

№ 1262

**МИСиС**

---

Л.М. Симонян

А.Е. Семин

А.И. Кочетов

# **Металлургия спецсталей**

Теория и технология  
спецеэлектрометаллургии

Курс лекций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 1262

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ СТАЛИ и СПЛАВОВ**  
Технологический университет



Кафедра металлургии стали и ферросплавов

Л.М. Симонян

А.Е. Семин

А.И. Кочетов

# **Металлургия спецсталей**

Теория и технология  
специальной металлургии

Курс лекций

Допущено учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по направлению Металлургия

УДК 669.187.5  
С37

Рецензент  
канд. техн. наук *А.Г. Глебов*

Авторы: А.Е. Семин – пп. 1.1, 2.1 и 2.3; А.И. Кочетов – пп. 2.2 и 2.5;  
Л.М. Симонян – введение, пп. 1.2, 1.3 и 2.4

**Симонян Л.М., Семин А.Е., Кочетов А.И.**

С37      **Металлургия спецсталей. Теория и технология спецэлектрометаллургии: Курс лекций.** – М.: МИСиС, 2007. – 180 с.

Освещены вопросы, связанные с производством высококачественных сталей методами спецэлектрометаллургии (ВИП, ВДП, ЭШП, ПП, ПДП и ЭЛП). Приведены принципиальные схемы печей и технологии ведения процессов выплавки и переплава, основные показатели работы печей, их сравнительная характеристика. Даны основные способы воздействия источников нагрева и используемых сред на процессы рафинирования металлов. Приводятся основные теоретические положения воздействия вакуума и плазмы на процессы рафинирования и легирования сталей, рассматриваются основные стадии переплава заготовки в кристаллизатор и возможные дефекты выплаваемых слитков.

Предназначен для студентов специальности 150101 «Металлургия черных металлов», направления 550500 «Металлургия» в рамках курса «Металлургия спецсталей» и дисциплин по выбору.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
1. Способы рафинирования металлов в специальной электрометаллургии .....	18
1.1. Использование вакуума для рафинирования стали.....	18
1.1.1. Механизм удаления азота и водорода .....	18
1.1.2. Термодинамика обезуглероживания и раскисления в вакууме .....	20
1.1.3. Удаление неметаллических включений .....	22
1.1.4. Испарение элементов из металлического расплава .....	25
1.2. Особенности воздействия плазмы на металл.....	26
1.2.1. Характеристика низкотемпературной плазмы .....	26
1.2.2. Процессы формирования электрической дуги .....	30
1.2.3. Особенности растворения газов в металлах при плазменном нагреве .....	43
1.2.4. Физико-химические процессы в пограничной зоне плазма–металл .....	47
1.2.5. Процессы в пограничной области с участием азота .....	49
1.2.6. Оценка избыточной энергии частиц газовой фазы .....	60
1.3. Рафинирование металлов в переплавных процессах .....	63
1.3.1. Особенности вторичного переплава .....	63
1.3.2. Стадии переплава и поверхности реагирования .....	64
1.3.3. Приведенная поверхность реагирования на различных стадиях переплава .....	72
1.3.4. Температура металла на различных стадиях переплава.....	76
2. Выплавка и переплав металлов методами спецэлектрометаллургии.....	80
2.1. Вакуумная индукционная плавка.....	80
2.1.1. Общая характеристика ВИП .....	80
2.1.2. Классификация вакуумных индукционных печей .....	84
2.1.3. Конструкция установок полунепрерывного действия.....	86
2.1.4. Технология плавки .....	91
2.2. Вакуумный дуговой переплав .....	96
2.2.1. Общая характеристика ВДП.....	96
2.2.2. Конструктивно-технологические особенности печи ВДП .....	98
2.2.3. Технология вакуумного дугового переплава.....	109

