

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Филиал ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте  
Факультет Техники и технологии  
Кафедра «Техника и технологии производства материалов»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА  
Рецензент, ген. директор  
ООО ПКФ «УралМет»  
\_\_\_\_\_ А.В.Новоселов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой,  
профессор, д.т.н.,  
\_\_\_\_\_ И.В. Чуманов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ  
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВКИ МЕТОДОМ  
ВЫТЯГИВАНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ ОБРАТОМ  
ГРАВИТАЦИОННЫМ СИЛАМ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР

Консультанты:  
Технический контроль  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ А.В. Рябов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Руководитель ВКР  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ А.Н. Аникеев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Автор работы  
студент группы  
\_\_\_\_\_ М.В. Петроченко  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Нормоконтролер  
\_\_\_\_\_ В.В. Седухин  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Златоуст 2021 г.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	11
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	12
1.1 Общие сведения о дисперсных частицах.....	12
1.2 Некоторые методы получения дисперсных частиц.....	18
1.3 Введение дисперсных частиц в расплавы стали.....	21
1.3.1 Введение дисперсных частиц в МНЛЗ.....	22
1.3.2 Введение дисперсных частиц в литьевые формы.....	24
1.3.3 Введение дисперсных частиц в центробежную установку.....	25
1.3.4 Введение дисперсных частиц в слиток.....	26
1.3.5 Введение дисперсных частиц при вытягивании заготовки в направлении обратном гравитационному полю.....	27
2 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВКИ МЕТОДОМ ВЫТЯГИВАНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ ОБРАТОМ ГРАВИТАЦИОННЫМ СИЛАМ.....	29
2.1 Кристаллизация стали.....	32
2.1.1 Расчет скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора.....	34
2.2 Дефекты поверхности непрерывнолитых заготовок.....	36
2.3 Улучшение стали дисперсными частицами.....	39
2.3.1 Общая характеристика процесса смешения.....	40
2.3.2 Повышения качества диспергирования наполнителя.....	42
3 РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВКИ МЕТОДОМ ВЫТЯГИВАНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ ОБРАТОМ ГРАВИТАЦИОННЫМ СИЛАМ.....	44
3.1 Классификация установок для непрерывного литья заготовки.....	45
3.1.1 МНЛЗ вертикального типа.....	45
3.1.2 МНЛЗ горизонтального типа.....	47
3.2 Установка для вытягивания отливки методом в направлении обратом силы гравитации.....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	55

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		9

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Конструкторская документация на экспериментальную установку.....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Техническая документация, соединительные и габаритные размеры мотор-редуктора.....	60

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		10

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях кризиса мировой экономики необходимо поддерживать конкурентоспособность продукции и решать задачи, связанные с постоянным повышением качества отечественных металлоизделий. Такие задачи надо решать за счет улучшения характеристик и методов производства стали.

Непрерывнолитые заготовки являются основным сырьем для производства проката и качество заготовок определяет качество готового металлоизделия. Одной из основных проблем, встречающихся при разливке металла на МНЛЗ радиально-криволинейного типа, считается наличие трещин и ликвационных зон во внутренней структуре металла, а также на поверхности заготовок. Одной из причин появления дефектов в непрерывно литых заготовках являются термические напряжения.

Основной вектор по повышению качественных показателей непрерывно литых заготовок направлен на оптимизацию ряда технологических параметров отдельных узлов машины непрерывной разливки стали и модернизацию конструкции на основе известных закономерностей и обобщенного производственного опыта. Внесение кардинальных конструктивных изменений в установки непрерывной разливки сталей является крайне сложным, в связи с чем, одним из наиболее оптимальных путей повышения уровня качественных показателей непрерывно литых заготовок – является совершенствование химического состава сталей для производства отливок.

Основная проблема, решаемая в данной работе – разработка технологии и оборудования для получения отливки методом вытягивания в направлении обратом гравитационным силам.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		11

# 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

## 1.1 Общие сведения о дисперсных частицах

В развитии металлургии, переход на непрерывную разливку стали позволили значительно улучшить качество металла, в первую очередь макроструктуру слитка, вследствие снижения химической неоднородности из-за более быстрого затвердевания малых по сечению отливаемых слитков, а также эффективной внепечной обработки стали в ковше и изменения технологии процесса в целом. При этом сталеплавильное производство все в большей степени развивается по пути функционального разделения задач получения полупродукта в агрегате и доводки стали в сталеразливочном ковше и машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) в зависимости от марки и потребительских свойств металлопродукции. В настоящее время непрерывная разливка стали представляет собой сложную динамически развивающуюся систему технологических и конструктивных решений, предусматривающих рафинирование металла в промежуточном ковше МНЛЗ (продувка аргоном, обработка порошковой проволокой, подогрев металла и т.п.), электромагнитное воздействие, обеспечивающее перемешивание жидкой фазы непрерывного слитка, “мягкое” обжатие слитка с жидкой сердцевиной с целью подавления осевой пористости и ликвации и т. д.

Наиболее перспективным направлением улучшения характеристик структуры и свойств литого металла является ввод в расплав перед кристаллизацией дисперсных частиц. Под модифицированием подразумевают (от лат. «Modificat» – видоизменять путем деления на части) создание различного рода воздействий на расплав, в результате которых происходит измельчение кристаллической структуры и повышение физико-механических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов [1]. В работе авторов [2] под термином «модифицирование» понимают термодинамически нестабильные химические и энергетические воздействия, эффект от которых после их осуществления носит экстремальный характер. К таким методам воздействия на

										Лист
										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР					

структуру отливок относят введение полидисперсных частиц в расплав, оказывающими влияние на процесс графитизации чугунов, суспензионное литье и т.д. В статье [2] авторы считают, что модифицирование – это процесс регулирования первичной кристаллизации и (или) изменения дисперсности кристаллизующихся фаз, который осуществляют введением в расплавы металлов малых добавок элементов или их соединений. В связи с этим понятие «модифицирование» часто используется в узком смысле и предполагает введение в расплав малых добавок веществ, увеличивающих дисперсность кристаллизующихся фаз и повышение физико-механических свойств отливок. Отсюда можно сказать, модифицирование – это совокупность различных методов улучшения качественных характеристик металлов и сплавов при добавке в их расплавы различных элементов. Под модифицированием подразумевается не только измельчение макро- и микроструктуры, но и изменение природы, формы и распределения неметаллических включений, тонкой структуры сплава и т.д.

Согласно авторам [1] вводом дисперсных частиц можно решить задачи, такие как:

- измельчение макрозерна;
- измельчение микрозерна (дендритных ячеек);
- измельчение фазовых составляющих эвтектик, перитектик, хрупких и легкоплавких фаз (с изменением их состава путем введения присадок, образующих с этими фазами химические соединения);
- измельчение первичных кристаллов, которые выпадают при кристаллизации, в до- или заэвтектических сплавах;
- измельчение размера, изменение формы, распределения неметаллических включений (карбидов, графита, оксидов, сульфидов, оксисульфидов, нитридов, фосфидов).

В статье [1] частицы по их действию делят на три группы.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		13





важны, т.к. в этом случае более важной характеристикой модификатора будет температура плавления присутствующих в нем фаз.

Правильное определение состава фаз модификаторов является ключевым, так как позволяет правильно оценить модифицирующую способность отдельных элементов (фаз) и их влияние на структуру модифицируемой литой стали. Для выбора и обеспечения наибольшей эффективности технологии использования таких материалов в качестве катализатора процесса зарождения кристаллов необходимо соблюдение ряда условий, в том числе: размеры частиц не должны значительно превышать дебаевский радиус поглощения для данного вещества; вещество частицы должно быть, как можно более тугоплавким и не растворимым в окружающем металле; вещество должно обладать проводимостью металлического типа. Отмеченным требованиям в полной мере соответствуют такие соединения, как нитрид титана  $TiN$ , нитрид циркония  $ZrN$ , диборид циркония  $ZrB_2$ .

