

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»
Направление подготовки «Металлургия»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент, начальник КТО
ООО «ВЕЗА»
_____ К.С. Федосеев
«__» _____ 2021 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
проф., д.т.н.
_____ И.В. Чуманов
«__» _____ 2021 г.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТОЙ
ЗАГОТОВКИ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 12Х18Н10Т ТИПА «СТАКАН»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР

Технологический контроль
доцент, к.т.н.
_____ А.В. Рябов
«__» _____ 2021 г.

Руководитель работы
профессор, д.т.н.
_____ И.В. Чуманов
«__» _____ 2021 г.

Нормоконтролер
инженер
_____ В.В. Седухин
«__» _____ 2021 г.

Автор работы
студент группы ФТТ-250
_____ Н.Р. Садыкова
«__» _____ 2021 г.

г. Златоуст 2021 г.

АННОТАЦИЯ

Садыкова Н.Р. Технология получения центробежнолитой заготовки из стали марки 12Х18Н10Т типа «стакан». – Златоуст: ЮУрГУ, кафедра ТнТПМ; 2021, – 61 с., 22 ил., 6 табл., библиогр. список – 28 наим..

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы изучена технология получения центробежнолитой заготовки из стали марки 12Х18Н10Т типа «стакан» в соответствии с техническими требованиями на литую деталь.

Рассмотрены методы введения дисперсных частиц в расплав и методы производства металлических (или композиционных) материалов, получаемых введением дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав.

В работе описан эксперимент по получению образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов с разливкой во вращающуюся форму и введением дисперсных частиц при разливке на центробежно-литой машине вертикального типа. Также приведено исследование полученных образцов.

Пояснительная записка подкреплена соответствующими иллюстрациями и презентацией.

| | | | | | | | | | |
|-----------|---------------|----------|---------|---|--|--|--|------|--------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | | |
| Разраб. | Садыкова Н.Р. | | | | Технология получения центробежнолитой заготовки из стали марки 12Х18Н10Т типа «стакан» | | | | |
| Провер. | Чуманов И.В. | | | Лит. | | | | Лист | Листов |
| Реценз. | Федосеев К.С. | | | | | | | 6 | 61 |
| Н. Контр. | Седухин В.В. | | | ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте Кафедра ТнТПМ | | | | | |
| Утверд. | Чуманов И.В. | | | | | | | | |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Состояние вопроса | 13 |
| 1.1 | Обзор литературных источников | 13 |
| 1.2 | Получение отливок центробежным литьем | 14 |
| 1.2.1 | Сущность метода..... | 15 |
| 1.2.2 | Оборудование и инструменты | 17 |
| 1.2.3 | Кристаллизация стали при центробежном литье | 18 |
| 1.2.4 | Силы, действующие на инородные частицы в расплаве | 19 |
| 1.3 | Процессы распределения дисперсных частиц по объему кристаллизующегося металла | 20 |
| 2 | Анализ существующих методов введения дисперсных частиц в расплав и методов производства металлических (или композиционных) материалов, получаемых введением дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав, обеспечивающие управление распределением вводимых частиц | 22 |
| 2.1 | Введение дисперсных частиц при центробежном электрошлаковом литье.. | 22 |
| 2.2 | Введение дисперсных частиц в слиток на стадии разливки сверху | 25 |
| 2.3 | Введение дисперсных частиц в металл при непрерывной разливке | 27 |
| 2.4 | Введение дисперсных частиц в металл при вытягивании заготовки в направлении, обратном гравитационному полю | 29 |
| 2.5 | Введение дисперсных частиц при центробежном литье | 30 |
| 3 | Получение экспериментальных образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов с разливкой во вращающуюся форму и введением дисперсных частиц при разливке на центробежно-литой машине вертикального типа | 33 |
| 4 | Исследование полученных образцов | 37 |
| 4.1 | Подготовка образцов из исследовательских образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов к металлографическому исследованию | 37 |
| 4.2 | Металлографические исследования исследовательских образцов..... | 44 |

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 7 |

| | |
|---|----|
| 4.3 Исследование физико – механических свойств экспериментальных образцов | 46 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 51 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 52 |

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 8 |

ВВЕДЕНИЕ

Любую машину собирают из деталей (элементарных частей), изготовленных без применения сборочных операций и приспособлений. Надежность и долговечность машины зависит от качества деталей, из которых она собрана. Качество детали в основном определяется заготовкой, которую получают тем или иным методом: литьем, сваркой, обработкой резанием или обработкой давлением, ковкой, объемной или листовой штамповкой.

В современном машиностроении детали (заготовки) делают из металлов и сплавов, а также из неметаллических (пластмасс, резины, древесины, керамики) и порошковых материалов.

Методы формообразования при производстве деталей машин подразделены на четыре вида:

- литейное производство;
- обработка давлением;
- сварка;
- обработка резанием.

Особенности технологических методов производства заготовок влияют на конструкцию, кинематические и прочностные данные отдельных деталей и механизмов. Вариантность любого технологического процесса определяется многими факторами (назначением детали, размерами, массой, количеством деталей, материалом и их строением).