2.2.4. Особенности протекания металлургических процессов при ВДП .....	111
2.2.5. Возможные пути повышения технико-экономических показателей ВДП .....	123
2.3. Электрошлаковый переплав .....	124
2.3.1. Общая характеристика ЭШП .....	124
2.3.2. Конструкция установок ЭШП .....	127
2.3.3. Технология переплава .....	129
2.3.4. Физико-химические процессы между металлом и шлаком .....	132
2.3.5. Типичные дефекты слитка .....	135
2.3.6. Основные направления дальнейшего развития процесса ЭШП .....	136
2.4. Плазменно-дуговой нагрев .....	137
2.4.1. Общая характеристика плазменно-дугового нагрева .....	137
2.4.2. Особенности работы металлургических плазматронов .....	139
2.4.3. Плазменная плавка стали в печи с керамическим тиглем .....	151
2.4.4. Плазменно-дуговой переплав в кристаллизатор .....	157
2.4.5. Индукционно-плазменная печь .....	164
2.5. Электронно-лучевая плавка .....	166
2.5.1. Общая характеристика ЭЛП .....	166
2.5.2. Формирование электронного пучка .....	167
2.5.3. Конструкция установок ЭЛП .....	171
2.5.4. Технология ЭЛП .....	175
Библиографический список .....	179

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всей истории металлургии стоит задача улучшения качества металла и прежде всего получения металла, не содержащего вредных примесей (серы, фосфора, газов, примесей цветных металлов, неметаллических включений и т.п.) и с необходимой структурой.

Развитие таких отраслей техники, как авиакосмическая, атомная, энергетическая и ряда других, во многом определяется состоянием и техническим уровнем производства легированных сталей и сплавов, способных работать в самых разнообразных условиях. Современная техника нуждается в материалах, надежно работающих как при температуре, близкой к абсолютному нулю, так и температуре в несколько тысяч градусов, при знакопеременных и вибрационных нагрузках, под воздействием радиоактивных излучений, в агрессивных средах, в условиях глубокого вакуума и резких перепадов температуры.

Решение этих задач потребовало, во-первых, конкретного улучшения качества производимых сталей и сплавов и, во-вторых, создания новых материалов.

Традиционными методами выплавки и разливки в ряде случаев нельзя получить металл требуемого качества. Взаимодействие жидкой стали в процессе выплавки и разливки с огнеупорными материалами, шлаком и атмосферой неизбежно приводит к значительному загрязнению металла неметаллическими включениями и газами. Затвердевание металла в чугунных изложницах сопровождается дефектами кристаллизационного (усадочные раковины, пористость, трещины и т.д.) и ликвационного происхождения.

Для повышения чистоты металлов и улучшения их физико-химических свойств металлурги используют различные виды воздействия на металл. Эти виды воздействия можно условно разделить на четыре группы:

- 1) применение шлаков или газов в качестве рафинирующих реагентов для проведения реакций дефосфорации и десульфурации, экстрактивного удаления из металла растворенных газов и неметаллических включений;
- 2) повышение температуры металлов, которое приводит к интенсификации процессов раскисления их растворенным углеродом, всплыванию неметаллических включений и т.д.;
- 3) вакуумирование металла, значительно повышающее раскислительную способность углерода и снижающее содержание растворен-

ных газов и легкоплавких примесей цветных металлов, а также неметаллических включений в результате их флотации при барботировании металла;

4) принудительная кристаллизация в водоохлаждаемых кристаллизаторах, что дает возможность, регулируя скорость кристаллизации, получать желаемую макроструктуру, повышать плотность металла, оттеснять в металлическую ванну неметаллические включения с низкой адгезией, получать слитки без зональной ликвации, газовых пузырей и практически без усадочных раковин.