Модифицирование металла желательно проводить частицами вещества радиусом 1–10 нм. Перспективным следует считать использование таких материалов для оптимизации процессов разлива и кристаллизации расплава на слябовых МНЛЗ [5-8].

Для повышения качества литого металла большой интерес вызывает применение специально подготовленных дисперсных частиц, (НПИ) – нанопорошков из тугоплавких соединений (оксидов, нитридов, карбидов, боридов и др.). В статьях [4,6,7] теоретически и экспериментально установлено, что нитрид и карбонит титана, обладая металлической проводимостью, является эффективным модификатором для сплавов на основе железа и устойчив к растворению в перегретом расплаве стали. Проведенные в статье [5] исследования по модифицированию износостойкого чугуна нанопорошковыми композициями на основе нитрида титана и оксида иттрия, показали существенное повышение износостойкости детали что использование и обусловило использование аналогичной композиции для анализа её воздействия.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		16



газового давления. Решение указанной проблемы возможно при использовании физических методов воздействия на затвердевание слитка, в частности, экзогенной суспензионной разливки, которая осуществляется путем ввода в жидкий металл дисперсных частиц, представляющих собой металлический порошок или мелкую дробь близкого химического состава к разливаемой марке стали. Твердые металлические частицы, введенные при разливке в струю жидкой стали, снимают перегрев и обеспечивают ускорение процесса кристаллизации стали в литейной форме [7].

Промышленные исследования, на основе статей, показали, что независимо от способа получения нанопорошковых материалов введение нанопорошков частиц в промежуточный ковш машины непрерывного литья заготовок является предпочтительным и обеспечивает высокую технологичность модифицирования металла по сравнению с подачей материала в кристаллизатор.

## 1.2 Некоторые методы получения дисперсных частиц

Существует довольно большое количество методов получения нанопорошков. Авторы работы [12] приводят методы получения магнитных наночастиц, но эти методы можно применять и для получения любых полидисперсных частиц.

По некоторым оценкам уникальные свойства дисперсных частиц возникают в области размеров 2-30 нм.

Основные методы получения дисперсных частиц, приведенные авторами [12].

- получение из макроскопических материалов путем диспергирования;
- химический синтез, т.е. направленное изменение состава веществ с остановкой (тем или иным методом) роста новой фазы на стадии наноразмеров;

Существенной особенностью синтеза является получение частиц заданного размера и формы (во всяком случае, разброс по размерам должен быть небольшим (5-10 %) и поддающимся контролю).

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Соединение со сложным элементным составом в паровой фазе часто происходит нарушение стехиометрии, что приводит к образованию других веществ, а при синтезе из атомных пучков не удается достичь гомогенного распределения элементов на подложке.

Метод получения полидисперсных частиц из пересыщенных паров металлов. Данный метод основан на классической теории, в которой зарождающиеся кластеры новой фазы. Для получения дисперсных частиц используют различные методы испарения металла: лазерное испарение, термическое испарение, дуговой разряд, испарение в плазме, испарение под действием солнечной энергии.

Метод термического испарения. В методе термического испарения нагревают в вольфрамовой лодочке в токе инертных газов (аргона или гелия). Атомы металла, испаряясь, сталкиваются с атомами инертного газа, при этом теряют кинетическую энергию и конденсируются в виде ультра - (нано) дисперсного порошка на подложке. В этом методе можно контролировать размер частиц в области 3-100 нм, изменяя температуру подложки, скорость испарения металла, давление и химический состав газов.

Метод распыления паров металлов. Данный метод при термическом или лазерном испарении позволяет синтезировать граммовые количества порошков. Этим способом можно диспергировать металлы, сплавы, оксиды.

Получаемые частицы могут быть внедрены в различные подложки, которые могут одновременно формироваться в результате испарения из другого независимого источника. Используя масс-анализирующие системы различных типов на пути движения частиц от источника до подложки, можно контролировать в газовой фазе до осаждения размеры и состав.

Метод электроэрозии. Частицы диспергируют до нанометровых значений. Процесс проводят в диэлектрической жидкости, продукты трансформации которой покрывают образующиеся наночастицы. Метод позволяет получать частицы в интервале 2,5-20 нм, но могут присутствовать и отдельные частицы с

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		19

размерами до 100 нм. Мелкие частицы образуются из паров металла, а крупные – из расплавленных капель. Размер частиц в этих интервалах можно контролировать условиями проведения процесса.

Метод разложения металлсодержащих соединений. Разложение металлсодержащих соединений (чаще всего используют карбонилы металлов или их производные) под действием ультразвука позволяет получать частицы в так называемых мягких условиях. Метод используется для получения частиц метастабильного строения, но он не позволяет тонко регулировать размеры частиц.

Метод механохимической обработки. Одним из методов получения ультрадисперсных (нанодисперсных) частиц является метод механохимической обработки в мельницах (активаторах) различной конструкции и энергонапряженности. В результате обработки порошкового материала (или смесей) происходят измельчение (возможен также обратный процесс – агрегация) и пластическая деформация веществ, ускоряются процессы массопереноса, перемешивание компонентов смеси может происходить на атомарном уровне, что способствует увеличению химической активности твердых реагентов. В результате механического воздействия мелющими телами на материал в зонах контакта твердого вещества создается поле напряжений. Релаксация этого поля может происходить различными путями (выделение тепла, образование новой поверхности, образование различных дефектов в кристаллах, прохождение химических реакций в твердой фазе), а направление релаксации зависит от свойств вещества, условий обработки (мощности подведенной энергии, соотношения между давлением и сдвигом), от размеров и формы частиц. С увеличением мощности механического импульса и времени воздействия происходит постепенный переход от релаксации путем выделения тепла к релаксации, связанной с разрушением, диспергированием и пластической деформацией материала и появлением аморфных структур различной природы. В результате может быть инициируема разными механизмами (прямым

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		20

возбуждением и разрывом связи, локальным тепловым разогревом, безизлучательным распадом экситонов и т.д.) химическая реакция.

С помощью механического истирания можно получать большие количества различных нанокристаллических материалов. При достижении определенного уровня напряжений дислокации могут аннигилировать и рекомбинировать с малоугловыми границами, которые разделяют отдельные зерна; на этом этапе истирания можно получить зерна размером 20-30 нм.

Метод синтеза наночастиц. Синтез наночастиц на границе раздела фаз проходит в мономолекулярном слое в результате окислительно-восстановительных реакций на границе раздела двух фаз (вода–воздух), одна из которых содержит соединение металла (прекурсор), а другая содержит восстановитель. На границе раздела фаз газ–жидкость формируется так называемый Ленгмюровский монослой. Монослой может содержать различные соединения (поверхностно-активные и другие вещества), которые участвуют в процессах формирования и роста наночастиц. В результате разложения молекул прекурсора в монослое инициируются возникновение активных интермедиатов и процессы зародышеобразования и роста наночастиц на поверхности жидкой фазы. Молекулы поверхностно-активных веществ в монослое могут влиять на процессы роста наночастиц, т. е. являться регуляторами размера и формы наночастиц и наноструктур. Кроме этого, влиять на процессы роста наночастиц можно путем изменения химического состава жидкой или газовой фаз, температуры, в результате действия на монослой электрическими и магнитными полями, светом и другими видами излучений.

### 1.3 Введение дисперсных частиц в расплавы стали

В настоящее время отечественная металлургия располагает большим опытом использования различных методов ввода дисперсных частиц в жидкий металл.

Основными направлениями работ по совершенствованию методов ввода частиц являются:

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		21

– ускорение процесса плавления модификаторов за счет предварительного подогрева (расплавления), применения экзотермических брикетов.

– интенсификация теплообменных процессов путем изменения гидродинамических условий, усиления движения расплава (пневматическое, механическое, электромагнитное перемешивание, использование энергии падающей струи при сливе металла в ковш).

– создание дисперсных частиц с оптимальными физико-химическими свойствами, в первую очередь, плотностью и температурой плавления.

– совершенствование способов ввода дисперсных частиц в расплавы (выстреливание специальными пулями, погружение штангами, введение порошковой проволоки и т.д.) [13].

