Доля полученного металла из отсевов
	баз.т	баз.т	баз.т	баз.кг/баз.т	%
Выпуск в отсевы (печь №27)	219,5	35,79	254,22	140,8	14,1
Разливка в мульты (цех №4)	4201,2	80,80	4279,55	18,9	1,9

Использовано 36тонн отсевов для выпуска, и разливки в них 220т ФС65, доля полученного металла из усвоенных отсевов, в готовой продукции составила



14,1%, при том, что подсыпка отсеков во время машинной разливки в мульды, ограничена до 2%.

Таблица 2

**Баланс производства с использованием отсеков**

Способ разливки	Дробление на фракцию	Взято на дробление	Получено фракции	Получено отсеков	Доля образования отсеков
	мм	баз.т	баз.т	баз.т	%
Выпуск в отсеки (печь №27)	10-80	11,8	9,5	2,4	19,9
	10-50	173,2	123,8	49,4	28,5
Разливка в мульды (цех №4)	10-80	243,2	201,5	41,7	17,1
	10-50	2348,6	1775,6	573,0	24,4

Образование отсеков во время дробления данного материала на фракцию 10-50мм составило 28,5%, что выше на 4,1%, образования отсеков при дроблении металла разлитого в мульды на разливочной машине.

Таблица 3

**Усвоение отсеков используемых на печи №27 при выпуске-разливке в отсеки, в сравнении с разливкой в мульды**

Способ разливки	дробление на фракцию	Дополнительно получено металла из отсеков	Увеличение образования отсеков	Усвоение отсеков в товарную продукцию
	мм	%	%	%, абс
Выпуск в отсеки (печь №27)	10-80	12,2	2,7	9,5
	10-50		4,1	8,1

Учитывая объем используемых отсеков при выпуске-разливке металла в отсеки, коэффициент их усвоение в товарную продукцию составляет 8,1%. Объем выборки ликвации разлитого металла 3,5% от общего производства, которая была более характерна на начальных этапах отработки технологии, коэффициент усвояемости составит 4,6%.

Реализованные мероприятия при проведении опытно-промышленной кампании, по выпуску-разливке ферросилиция, позволили получить металл требуемого химического состава, не загрязненный шлаковыми включениями. Поставленные цели в большей степени достигнуты, что определяют эффективность данного направления и необходимость его развития. Одной из дальнейших задач, будет проработка мероприятий по обеспечению плотности и уменьшению ликвации внутри слитка, реализация которых поставит приоритет данной технологии разливки.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Зубов В.Л., Гасик М.. Механізована розливка і фракціонування кремністих феросплавів, технологія і обладнання: навч. посіб.– Дніпропетровськ : Національна металургійна академія України , 2011.– 143 с.
2. Мухин Ю.И., Парфенов А.А. Методика определения ликвации кремния в жидком 65%-ном ферросилиции //Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ. 1979, №21(831), -С.42-43
3. Щедровицкий Я.С. Высоккремнистые ферросплавы. Свердловск: Металлургиздат, 1961. 256 с.