В конце 50-х – начале 60-х годов XX в. с началом освоения на заводах качественной металлургии процессов электрошлакового переплава (ЭШП) и вакуумно-дугового переплава (ВДП), а затем и вакуумно-индукционного переплава (ВИП) связано рождение новой промышленной отрасли – специальной электрометаллургии (СЭМ). Эти и последующие годы ознаменовались значительными успехами в повышении качества металла, что главным образом связано с успешным развитием процессов ВИП, ВДП, ЭШП, электронно-лучевого переплава (ЭЛП), плазменно-дугового переплава (ПДП). Успехи специальной металлургии связаны с применением одного или нескольких рафинирующих воздействий для коренного улучшения качества металла.

В табл. В1 показано, как при различных процессах рафинирующей обработки используются эти средства повышения качества металла. Наиболее прогрессивными являются процессы переплава, так как они позволяют одновременно использовать почти все средства.

*Таблица В1*

**Эффективность различных способов обработки металла**

Способ производства	Рафинирование шлаком и газом	Перегрев металла	Вакуумирование	Принудительная кристаллизация
Вакуумирование в ковше при разливке	–	–	+	–
Обработка синтетическим шлаком в ковше	+	–	–	–
Продувка металла в ковше газом	+	–	–	–
Вакуумно-индукционная плавка	–	–	+	–

Способ производства	Рафинирование шлаком и газом	Перегрев металла	Вакуумирование	Принудительная кристаллизация
Вакуумно-дуговой переплав	–	+	+	+
Электрошлаковый переплав	+	+	–	+
Электроннолучевой переплав	–	+	+	+
Плазменно-дуговой переплав в регулируемой атмосфере	+	+	–	+
Плазменный переплав в вакууме	–	+	+	+

Переплавные процессы объединены в особую группу специальной электрометаллургии – вторичные рафинирующие процессы. Общими для них являются переплав расходимых заготовок (электродов), капельный перенос переплавляемого металла, последовательная кристаллизация его в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Во всех этих процессах используется электрический источник тепла, под действием которого металл плавится. В то же время вторичные рафинирующие процессы различаются характером преобразования электрической энергии в тепловую, наличием или отсутствием вакуума и шлака в плавильном пространстве и рядом других особенностей.

Источником нагрева при ВДП является энергия дугового разряда, при ЭЛП – энергия электронного луча, при ЭШП – тепло, выделяемое при прохождении тока через шлак, при ПДП – низкотемпературная плазма, температура которой колеблется в пределах 5 000...30 000 К.

ЭШП, ВДП, ЭЛП и ПДП являются высокоэффективными рафинирующими процессами, так как они повышают общую чистоту металла, снижают содержание в нем вредных примесей, а получаемый слиток имеет минимальное развитие физической и химической неоднородности. Указанные процессы позволяют устранить ликвационные и усадочные дефекты, повысить служебные характеристики металла.

Электрошлаковый переплав – отечественный способ улучшения качества сталей и сплавов, разработанный в 1952 – 1952 гг. в Институте электросварки им. Е.О. Патона АН УССР. Он широко применяется для производства шарикоподшипниковых, быстрорежущих, не-

ржавеющих, теплоустойчивых, жароупорных сталей и жаропрочных сплавов. В последние годы способ ЭШП начали интенсивно развивать за рубежом, однако до настоящего времени приоритет в развитых капиталистических странах принадлежит вакуумно-дуговому переплаву (ВДП). В значительно меньшей степени за рубежом и в России используется электронно-лучевой переплав (ЭЛП).

Плазменно-дуговой переплав, так же как и электрошлаковый переплав, – отечественный способ вторичного рафинирования стали. Первый слиток методом ПДП получен в 1963 г. в Институте электросварки им. Е.О. Патона АН УССР. В создании и разработке метода плазменно-дугового переплава активное участие приняли Институт металлургии им. А.А. Байкова АН СССР, Московский институт стали и сплавов, а также ряд других организаций, в том числе и металлургических предприятий. Отечественные разработки в области плазменно-дугового переплава занимают главенствующие позиции, что подтверждается патентованием способа и оборудования ПДП в развитых странах. Зарубежные фирмы проявляют интерес к указанному виду переплава и работают над технологическими схемами переплава и созданием мощных плазмотронов.