### 1.3.1 Введение дисперсных частиц в МНЛЗ

Авторы статьи [13] отмечают основные методы ввода такие как:

1) Метод выстреливания пуль. Среди методов, позволяющих увеличить степень усвоения элементов, входящих в состав частиц можно отметить, во-первых, метод выстреливания пуль, который один из разработчиков этого способа Японская фирма "Sumitomo" первоначально предполагала использовать для ввода алюминия.

В случае раскисления алюминием металла в большегрузных ковшах (1200 т и более), когда требуется большой расход алюминия, используется пневматический «пулемет», стреляющий пулями. Пули вводятся в донную часть ковша. Масса пули - 0,5-1,2 кг; диаметр – 10-50 мм; длина – до 550 мм. Для обеспечения оптимальных гидродинамических условий при движении пули вниз, а также при последующем подъеме в объеме металла рекомендуется отношение длины пули к ее диаметру более 11,5.

Первоначальная скорость пули зависит от давления газа (азота или воздуха) и составляет 50-70 м/с. Пневматический «пулемет» может иметь один или два ствола. Скорострельность пулемета – 400-800 пуль/мин. Применение этого способа ввода позволило сократить расход алюминия на 20-25 % при

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		22

лучшем качестве металла. Наиболее широкое применение метод выстреливания пуль получил для введения кальция.

2) Обработка порошковой проволокой. Способ введения в жидкую сталь смесей и сплавов в виде порошка, спрессованного в стальную трубчатую оболочку (порошковая проволока – ПП) получил широкое распространение в ряде промышленно развитых стран с середины 80-х годов XX столетия.

Способ ввода ограничивает тепловой поток на реагент в начале обработки, предотвращает его взаимодействие с расплавом в верхних слоях металла, способствуя плавлению реагента в нижних горизонтах жидкого металла, что увеличивает время контакта и позволяет более эффективно использовать элементы, имеющие низкие температуры плавления, кипения и малую растворимость в металле. Способ находит все большее применение при внепечной обработке стали.

3) Продувка порошкообразными полидисперсными частицами. Продувка металла порошками в сталеплавильном агрегате или ковше является логическим использованием условий оптимального массопереноса, при котором обеспечивается максимальный контакт вдуваемых твердых реагентов с жидким расплавом, высокая скорость их взаимодействия и степень использования вдуваемых материалов

Успешное применение инъекционных технологий во многом зависит от применяемого инъекционного оборудования, обеспечивающего процесс. В настоящее время для инъекционных технологий используются два типа камерных нагнетателей: аэрационный и пневмомеханический.

Широкому распространению инъекционного метода ввода частиц способствует универсальность использования оборудования для вдувания, дающего возможность ввода практически любых порошков для науглероживания, торкретирования, десульфурации и т.д.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		23



улучшения качества, физико-механических и специальных свойств отливок массой до 100-150 кг.

Вторая группа методов суспензионной разливки заключается в снятии перегрева и введении затравок в жидкий металл до разливки с помощью так называемой растворимой твердой фазы ввод в расплав твердых тугоплавких частиц (например, нитридов титана) или получение суспензии в результате химических реакций при раздельном введении компонентов и, наконец, введение частиц до или после заполнения изложницы в виде проволоки, штанг или стержней с последующим перемешиванием расплава или без него.

### 1.3.3 Введение дисперсных частиц в центробежную установку

Авторам статьи [15] рассмотрен метод ввода дисперсных частиц в центробежную установку и суть способа. Суть способа заключается в том что, при разливке металлического материала на машине центробежного литья на струю металла постоянно, в течение всего времени разливки подаются твердые тугоплавкие мелкодисперсные частицы различной плотности. Если плотность тугоплавкой дисперсной частицы, погруженной в расплав отличается от плотности расплава, то сила, действующая на частицу, не уравнивается их собственной центробежной силой и силой тяжести. Поэтому возникают условия для перемещения частиц в ту или другую сторону, т.е. на внутреннюю или внешнюю поверхность формируемой заготовки. Когда частица соприкоснется с фронтом кристаллизации, то она оказывается прижатой расплавом к фронту кристаллизации и уже не всплывает, а захватывается растущими дендритами. В результате происходит упрочнение поверхности.

Исследование микроструктур полученных заготовок показало, что с увеличением количества вводимых дисперсных частиц происходит диспергирование структуры заготовок: балл зерна во внешних слоях заготовок может измельчаться до 8-9, а на внутренних слоях в это же время он может составлять 2-3. В результате оценки механических свойств полученных заготовок было выяснено, что увеличение концентрации дисперсных частиц WC

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		25

в поверхностных слоях центробежно-литой заготовки до 5,1 шт./мкм<sup>2</sup> позволяет увеличить предел прочности на 36-38 %, ударную вязкость на 23-26 %, износостойкость на 29-34 %, твердость на 30-33 %. Несомненным преимуществом данного способа является возможность прогнозирования и управления распределением вводимых частиц. Однако, для внедрения данного способа в производство необходимо решить массу вопросов: как влияет фактор масштабности на распределение частиц, что происходит с частицами при взаимодействии с металлом на микроуровне, каковы условия смачиваемости вводимых частиц и др. Таким образом, можно сделать вывод, что несмотря на обширные исследования в области создания композиционных материалов, основанных на введении дисперсных частиц, требуются дополнительные эксперименты, конечной целью которых должно стать внедрение разрабатываемых материалов в существующую промышленность.

#### 1.3.4 Введение дисперсных частиц в слиток

В статье [15] авторы рассмотрели метод введения дисперсного порошка в слиток на стадии разливки сверху. Суть метода заключалась в том что, половину из слитков модифицировали тонкодисперсной смесью (ТДС) порошков SiO<sub>2</sub>+C, вводя смесь в струю заливаемой в форму стали через специальную точку, прикрепленную к днищу ковша. После ввода частиц исследование химического состава показали, что распределение элементов по высоте и поперечному сечению слитков оказались идентичными, за исключением углерода, содержание которого в модифицированном металле в среднем оказалось больше на 0,03 %. Исследования макроструктуры показали, что модифицирование стали ТДС резко изменяет макроструктуру слитка, почти полностью устраняя крупно дендритную форму кристаллитов и формируя однородное зернистое строение по всему сечению темплетов. Изучение неметаллических включений выявило большое разнообразие форм и размеров алюмосиликатных и сульфидных включений, количество оксидных включений возросло незначительно. Механические испытания показали, что у модифицированного металла возросли на 18 %

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		26

прочностные и на 37-50 % пластические свойства, в 1,5-2 раза повысились трещиностойкость и ударная вязкость.

Несомненными преимуществами данного способа является простота его реализации, однако следует отметить, что при реализации данного метода отсутствует возможность прогнозировать и управлять распределением частиц. Весьма сомнительно, что введенные частицы в полученных слитках расположились равномерно по всему сечению, а неравномерность распределения приводит к непрогнозируемой неравномерности свойств.

### 1.3.5 Введение дисперсных частиц при вытягивании заготовки в направлении обратном гравитационному полю

Введение дисперсных частиц в металл при вытягивании заготовки в направлении обратном гравитационному полю, один из перспективных способов введения дисперсных частиц в расплав является «Способ повышения композиционного материала с повышенной износостойкостью». Данный способ реализуется на машинах непрерывного литья с вытягиванием формируемой заготовки в направлении обратном гравитационному полю. При данном способе разливки, перед подачей металла в центровую на струю присаживают дисперсные тугоплавкие частицы, металл с инжесктированными частицами попадает в центровую, далее в литниковую систему, далее в кристаллизатор, где происходит кристаллизация металла и вытягивание формируемой заготовки (с помощью затравки) в направлении обратном гравитационному полю. Введенные частицы, за счёт разности в плотности по сравнению с упрочняемым материалом, под воздействием Архимедовых сил будут смещаться вверх, и при определённых условиях можно добиться того, чтобы смещение фронта кристаллизации совпадало с направлением движения частиц. Авторами статьи [15] были проведены опытные плавки: сталь марки У7, выплавленная в индукционной печи, разливалась на модернизированной установке с введением твердофазных частиц. В качестве твёрдой фазы выступал карбид титана (TiC), а для улучшения смачиваемости карбидов в ковш перед разливкой давали

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		27

металлический титан. Исследование характера распределения введённой в металлическую матрицу дисперсной фазы показали, во всех полученных заготовках с введенной упрочняющей фазой случаях отмечается достаточно равномерное распределение введённого в жидкую металлическую матрицу дисперсного синтетического карбида титана по высоте слитка. Незначительное увеличение содержания дисперсной фазы по высоте слитка, по-видимому, объясняется некоторым всплыванием дисперсных частиц в процессе кристаллизации. Исследование механических свойств показало увеличение износостойкости опытного металла на 14 % по сравнению с не упрочненной сталью и достижения уровня износостойкости сталей ЭИ107 и 110Х18М-ШД.