К началу 90-х годов прошлого века на отечественных предприятиях насчитывалось около 120 печей ЭШП, 70 печей ВДП, 3 печи ЭЛП и 3 печи ПДП. На печах ЭШП производили около 400...450 тыс. т стали, ВДП – 100...110 тыс. т. В настоящее время во всем мире только методом ЭШП производят около 800...900 тыс. т стали с ежегодным приростом 10%. Выплавка металла методами спецэлектрометаллургии составляет 15% от объема выплавки электростали и продолжает наращиваться.

Сортамент сталей и сплавов, выплавляемых методами спецэлектрометаллургии, включает более 300 различных по своему химическому составу и назначению сталей и сплавов. Это высоколегированные жаропрочные сплавы на никелевой и хроможелезоникелевой основе, нержавеющие стали, высокопрочные мартенситностареющие стали, стали и сплавы специального назначения, дисперсионно-твердеющие жаропрочные суперсплавы нового поколения.

Широко внедряется в производство сочетание различных методов выплавки металла методами спецэлектрометаллургии – метод ИД (ВИП+ВДП), метод ИЛ (ВИП+ЭЛП), ЭШП+ВДП и др. Это значительно расширяет номенклатуру сталей, подвергающихся переработке, и технологические возможности последующих переделов. Например, стало возможным прессование супержаропрочного сплава

марки ЭП975, который применялся в авиационной промышленности только в литом состоянии.

В обобщенном виде сортамент легированных сталей и сплавов по методам выплавки распределяется следующим образом:

Конструкционные:

цементуемые и улучшаемые.....	ЭШП, ВДП
высокопрочные .....	ВДП, ВИП+ВДП
углеродистые.....	ЭШП, ПДП
Коррозионно-стойкие .....	ВДП, ВИП, ЭШП, ЭЛП, ПДП
Сварочные.....	ВИП
Высокопрочные мартенситностареющие.....	ВИП, ВИП+ВДП, ВИП+ЭЛП
Жаропрочные и жаростойкие сплавы .....	ВИП, ВИП+ВДП, ВИП+ЭЛП
Приборные стали и сплавы, прецизионные сплавы ....	ВИП, ВИП+ВДП, ВИП+ЭЛП, ПДП

Распределение марочного состава по объему выплавки методами спецэлектрометаллургии на примере ОАО «Мечел» приведено ниже.

Метод ВИП:

55% – нержавеющие и коррозионно-стойкие стали типа 03X18H12, 08X18H10T, ЭИ844, ЭП543У;

29% – жаропрочные сплавы типа ЭП718, ЭП696;

15% – мягкое железо, специальные и прецизионные стали и сплавы типа ЭП-678, ЭП637А, 29НК.

Более 70% объема металла, получаемого методом ВИП, идет на электроды для ВДП.

Метод ВДП:

75% – конструкционные стали типа 30ХГСН2А, 55СМ5ФА, СП28(33) и др;

20% – нержавеющие и специальные коррозионно-стойкие стали типа 12Х18Н10Т, ЭИ810, ЭП494 и др.;

3% – жаропрочные сплавы типа ЭП718, ЭИ698, ЭП742;

2% – другие марки.

Основные технологические особенности и возможности методов спецэлектрометаллургии приведены в табл. В2 и В3.

Каждый из рассмотренных методов имеет свою сферу применения в зависимости от сортамента и требований, предъявляемых к стали. Некоторые марки стали ответственного назначения могут выплавляться только способами спецэлектрометаллургии.

Ниже рассматриваются способы выплавки и переплава стали в агрегатах СЭМ, особенности рафинировочных процессов.