Преимуществом данной технологии является то, что в ней учитывается разница плотностей дисперсной фазы и упрочняемого материала, однако для её реализации требуется специфическое оборудование [15].

#### Вывод по разделу

Исходя из анализа статей, можно сделать выводы:

1) Дисперсные частицы позволяют влиять на процессы кристаллизации расплавов чугуна и стали. Применение дисперсных частиц ускоряют скорость кристаллизации и снижают структурную неоднородность отливок и имеют хорошие перспективы.

2) Введение частиц можно рассматривать как различные способы улучшения качественных характеристик металлов. Под модифицированием понимается не только измельчение макро- и микроструктуры, но и изменение природы, формы и распределения неметаллических включений, тонкой структуры сплава и т.д.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

## 2 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВКИ МЕТОДОМ ВЫТЯГИВАНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ ОБРАТОМ ГРАВИТАЦИОННЫМ СИЛАМ

На современном этапе развития металлургического производства все большее распространение получают совмещенные процессы непрерывного литья и деформации, которые позволяют получить как заготовки по форме и размерам близких к готовым изделиям, так и готовый прокат, тем самым снизить энергоемкость технологических процессов, металлоемкость оборудования, капитальные и эксплуатационные затраты. Однако совмещение процессов непрерывного литья и деформации следует рассматривать не только с точки зрения согласования производительности этих процессов, а, что не менее важно, также и с точки зрения получения качественного проката, поскольку непрерывно литые заготовки имеют поверхностные и внутренние дефекты. В связи с этим, агрегаты, входящие в состав литейно-прокатных комплексов, должны обеспечить получение проката высокого качества и увеличение выхода годного материала.

Одним из методов улучшения непрерывной разливки металла является метод вытягивания в направлении обратом гравитационным силам, в данной работе будет использоваться металл с добавлением дисперсных частиц. Метод вытягивания в направлении обратом гравитационным силам построен на основе метода непрерывной разливки металла, только с одним условием, готовый металл вытаскивают из кристаллизатора. Непрерывная разливка является, в настоящее время, основным способом разливки стали. Качество непрерывно литых заготовок (НЛЗ) во многом зависит от правильности выбора технологических параметров процесса разливки, который должен быть сделан с учетом типа машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), размеров поперечного сечения заготовки, марки стали. Экспериментальное определение рациональных параметров разливки с учетом вышеперечисленных факторов – это сложный, дорогой, трудоемкий и длительный процесс. Современное

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		29

состояние теории непрерывной разливки стали позволяет определить основные технологические параметры расчетным путем.

Предполагаемые технологии непрерывного литья в теоретическом плане основаны на объединении процессов кристаллизации металла и формирования слитка в процессе кристаллизации. Повышение эффективности производства непрерывных заготовок достигается разработкой новых приемов воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл.

Способ непрерывной разливки заключается в том, что жидкую сталь заливают в интенсивно охлаждаемую сквозную форму – кристаллизатор. Частично затвердевший слиток непрерывно протягивают через него и дополнительно охлаждают в так называемой зоне вторичного охлаждения. В результате в процессе непрерывной заливки металла и его затвердевания образуется непрерывный слиток. Агрегаты для разливки стали этим методом называют машинами непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) или установками непрерывной разливки стали (УНРС). Перед началом разливки устанавливают нагретый промежуточный ковш в заданное положение над кристаллизатором, осуществляют подачу воды на кристаллизатор и вторичное охлаждение. Промежуточный ковш наполняют металлом на высоту 0,4-0,6 м. и затем, открывая стопор, начинают подавать металл в кристаллизатор. Длительность заполнения кристаллизатора до начала вытягивания слитка должна обеспечить образование достаточно толстой корки затвердевшего металла и ее прочное сцепление с затравкой; для слитков среднего и крупного сечений это время составляет 0,5-2,0 мин.

По истечении заданного времени, при не полностью заполненном кристаллизаторе, включают механизм вытягивания слитка; одновременно автоматически включается механизм качания кристаллизатора. В течение 1-2 мин. скорость вытягивания слитка повышают до заданного значения; в дальнейшем ее стараются поддерживать постоянной во избежание образования дефектов в слитке. Скорость разливки подбирают опытным путем, учитывая, что

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		30

при ее увеличении возрастает производительность установки, но уменьшается толщина корки слитка па выходе из кристаллизатора. Скорость разливки зависит от сечения слитка, марки разливаемой стали, состояния оборудования МНЛЗ, обычно понижаясь при увеличении сечения слитка и степени легированности стали. Для слитков толщиной более 150 мм скорость разливки находится в пределах 0,4-2,0 м/мин, для более мелких слитков достигает 4-8 м/мин.

Металл в кристаллизатор подают либо открытой струей, либо «под уровень» с помощью удлиненных составных стаканов, конец которых погружен в металл на глубину 50-100 мм. Подачу «под уровень» осуществляют вертикальной, либо горизонтальными или наклонными струями. Разливка под уровень предотвращает окисление и разбрызгивание струи металла и уменьшает его охлаждение, снижает пораженность слитка поверхностными продольными трещинами. Подачу вертикальными струями применяют при отливке слитков, близких по сечению к кругу или квадрату; подачу через погружаемые стаканы с боковыми отверстиями – для плоских слитков. В данной работе, разработка экспериментальной установки будет происходить на основе МНЛЗ вертикального типа. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.

Рисунок 1 – Схема установки для метода вытягивания в направлении обратом гравитационным силам

При разливке без подачи в кристаллизатор шлаковых смесей на его стенки подают смазку, которая уменьшает трение слитка о стенки, способствуя предотвращению зависания и разрывов корки слитка. В качестве смазки часто используют парафин и рапсовое масло, расход парафина составляет 0,2-0,7 кг/т. стали. При сгорании смазки создается восстановительная атмосфера, что уменьшает окисление поверхности металла; для защиты от окисления в кристаллизаторе и вокруг струи создают защитную атмосферу путем подачи аргона, азота, природного газа, пропана.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		31

При разливке через погружаемые стаканы поверхность металла в кристаллизаторе защищают от охлаждения, окисления и возможного образования заворотов окисленной корки шлаковыми покрытиями. В кристаллизатор вводят шлаковые смеси, которые, соприкасаясь с жидким металлом, расплавляются, образуя слой жидкого шлака. Состав смесей отличается разнообразием, в них могут входить  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaP}_2$ ,  $\text{MgO}$ , иногда 20-30 % порошкообразного графита. Смесей должны быть легкоплавкими с температурой плавления 1050-1300 °С. Иногда применяют экзотермические смеси, при сгорании которых формируется жидкий шлак. При разливке со шлаковым покрытием смазку в кристаллизатор не подают; роль смазки выполняет тонкий слой шлака, налипающего на стенки кристаллизатора.

При подаче металла в кристаллизатор нельзя допускать перерывов струи и резкого изменения количества подаваемого металла. Перерыв струи ведет к образованию спаев (поясов) на слитке. Изменение расхода металла вызывает колебания уровня металла в кристаллизаторе и появление ужимин на поверхности слитка, метод вытягивания в направлении обратном гравитационным силам решает эти проблемы.

## 2.1 Кристаллизация стали

Сущность процесса кристаллизации стали заключается в переходе ее из жидкого состояния в твердое. При понижении температуры увеличивается вероятность существования образований (кристаллов или роев) с упорядоченным строением, а их структура приближается к структуре твердого кристалла. При определенной температуре, называемой температурой кристаллизации, термодинамически одинаково вероятно наличие в системе как жидкой, так и твердой фаз. При этой температуре свободная энергия чистого металла в жидком и твердом состояниях одинакова. Схема кристаллизации показана на рисунке 2.

Рисунок 2 – Схема кристаллизации

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		32



Рассмотрение подобных схем кристаллизации позволяет объяснить два важных момента:

По мере развития процесса кристаллизации в нем участвует все большее и большее число кристаллов. Поэтому процесс вначале ускоряется, пока в какой-то момент взаимное столкновение растущих кристаллов не начинает заметно препятствовать их росту; рост кристаллов замедляется, тем более что и жидкости, в которой образуются новые кристаллы, становится все меньше.

В процессе кристаллизации, пока кристалл окружен жидкостью, он часто имеет правильную форму, но при столкновении и срастании кристаллов их правильная форма нарушается, внешняя форма кристалла оказывается зависимой от условий соприкосновения растущих кристаллов. Вот почему кристаллы металла, зерна (кристаллиты) не имеют правильной формы.

#### 2.1.1 Расчет скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора

Главным фактором, для получения качественной отливки методом вытягивания в направлении обратом гравитационным силам, является скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора и ее размеры.

Равномерная кристаллизация и скорость вытягивания позволяет обеспечить равномерное распределение частиц по всей литой заготовки и предотвратить ликвационно-усадочные дефекты. В зависимости от скорости вытяжки формируемой заготовки, температуры разлива и объёмной доли упрочняющих частиц формируется та или иная структура композиционного материала с требуемыми физико-механическими свойствами. Изотропия механических свойств в литой заготовке обеспечивается оптимальным профилем (вогнутостью) фронта кристаллизации, форма которого зависит от скорости вытягивания заготовки, а равномерность распределения тугоплавких частиц – от скорости их подачи в центровую. Анализ системы Fe–Ti–C, выполненный авторами статьи [16], позволил сделать вывод, что для предотвращения выкрашивания частиц из матричного состава необходимо обеспечить угол их смачиваемости менее  $90^\circ$ , что достигается введением металлического титана в

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		34



Время  $\tau_0$  можно найти из соотношения (3):

$$\tau_0 = \frac{H}{V_C} \quad (3)$$

$$\tau_0 = \frac{0,05}{2,9 \cdot 10^{-5}} = 1724 \text{ с}$$

В нашем случае  $\tau_0 = 1724$  с. Для момента времени  $\tau = 60$  с соотношение (4)

$$\frac{C_V(z, \tau)}{C_V^0} = 1,6 \exp \frac{z - H}{0,048} \quad (4)$$

График зависимости показан на рисунке 5.

Принимаем скорость вытягивания заготовки  $V_C = 3 \cdot 10^{-5}$  м/с

Используя полученное авторами [16] соотношение, был выполнен расчет для случая всплывания дисперсных частиц в жидком металлическом расплаве.

Результатом расчета является получение оптимальной скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора в направлении обратном гравитационному полю.

Рисунок 5 – Зависимость по соотношению (4) от  $z$

## 2.2 Дефекты поверхности непрерывнолитых заготовок

Непрерывный слиток благодаря малой толщине и быстрому вследствие этого затвердеванию отличается меньшим развитием химической неоднородности, более равномерным распределением неметаллических включений. От слитков, разливаемых в изложницы, он отличается также более чистой и гладкой поверхностью.

Основные дефекты слитков, получаемых непрерывной разливкой. В слитках сильно развита осевая пористость, что объясняется наличием в кристаллизующемся слитке очень глубокой и узкой лунки жидкого металла.

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР					36



вмятин. Поперечные трещины в углах слитка могут также образовываться в результате слишком интенсивного вторичного охлаждения. Поперечные поверхностные трещины показаны на рисунке 7.

Сетчатые (паукообразные) поверхностные трещины возникают при неравномерном прилегании корки к стенкам кристаллизатора в местах наиболее сильного охлаждения, т. е. в участках плотного прилегания; они могут возникать также при местном переохлаждении поверхности слитка в зоне вторичного охлаждения.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		38

Рисунок 7 – Поперечные поверхностные трещины на грани сортовой заготовки (а, б) и сляба (в, г), а также на угловых участках (д, е)

Внутренние трещины образуются при чрезмерной интенсивности вторичного охлаждения как результат возникающих из-за переохлаждения поверхности слитка термических напряжений, а также при выпучивании слитка вследствие слишком большого расстояния между опорными роликами.

Ужимины (поперечные и продольные углубления на поверхности слитка) возникают в результате резкого изменения напора струи и колебаний уровня металла в кристаллизаторе, при местном размывании корки струей металла и в участках неплотного прилегания корки к стенкам кристаллизатора.

Искажение профиля (ромбичность) слитка возникает при неравномерном охлаждении углов и граней слитка в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, при перекосах слитка в кристаллизаторе.

Заливины образуются в результате попадания жидкого металла в зазор между корочкой слитка и стенкой кристаллизатора, образующийся вследствие искривления мениска в области их соприкосновения. Завалины показаны на рисунке 8.

### 2.3 Улучшение стали дисперсными частицами

Основным и перспективным направлением улучшения структуры и свойств стали, является введение в расплав дисперсных частиц, которые повышают степень переохлаждения расплава и создают условия для образования мелкодисперсной структуры слитка или отливки.

Известны способы воздействия на кристаллическую структуру сплавов, связанные с применением модификаторов из изоморфных кристаллов того же металла. Этому способствует то, что интенсивность зарождения центров кристаллизации резко возрастает при образовании частиц, обладающих структурным сходством с затвердевающим сплавом. При этом желательно,

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		39

чтобы образование продуктов реакции, способствующих образованию центров кристаллизации, происходило одновременно с формированием.

Основные характеристики при вводе дисперсных частиц:

– Размер частиц. Точный размер частиц, начиная с которого его называют порошком, не определен. Обычно под высокодисперсными частицами понимают частицы размером не более 100 мкм. Форма частиц порошка может быть самой разнообразной. В связи с таким разнообразием форм частиц, очень трудно определять размеры частиц. Поэтому введена стандартная характеристика размера частицы – диаметр эквивалентной сферы (ДЭС), т.е. диаметр такой сферы, объем которой равен объему частицы. Средний размер частиц наиболее часто применяемых наполнителей может меняться от нескольких нанометров (ДЭС аэросила А300=7 нм, ДЭС технического углерода П267=28 нм) до нескольких десятков микрометров (ДЭС силикагеля ИКТ-97=45 мкм, ДЭС мела L1=120 мкм). Размеры частиц могут быть измерены при помощи ситового анализа – сухого для крупных частиц и мокрого – для частиц, размеры которых меньше 150 мкм.

– Форма частиц большинства наполнителей различается чрезвычайно сильно. Наполнители могут иметь сферические (стеклосферы), кубические (кальцит), призматические (полевошпат, оксид бария), пластинчатые, чешуйчатые (каолин, слюда, тальк, графит) или игольчатые (силикат кальция, древесная мука) частицы. Кроме этого, многие наполнители имеют настолько сложную форму частиц, что ее невозможно описать любой простой классификацией. Формы и основные параметры частиц наполнителя.