## Основные технологические особенности и возможности методов спецэлектроталлургии

Технологический фактор	ВИП	ВДП	ЭЛП	ЭШП	ПДП
Футеровка	Огнеупоры	Медный водоохлаждаемый тигель	Медный водоохлаждаемый тигель	Медный водоохлаждаемый тигель	Медный водоохлаждаемый тигель
Давление газов в плавильном пространстве печи в процессе рафинирования, Па	0,65...6,65	0,65...6,65	$0,65 \cdot 10^{-2} \dots 1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^5$	$0,65 \dots 4 \cdot 10^5$
Максимальная температура металла (на поверхности), °С	1650 (лимитируется стойкостью футеровки)	1700 (ограничивается из-за прямой взаимосвязи со скоростью направления слитка)	До 1850 (ограничивается испарением основных компонентов расплава)	До 1700 (ограничивается из-за взаимосвязи со скоростью направления слитка)	До 2500 (ограничивается испарением основных компонентов расплава)
Ограничение выдержки металла в жидком состоянии	Возможна длительная выдержка, ограничиваемая стойкостью футеровки и экономическими факторами	Ограниченная из-за нестабильности горения дуги при малых скоростях наплавления и дефектами слитка при высоких скоростях	Ограничивается испарением основных компонентов расплава	Ограничивается возможностью возникновения дефектов структуры и поверхности слитка	Ограничивается испарением основных компонентов расплава

Загрязнение расплава материалом футеровки	Имеет место (преимущественно в печах малой вместимости)	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Виды используемых для плавки материалов	Возможно использование любой шихты, в том числе и жидкой заварки металла, загружаемой в любой последовательности в необходимый момент времени	Использование литых или деформированных электродов определенного химического состава	Использование литых или деформированных электродов конечного химического состава	Использование литых или деформированных электродов конечного химического состава	Использование литых или деформированных электродов конечного химического состава	Использование литых или деформированных электродов конечного химического состава
Корректировка состава металла	В широком диапазоне концентрации любого элемента	Ограничивается присадкой модифицирующих добавок и раскислителей	Практически осуществима только с применением промежуточной емкости	Практически осуществима только с применением промежуточной емкости	Ограничивается присадкой добавок в шлаковую ванну	То же, что и при ВДП + дозатор
Стадия рафинирования металла	При расплавлении, нагреве, выдержке металла в жидком состоянии в вакууме	При нагреве, расплавлении расходуемого электрода, в ванне жидкого металла	При нагреве, расплавлении переплавляемой шпатель, в ванне металла	При нагреве, расплавлении переплавляемой шпатель, в ванне металла	При нагреве на торце электрода, в жидкой кашле, на поверхности ванны жидкого металла	То же, что и при ВДП + шлак
Рафинирующие возможности: использование раскислительной способности углерода	Возможно при длительной выдержке в вакууме и соблюдении определенной последовательности введения элементов, понижающих активность углерода	Не используется (переплавляется раскисленный металл)	Используется в ограниченных случаях	Используется в ограниченных случаях	Не используется	При использовании вакуума

Продолжение табл. В2

Технологический фактор	ВИП	ВДП	ЭЛП	ЭШП	ПДП
Обезуглероживание расплава	Возможно за счет взаимодействия с футеровкой тигля и проведения дополнительной обработки твердыми и газообразными окислителями	Не имеется	Используется в ограниченных случаях	Не имеется	Используется
Снижение содержания кислорода	Возможно при введении дополнительных металлических раскислителей до 0,001...0,003% [O]	Возможно при переплаве хорошо раскисленного металла до 0,001...0,003% [O]	Возможно при переплаве хорошо раскисленного металла до 0,001% [O]	Возможно до 0,002...0,003% [O]	Возможно
Снижение содержания оксидных включений	Возможно при рациональном режиме раскисления и обработке расплава инертными газами и шлаками	Достигается высокая степень снижения неметаллических включений при равномерном их распределений по сечению слитка	То же что и ВДП, но степень снижения неметаллических включений может быть выше	То же, что и при ВДП	То же, что и при ВДП
Возможность раскисления металла газообразными раскислителями	Возможно путем использования водорода, углеводородсодержащих газов и их смесей	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Возможно
Снижение содержания водорода	Возможна глубокая дегазация и высокая степень удаления водорода	То же, что и при ВИП	То же, что и при ВИП	Возможно повышение содержания водорода при повышенном $r_{H_2O}$ в атмосфере	Возможно в вакууме