### 2.3.1 Общая характеристика процесса смешения

Композиционный материал представляет собой дисперсионную среду, в которой распределена дисперсная фаза. Для достижения равномерного распределения частиц дисперсной фазы в полимерной матрице, как правило, прибегают к процессу смешения. Поэтому понимание закономерностей этого процесса очень важно при создании композиционных материалов.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Смешение – это механический процесс распределения исходных компонентов по всему объему системы. Со статистической точки зрения смешение – это механический процесс, целью которого является превращение исходно системы, характеризующейся определенным упорядочением в расположении компонентов, в систему с неупорядоченным, статистически случайным распределением. При смешении на смесь действует напряжение сдвига, которое вызывает в системе сдвиговые деформации и перемещение частиц относительно друг друга. Направление сдвиговой деформации в процессе смешения изменяется, в результате происходит распределение частиц дисперсной фазы по объему. Идеальной называется смесь, в любой точке которой вероятность присутствия каждого компонента остается постоянной. Однако из-за большого числа факторов, действующих при смешении, идеального смешения в гетерогенной системе достигнуть нельзя.

Способы смешения полимеров с дисперсными наполнителями. Для получения композиционного материала на основе полимера и дисперсного наполнителя надо не только равномерно распределить и хорошо диспергировать наполнитель в полимерной матрице, но и обеспечить условия образования прочной адгезионной связи между полимером и наполнителем. Образование такой связи возможно только в условиях хорошего смачивания поверхности наполнителя полимером. Для этого полимер на одной из стадий процесса приготовления КМ должен находиться либо в вязкотекучем, либо в растворенном состоянии.

Известны следующие наиболее распространенные способы получения ПКМ с дисперсным наполнителем:

1. Смешение наполнителя с полимером, находящемся в вязкотекучем состоянии;
2. Смешение раствора полимера с наполнителем с последующим удалением растворителя;

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

3. Введение наполнителя в латекс полимера с последующей коагуляцией смеси и удалением воды;

4. Введение наполнителя в мономер с последующей полимеризацией мономера (полимеризация мономера в присутствии наполнителя);

5. Смешение порошков полимера и наполнителя с последующим переводом полимера в вязкотекучее состояние нагреванием.

Основное требование, которое предъявляется к любой полимерной композиции, – это высокая однородность всех ее физических и химических характеристик. Такая однородность свойств может быть достигнута только при равномерном распределении всех компонентов по объему. Концентрация веществ в различных точках материала величина статистически случайная.

### 2.3.2 Повышения качества диспергирования наполнителя

Для достижения высоких деформационно-прочностных свойств у ПКМ в большинстве случаев необходимо диспергировать агломераты наполнителя до размеров менее 0,1 мкм. В связи с этим важно знать приемы и методы интенсификации процесса диспергирования наполнителя. Эти приемы вытекают из проведенного выше анализа процесса смешения. Наиболее простой способ интенсификации диспергирования наполнителя – это повышение напряжения сдвига, действующего на материал в смесителе. Этого можно достичь увеличением скорости сдвига. Но повышение скорости сдвига ограничено конструкцией смесителя и вызывает быструю деструкцию полимера. Другой прием улучшения качества диспергирования наполнителя в полимерной матрице – это введение ПАВ. ПАВ значительно легче проникает в зазоры между частицами агломерата и способствует их разрушению. Кроме того, ПАВ облегчает смачивание поверхности наполнителя полимером и тем самым облегчает процесс смешения. Однако, как показывает опыт, ПАВ эффективно способствует диспергированию агломератов наполнителя только в низкомолекулярных средах, а в полимерной среде эффективность ПАВ невелика. Третий прием улучшения качества диспергирования агломератов наполнителя –

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		42

это предварительное получение концентрата наполнителя в полимере с последующим разбавлением концентрата полимером до необходимого содержания наполнителя. Этот прием основан на следующих принципах. Введение наполнителя вызывает существенное возрастание вязкости полимера. Если в полимер ввести довольно много наполнителя, то из-за высокой вязкости полученного концентрата в нем при смешении будут действовать высокие напряжения сдвига. Это обеспечивает быстрое и качественное диспергирование наполнителя в концентрате. После этого путем разбавления концентрата новыми порциями полимера можно получить необходимую концентрацию уже диспергированного наполнителя в полимере. Концентрация высокодисперсных наполнителей, таких как тех.углерод, пигменты, белая сажа, в концентрате составляет обычно 15-30 об. % (30-70 мас. %). Концентрат с очень высоким содержанием наполнителя (25-30 об.%) называют суперконцентратом. Однако этот метод применим только к полимерам со сравнительно невысокой вязкостью (некоторые термопласты) и если требуемая в полимере концентрация наполнителя не очень высока. В ПКМ с высокой степенью наполнения и на основе полимеров с очень высокой вязкостью, такой прием не применим из-за существенного ухудшения свойств полимеров вследствие интенсивного протекания в них процесса механохимической деструкции.

#### Вывод по разделу

В данном разделе рассмотрены технологические особенности непрерывной разливки стали. Дана характеристика процессу кристаллизации стали. Произведен расчет скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора, а именно для случая всплывания дисперсных частиц в жидко-металлическом расплаве, результатом, которого явилось получения оптимальной скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора в направлении обратном гравитационному полю. Так же в данном разделе описаны основные дефекты заготовок, получаемые при непрерывной разливки, стали. Так же рассмотрены улучшения стали, путём введения дисперсных частиц.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

### 3 РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВКИ МЕТОДОМ ВЫТЯГИВАНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ ОБРАТОМ ГРАВИТАЦИОННЫМ СИЛАМ

Метод вытягивания обрaтом гравитационным силам основан на непрерывные разливки стали, поэтому за основу конструкции установки будет использована машина для непрерывного литья заготовки.

Непрерывная разливка стали является самым современным способом разлики и выгодно отличается от разлики стали в изложницы.

Основные преимущества:

- повышенный выход годного металла главным образом за счет уменьшения обрези;
- возможность получения заготовок, пригодных для прокатки на листовых и сортовых станах, и устранение при этом из технологической линии обжимных станов (слябингов и блюмингов);
- возможность автоматизации процесса и оборудования непрерывной разлики.

Непрерывная разливка стали осуществляется на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и может применяться во всех сталеплавильных производствах. Наибольшее распространение непрерывная разливка получила в конвертерных цехах.

По конструкции МНЛЗ для разлики стали делятся на вертикальные, радиальные и криволинейные (ведется разработка горизонтальных МНЛЗ). Более современную конструкцию имеют радиальные и криволинейные МНЛЗ. Особенностью таких машин является изгиб с определенным радиусом кристаллизатора, формирующего соответственно изогнутый слиток. После выхода из кристаллизатора слиток попадает в жесткий направляющий канал вторичного охлаждения, состоящий из роликовых секций, и проходит в процессе кристаллизации 1/4 окружности. Радиус окружности выбирается таким, чтобы слиток при переходе в горизонтальное положение не содержал жидкой фазы.

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР					44

Особенностью криволинейных МНЛЗ является изгиб слитка с переменным радиусом. После перехода в горизонтальное положение непрерывно литой слиток выпрямляется в правильно-тянущих клетях и разрезается на мерные заготовки.

### 3.1 Классификация установок для непрерывного литья заготовки

Непрерывная разливка стали условно можно разделить на шесть основных типов: с вертикальным кристаллизатором (установки 1-3), с криволинейным кристаллизатором (установки 4, 5), с горизонтальным кристаллизатором (6). На рисунке 9 показаны основные схемы МНЛЗ:

Рисунок 9 – Принципиальные схемы установок непрерывной разливки стали: 1 – вертикального типа; 2 – вертикального типа с изгибом; 3 – с вертикальным кристаллизатором с короткой вертикальной частью и последующим изгибом по определенному радиусу; 4 – радиального типа; 5 – с изогнутым кристаллизатором и возрастающим радиусом изгиба (криволинейного типа); 6 – горизонтального типа; С – зона порезки заготовки; S – конец затвердевания

Если из металла одной плавки получают один слиток (одну заготовку), который затем извлекают, то разливку принято называть полу-непрерывной. По форме кристаллизатора машины делятся на: блюмовые (крупное прямоугольное сечение), сортовые (мелкое квадратное или круглое сечение), слябовые (прямоугольного сечения с узкой гранью).

#### 3.1.1 МНЛЗ вертикального типа

Технологическая ось вертикальной МНЛЗ расположена вертикально. Разливка, кристаллизация и охлаждение НЛЗ проводится по стандартной технологии.

Преимущества радиальных МНЛЗ перед вертикальными заключаются в том, что металлургическая длина машины при том же ферростатическом

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		45

давлении увеличивается примерно в 1,5 раза, вследствие чего уменьшается высота машины, возрастает скорость разливки и производительность агрегата. Кроме того, выдача заготовки на холодильник осуществляется в горизонтальной плоскости.

Недостатки таких МНЛЗ относятся, главным образом, к качеству заготовки, которое, как правило, несколько ниже, чем у заготовок, отлитых на вертикальной машине. Это объясняется всплыванием неметаллических включений в кристаллизатор к стенке малого радиуса и возможным появлением внутренних трещин, возникающих при разгибе заготовки. Последний недостаток в значительной степени устраняется путем применения системы многоточечного разгиба. В настоящее время радиальные МНЛЗ используются преимущественно для получения сортовой и блюмовой заготовки.

Основной недостаток вертикальных МНЛЗ – ограничение скорости разливки или сечения слитка значит, и производительности установки. Поскольку затверждение должно закончиться до входа слитка в тянущую клеть и зону резки, то увеличение глубины лунки жидкого металла при повышении скорости (или сечения) ведет к необходимости повышать металлургическую длину МНЛЗ – большая высота.

Современные машины вертикального типа достигают высоты 40-43 м. Их сооружение требует или большого заглубления – до 25-27 м. ниже уровня пола цеха, или строительства высоких зданий. И в том и в другом случае с увеличением высоты установки резко возрастают капитальные затраты, усложняются их эксплуатация и технологический процесс разливки. На рисунке 10 показана схема вертикального МНЛЗ.

Рисунок 10 – Схема МНЛЗ вертикального типа: 1 – промежуточный ковш; 2 – кристаллизатор; 3 – зона вторичного охлаждения; 4 – тянущие валики; 5 – зона резки

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		46

### 3.1.2 МНЛЗ горизонтального типа

Создание установок горизонтального типа позволяет решать ряд как экономических, так и организационных проблем:

- 1) Снижение капитальных затрат;
- 2) Возможность размещения установок в действующих цехах, так как для этого не требуется строительство колодцев и башен;
- 3) Уменьшение эксплуатационных затрат благодаря удобству обслуживания, так как все оборудование расположено на уровне пола цеха;
- 4) Возможность совмещения установки непрерывной разливки с прокатным станом.

Горизонтальные МНЛЗ лучше выполнять наклонными. Некоторый наклон улучшает условия удаления газов из кристаллизатора при заливке первой порции металла, а также улучшает процесс окончания разливки. При строго горизонтальном положении кристаллизатора и опускании в конце разливки уровня мениска в металлоприемнике до верхней образующей кристаллизатора необходим этап прекращения разливки и ожидания полного затвердевания слитка.

В настоящее время в мире работают десятки горизонтальных МНЛЗ различных конструкций. Наиболее распространены конструкции, у которых процесс получения заготовки основан на принципе периодического ее вытягивания из неподвижного кристаллизатора. На рисунке 11 показана схема горизонтальной МНЛЗ.

Рисунок 11 – Схема горизонтальной МНЛЗ конструкции: 1 – металлоприемник; 2 – пористая пробка для продувки металла инертным газом; 3 – кристаллизатор; 4 – индуктор

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

### 3.2 Установка для вытягивания отливки методом в направлении обратом силы гравитации

Основной технологической функцией любой МНЛЗ является перевод стали из жидкого состояния в твердое с приданием получаемой заготовке определенной геометрической формы и обеспечением качественных показателей ее поверхности и внутренней структуры, регламентируемых соответствующими техническими условиями.

Для достижения твердого состояния заготовки необходимо отвести некоторое количество тепла в окружающую среду в течение определенного времени. Для нормального процесса охлаждения необходимо обеспечить движение заготовки с определенной скоростью при регламентированном отводе тепла (охлаждение водой).

Принцип работы установки для получения отливки методом вытягивания в направлении обратом гравитационным силам:

Упрочняемый расплав 7 подает из ковша 2 в литниковую систему 4, по литниковой системе 4, упрочняемый расплав 7 достигает уровня кристаллизатора 5 и начинает происходить процесс кристаллизации. В процессе кристаллизации, упрочняемый расплав 7 переходит в твердое состояние, тем самым закрепляется в механизме обратной вытяжки 8. Закрепление в механизме обратной вытяжки 8 происходит за счет того, что на фланце тягового механизма 6 имеется выточка, в виде «Ласточкиного хвоста», и при кристаллизации расплава, в заготовке появляется ответная часть за счет которого и происходит «вытягивание» заготовки. На рисунке 11 показана схема закрепления металла к тяговому механизму. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 12.

Установка для получения отливки методом вытягивания в направлении обратом гравитационным силам состоит:

1) Литниковая система, представляет собой 4 неметаллических блока, показанных на рисунке 12;

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		48

Рисунок 12 – Схема установки: 1 – дозатор; 2 – ковш; 3 – промежуточный ковш с подогревом; 4 – центровая; 5 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 6 – мелкодисперсные твердые тугоплавкие частицы; 7 – упрочняемый расплав; 8 – механизм обратной вытяжки

Рисунок 13 – Схема закрепления расплав к механизму обратной вытяжки

Рисунок 14 – Литниковая система

2) Рама, предназначена для удержания и фиксирования всех элементов установки, показана на рисунке 15. На раме расположены уголки для направления и фиксации литниковой системы. Предусмотрены отверстия под болты фиксации. Спроектирован способ крепления кристаллизатора к раме.

Рама выполнена из профильной трубы 50×50×3 мм. Направляющие литниковой системы выполнены из уголка 30×30×3 мм. Дно рамы выполнено из листа толщиной 5 мм и габаритами 750×450 мм;

Рисунок 15 – Рама

3) Пластины, предназначены как проставки между блоками литниковой системы и болтами, для равномерного распределения сил, которые создают болты для фиксации. Пластинки выполнены из листа толщиной 5 мм. На рисунке 16, показаны пластины для распределения силы;

Рисунок 16 – Пластины

4) Болты для фиксации, предназначены для фиксирования и регулирования расположения литниковой системы. Регулирование происходит относительно кристаллизатора. На рисунке 17 – показан болт для регулировки;

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		49

## Рисунок 17 – Болт

5) Механизм обратной вытяжки, предназначен для вытягивания заготовки из кристаллизатора. Состоит из фланца и рым болта ГОСТ 4751-53. Фланец, представляет из себя вал с двумя ступенями на торцах, у которого имеется паз в виде «ласточкиного хвоста» и отверстие под рым болт. Фланец предназначен для закрепления заготовки. Рым болт предназначен для вытаскивания заготовки из кристаллизатора. Фланец и рым-болт зафиксированы с помощью резьбы. Рым болт закреплен с помощью троса с электродвигателем, который выступает в роли тяговой мощности. На рисунке 18 показан фланец в сборе. Фланец показан на рисунке 19;

## Рисунок 18 – Фланец в сборе

## Рисунок 19 – Фланец крепления

6) Ребра жесткости, предназначены для усиления конструкции рамы. Выполнены из листа толщиной 5 мм. На рисунке 20, показано одно из ребер жесткости;

## Рисунок 20 – Ребро жесткости

7) Мотор–редуктор DVR 063/130 выполняет роль тяговой силы для всей установки. Мотор-редуктор выпускается в виде компактного редуктора с цилиндрической предступенью, опция разработана для высокой модульности конструкции. Небольшое число базовых моделей может быть применено к

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

большому количеству мощностей, что гарантирует высокую производительность.

Главные преимущества серии DRV:

– Редуктор изготовлен из высококачественного алюминиевого сплава, нержавеющей и легкие по весу.

– Высокий крутящий момент.

– Низкий уровень шума и бесперебойная надежная работа.

– Высокие эксплуатационные характеристики

– Легкое техническое обслуживание.