Снижение содержания азота	Достигается высокая степень удаления азота (до 80%), ограничивается только временем пребывания металла в жидком состоянии	Степень удаления азота составляет 30...35%	Степень удаления азота достигает 50...80%	Практически не происходит	То же, что и при ВДП
Снижение содержания нитридных включений	Возможно с использованием шлаков, ассимилирующих включения этого типа	Достигается снижение нитридных включений при равномерном распределении по сечению слитка	Степень снижения количества нитридных включений выше, чем при ВДП, при равномерном распределении по сечению слитка	Не происходит	Возможно за счет вакуума; измельчение включений
Удаление примесей цветных металлов	Степень удаления примесей 50...80%	Степень удаления примесей (30...40%) ограничивается скоростью наплавления слитка	Степень удаления примесей (60...90%) отравляется скоростью наплавления слитка	Не происходит	То же, что и при ВДП
Снижение содержания серы	Возможно при использовании шлаков различного состава и футеровки на основе CaO	Не удаляется	Не удаляется	В зависимости от исходного содержания – до 60%	Возможно при использовании шлаков
Динамика ванны	Электромагнитное перемешивание расплава (ЭМП)	Перемешивание ванны за счет конвекции или электромагнитного поля	То же, что и при ВДП	То же, что при ВДП	То же, что и при ВДП, ЭМП (ВДП + струя)

Окончание табл. В2

Технологический фактор	ВИП	ВДП	ЭЛП	ЭШП	ПДП
Факторы, отрицательно влияющие на эффективность рафинирования	Неблагоприятная форма ванны и от-носительно малая величина удельной поверхности ме-талл – газ. Загряз-нение расплава ки-слородом футеров-ки тигля	Экранирование поверхности ванны электродом, соот-ветственно повы-шенное давление газов и паров в зоне поверхности. Образование коро-ны	Интенсивное испа-рение основных компонентов рас-плава и соответст-венно сложность регулирования конечного химиче-ского состава вы-плавленных сталеи и сплавов	Ведение процесса при атмосферном давлении, наличие шлаковой ванны, могущей быть источником по-ступления водо-рода и кислорода	Возможное уве-личение содер-жания азота в металле (зависит от чистоты газа)
Возможность до-полнительной ин-тенсификации про-цессов рафиниро-вания	Обработка расплава инертными газами, окислительно-восстановительными газами, шлаками и газошлаковыми сме-сями, твердыми окис-ляющими реагента-ми, дополнительный плазменный нагрев поверхности ванны (шлака)	Ограничивается микрошлаковым рафинированием и раскислением в процессе плавки	Обработка шла-ком в промежу-точных емкостях	За счет изменения состава шлака, обработки шлаков газами, создания инертной атмо-сферы, раскисле-ния и легирования шлаковой ванны	Обработка шла-ком, обработка активными газа-ми
Возможность азо-тирования металла из газовой фазы	Возможна, но эко-номически нецеле-сообразна	Возможна с дости-жением нормиро-ванных концентра-ций азота, равномер-ным распределением карбонитридной фазы в слитке	Невозможно	Возможно при создании атмо-сферы соответст-вующего состава	Возможно азоти-рование до сверхравновес-ных содержаний азота