Технические характеристики сведены в таблицу 6.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		51

Таблица 6 – Технические характеристики мотор-редуктора DVR 063/130

Мощность двигателя, кВт	Частота вращения выходного вала, об/мин	Крутящий момент, Н·м	Сервис-фактор	Передаточное число	Двигатель, ИЕС	Радиальная нагрузка, Н
0,25	0,6	1624	1,0	2400	71A4	13500
	0,47	1935	0,8	3000		13500
	0,35	2046	0,6	4000		13500
	0,28	2430	0,5	5000		13500
0,37	0,9	1674	1,1	1500	71B4	13500
	0,78	1887	0,9	1800		13500
0,55	2,8	996	1,6	500	80A4	13500
	1,9	1471	1,2	750		13500
	1,2	2132	0,8	1200		13500
0,75	2,8	1358	1,1	500	80B4	13500
	2,3	1631	1,0	600		13500
	1,9	2005	0,9	750		13500
	1,6	2283	0,8	900		13500
1,1	4,7	1312	1,3	300	90S4	13500
	3,5	1671	1,0	400		13500
	2,8	1991	0,8	500		13500
1,5	9,3	915	1,9	300	90S2	13500
	7,0	1166	1,4	400		13500
	5,6	1389	1,1	500		13500
	4,7	1789	1,0	300	90L4	13500
	3,5	2279	0,7	400		13500

На рисунке 21 показан мотор-редуктор DVR 063/130.

## Рисунок 21 – Мотор-редуктор DVR 063/130

Основываясь на рассмотренных данных, в разделе два, была спроектирована установка для непрерывного литья заготовки, методом вытягивания в направлении обратом гравитационным силам. На рисунке 22 показана 3-D модель установки.

## Рисунок 22 – 3-D модель установки

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		53

## Вывод по разделу

В данном разделе была описана основная классификация машин непрерывного литья заготовки. Более подробно рассмотрены машины непрерывного литья вертикального и горизонтального типа, на основе которых была разработана экспериментальная установка для получения отливки методом вытягивания в направлении обратом гравитационным силам.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		54

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выпускной квалификационной работы:

1. Рассмотрена научная литература, в разделе модифицирование сплавов дисперсными частицами. Описаны основные характеристики, методы получения и методы введения дисперсных частиц в сталь.

2. Разработана технология для получения отливки методом вытягивания в направлении обратом гравитационным силам. Описан процесс кристаллизации стали. Выявлены основные дефекты стали при производстве на машине непрерывного литья заготовки. Изучены методы улучшения стали дисперсными частицами. Выполнен расчет основной характеристики скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора.

3. Разработана установка для получения отливки методом вытягивания в направлении обратом гравитационным силам. Рассмотрена основная классификация установок для непрерывного литья заготовки. Разобраны МНЛЗ вертикального типа и МНЛЗ горизонтального типа. Описаны основные составляющие разработанной установки. Подобран мотор-редуктор для экспериментальной установки.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		55

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Задиранов А.Н. Теоретические основы кристаллизации металлов и сплавов / А.Н. Задиранов, А.М. Кац. – М.: Издательство Российского Университета дружбы народов, 2007. – 228 с. – ISBN 978-5-209-02785-0.

2. Леках С.Н. Внепечная обработка высококачественных чугунов в машиностроении / С.Н. Леках, Н.И. Бестужев. – Минск: Наука и техника, 1992. – 269 с.

3. Ермакова В.П. Микроструктура комплексного кремнийсодержащего модификатора / В.Г. Смирнова, С. Ю. Мельчаков, В.В. Катаев, О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов // Физика. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019. – С. 18–28.

4. Фейлер С.В. Обоснование выбора инокуляторов и технологии подачи материала при модифицировании стали в процессе непрерывной разливки / С.В. Фейлер, А.Н. Черепанов, Е.В. Протопопов, Р.Ф. Калимуллин // Черная металлургия – 2012. – №12. – С. 64–67.

5. Протопопов Е.В. Перспективные технологии модифицирования металла нанопорошковыми частицами / Е.В. Протопопов, В.П. Комшуков, Л.А. Ганзер, Д.Б. Фойгт // Черная металлургия – 2011. – №4. – С. 39–44.

6. Протопопов Е.В. Модифицирование металла нанопорошковыми инокуляторами на сортовой МНЛЗ для повышения качества проката / Е.В. Протопопов, Ю.А. Селезнев, А.Н. Черепанов, В.Я. Чинокалов, Л.А. Ганзер, Д.В. Фойгт // Черная металлургия – 2013. – №6. – С. 33–35.

7. Крючков О. Б. Повышение качества стальных отливок / О. Б. Крючков, Ю. Ю. Турапин, Д. Г. Ситников // Известия ВолгГТУ – 2018. – С. 137–140.

8. Лазорова Р. Свойства стали 110Г13Л и чугуна СЧ 25, модифицированных нанопрошками тугоплавких соединений / Р. Лазорова, П. Кузманов, Р. Димитрирова, А. Черепанова, В. Манолов // Черная металлургия – 2012. – №4. – С. 17–20.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

9. Гаврилин И.В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов / И.В. Гаврилин. – Владимир: Владим.гос. ун-т, 2000. – 260 с.

10. Гольдштейн Я.Е. Инокулирование железоуглеродистых сплавов / Я.Е. Гольдштейн, В.Е. Мизин. – М.: Metallurgia, 1993. – 416 с.

11. Непрерывная разливка сортовой заготовки: Монография. / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкорытов, В.Е. Ухин, А.В. Кравченко, А.Ю. Оробцев. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417 с.

12. Губин С.П. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства / С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков // Успехи химии 74 – 2005. – №6. – С. 539–569.

13. Жучков В.И. Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей / В.И. Жучков, О.Ю. Шешуков, Е.Ю. Лозовая, Л.А. Маршук // Доклады Литейного консилиума № 1, состоявшегося с 5 по 8 декабря 2005 года. ред.: Панов А.Г., Корниенко А.Е. изд-во: ИЦМ – Челябинск – 2006. – С. 52–60.

14. Чуманов В.И. Упрочнение стали тугоплавкой дисперсной фазой / В.И. Чуманов, Д.А.Пятыгин, И.В. Чуманов // Черная металлургия – 2012. – №4. – С. 17–20.

15. Чуманов В.И. К вопросу создания композиционных металлических материалов с задаваемым комплексом механических и физических свойств за счет введения мелкодисперсных фаз с различной удельной плотностью / В.И. Чуманов, А.Н. Аникеев, И.В. Чуманов // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции Секции технических наук. – 2018. – С. 1324–1331.

16. Непрерывная разливка стали на радиальных установках / В.Т. Сладкошteeв, Р.В. Потанин и др. // М.: Metallurgia. – Москва. – 1974. – 286 с.

17. Лукин С.В. Совершенствование режимов затвердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков / С.В. Лукин, Н.И. Шестаков, Ю.В. Антонова // Metallurg. – 2014. – № 6. – С. 26–30.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		57

18. Куклев А.В. Совершенствование охлаждения непрерывной заготовки / А.В. Куклев, В.В. Тиняков, Ю.М. Айзин и др. // Сталь. – 1998. – № 8. – С. 20–21

19. Буланов Л.В. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л.В. Буланов, Л.Г. Корзунин, Е.П. Парфенов и др.: Уральский центр ПР и рекламы «Марат». – 2004. – 349 с.

20. Борисов В.Т. Об оптимальных условиях охлаждения непрерывного слитка при изменении скорости его вытягивания / В.Т. Борисов, Л.А. Соколов // Известия АН СССР. Металлы. – 1979. – № 1. – С. 124–129.

21. Анализ текущего состояния и перспективы модернизации машины непрерывного литья заготовок № 3 на руп «Белорусский металлургический завод» / В.А. Маточкин, В.Э. Марушкевич, О.П. Красюк // Литье и металлургия – 2009. – №2. – С.144–146 .

22. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев // – М. Металлургия, 1975. – 368 с.

					22.04.02.2021.852.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		58

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Конструкторская документация на экспериментальную установку

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Техническая документация, присоединительные и габаритные размеры  
мотор-редуктора