Условия формирования слитка	Ограниченная возможность воздействия на процесс кристаллизации слитка в изложнице; качество слитка близкое к обычному	Имеется возможность регулировать линейную скорость кристаллизации и другие параметры в определенных пределах	Имеется возможность регулирования параметров кристаллизации значительно более широких пределах, чем при ВДП	То же, что и при ВДП	То же, что и при ВДП, но в широких пределах
Качество структуры выплавленного слитка	Обычное, с возможностью возникновения дефектов, характерных для обычного слитка	Высокое, возможность получения плотной бездефектной структуры	Высокое, аналогичное ВДП	То же, что и при ВДП	Высокое, пониженная склонность к общей дендритной ликвации
Возможность повышения качества металлопродукции	Применение последующего рафинирующего переплава: ВДП, ЭЛП, ПДП	Использование исходного металла повышенного качества, выплавленного в ВДП или плазменных печах	То же, что и при ВДП	Использование вакуумирования исходного металла, выплавленного в ВДП или плазменных печах	То же, что и при ВДП
Экономические затраты на металлургический переплавы (приведенные затраты по сравнению с металлом открытой вылавки)	Выше в 7,3 раза	Выше в 3,5 раза	Выше в 1,3 раз	Выше в 2,15 раза	Между ВДП и ЭЛП
Условия труда обслуживающего персонала	Печь работает практически бесшумно, уровень тепло-, газо- и пылевыведений очень низок	Аналогично ВДП	Аналогично ВДП	Необходимы газоотсос и газоочистка	Аналогично ВДП

Сопоставление характерных показателей переплавных процессов

Показатель	ВДП	ЭЛП	ЭШП	ПДП
Источник энергии	Электрическая дуга	Электронный луч	Нагрев сопротивлением	Плазменная дуга
Максимальная масса слитка, т	56	18	160	6
Возможные сечения слитка	Круглое	Круглое, квадратное, прямоугольное	Круглое, прямоугольное, квадратное, фигурное	Круглое
Шихтовые материалы	Одна деформированная или литая заготовка	Одна или несколько деформированных или литых заготовок	Литые или деформированные заготовки	То же, что и при ВДП
Требования к подготовке поверхности заготовки	Механическая или наждачная обработка поверхности	То же, что и при ВДП	Возможен перешлаив без подготовки поверхности заготовки	То же, что и при ВДП
Присадка легирующих	Невозможна	Возможно в печах с промежуточной емкостью или при холодном деформировании	Невозможна	То же, что и при ВДП
Возможность модифицирования металла	Исключается	Возможна в печах с промежуточной емкостью или при холодном деформировании	Возможно (в результате взаимодействия со шлаком специального состава)	То же, что и при ВДП
Температурный режим	Зона высокой температуры, не подающаяся регулированию	Зона высокой температуры (в фокусе), возможен перегрев расплавленного материала	Зона высоких температур, возможно регулирование	То же, что при ЭШП
Реакции со шлаком	Невозможны	Возможны в специальных случаях	Составляют суть процесса	Возможны

Расход энергии, кВт·ч/кг	1,0	1...2	1,0	1,2
Производительность, кг/с (т/ч)	Ориентировочно в крупных печах до 0,15 (0,54)	До 0,101 (0,36)	Ориентировочно в крупных печах до 0,15 (0,54)	0,15...0,157 (0,5...0,6)
Удаление: кислорода водорода азота	Полное Приблизительно до достижения равновесия Ограниченное	Полное Приблизительно до достижения равновесия Ограниченное	Значительное снижение Не наблюдается Не наблюдается	Возможно Возможно Возможно
Эффект испарения	Отмечается увеличение потерь на испарение тяжелых металлов при переходе от ВДП к ЭЛП. Наибольшие потери имеют место при ЭЛП	То же, что и при ВДП	Практически не наблюдается	Зависит от условий плавки
Качество поверхности слитка	Необходима механическая или наждачная обработка перед деформацией	То же, что и при ВДП	Не нужна специальная обработка поверхности	То же, что и при ВДП
Ограничение сортамента	Стали и сплавы, легированные марганцем, азотом	Стали и сплавы, легированные марганцем, азотом, а также при определенной концентрации – хромом	Стали и сплавы, легированные титаном, прецизионные сплавы	Широкий сортмент