Литейное производство – отрасль машиностроения, изготавливающая заготовки или отливки и это технологический процесс изготовления фасонных деталей или заготовок заливкой расплавленного металла заданного химического состава в литейную форму, полость которой имеет конфигурацию заготовки или детали. При охлаждении после затвердевания залитый металл сохраняет конфигурацию полости формы. Отливки могут быть деталями или заготовками, которые в дальнейшем подвергаются обработке.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 9 |

Литейное производство позволяет получать разнообразные по конфигурации и свойствам фасонные отливки из чугуна, стали и из сплавов цветных металлов. Высокие механические и эксплуатационные свойства отливок обуславливают их широкое применение в различных отраслях промышленности. Литьем изготавливают отливки, как простой, так и сложной формы, которые нельзя получить другими технологическими методами.

Важной задачей литейного производства является получение отливок, по форме и размерам приближающихся к готовой детали, что существенно сокращает обработку резанием.

В проблеме улучшения качества отливок важными факторами являются повышение точности размеров, уменьшение шероховатости поверхности и увеличение коэффициента использования жидкого металла. Литейная форма является основным элементом литейной технологии. Качество формы гарантирует качество отливки. Технологический процесс изготовления отливки отвечает определенным техническим и технико-экономическим требованиям.

Технические – регламентируются чертежом детали, техническими условиями на химический состав и механические свойства сплава, геометрической формой и размерами отливки, способами выявления и исправления литейных дефектов.

Технологический процесс должен отвечать и технико-экономическим требованиям снижения затрат труда, средств и материалов на изготовление отливки [1].

Целью выпускной квалификационной работы является получение заготовки типа «стакан» из стали марки 12Х18Н10Т методом центробежного литья и введение дисперсных частиц для повышения стойкости изделия при агрессивном воздействии среды эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

- выявить и проанализировать литературные источники по теме ВКР;
- рассмотреть способы введения в жидкий расплав дисперсных частиц, обеспечивающий их прогнозируемое распределение в объеме кристаллизующегося металла;

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 10 |

– исследовать распределение дисперсных частиц в объеме закристаллизовавшихся центробежно-литых стальных заготовок;

– провести комплексную оценку влияния дисперсных тугоплавких частиц на физико-механические свойства полученных заготовок;

– подготовить доклад и презентацию в Microsoft PowerPoint.

Актуальность темы заключается в том, что данная технология позволяет получать металлопродукцию типа «стакан», упрочненную введенными в металл твердыми тугоплавкими частицами в процессе центробежного литья. Получение изделия таким способом экономически более выгодно и более технологично, чем использование металлообработки и получения изделия из цельной заготовки.

Развитие добычи минерально-сырьевых ресурсов, металлургии, тяжелого машиностроения, вызвало необходимость использования сталей, обладающих такими механическими свойствами, при которых они способны работать в условиях повышенного абразивного износа при высоких нагрузках. Зачастую, повышенные механические свойства требуются только от поверхностных слоев стали, поскольку именно они подвергаются различным физическим воздействиям. В настоящее время увеличение значений механических свойств металлов достигается либо за счет их легирования в значительных количествах, либо за счет применения различного рода обработок поверхностных слоев (наплавки, напайки, лазерной и плазменной обработки и т.д.).

Альтернативой использованию дорогостоящих легирующих элементов и технологическим обработкам могут служить дисперсно-упрочненные стали – то есть стали, содержащие твердые тугоплавкие мелкодисперсные частицы карбидов, оксидов, нитридов. Такие стали обладают повышенными значениями износостойкости, предела прочности, модуля упругости и жаростойкости, пониженной склонностью к трещинообразованию, по сравнению со сталями того же химического состава, не имеющими дисперсных частиц. Получение дисперсно-упрочненных сталей основано на введении твердых дисперсных частиц в расплав на стадии разливки. Однако, в связи с тем, что вводимые частицы и упрочняемая сталь имеют различную удельную плотность,

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 11 |

распределение вводимых частиц по объему получаемой стали неравномерно, непрогнозируемо и сложно управляемо. В связи с этим, широкого применения дисперсно-упрочненные стали в промышленности не получили [2].

В изготовлении заготовки в качестве материала используется коррозионностойкая нержавеющей сталь 12Х18Н10Т.

Практическая значимость работы. Рассмотрен способ упрочнения центробежнолитых стальных заготовок путем введения дисперсных частиц в процессе центробежного литья.

Выпускная квалификационная работа состоит из следующих разделов: задание, аннотация, оглавление, введение и основная часть. Основная часть включает в себя аналитическую, исследовательскую и экспериментальную части, где, соответственно, рассматривается обзор литературных источников, методы введения дисперсных частиц в расплавы на основе различных технологий, эксперимент по получению образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов с разливкой во вращающуюся форму и введением дисперсных частиц при разливке на центробежно-литой машине вертикального типа, исследование дисперсно-упрочненных металлических материалов. Кроме этого выпускная квалификационная работа содержит заключение, библиографический список. В ходе работы сделаны выводы и заключение по теме выпускной квалификационной работы.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 12 |

1 Состояние вопроса

1.1 Обзор литературных источников

Литейное производство является одной из важнейших отраслей отечественного машиностроения. В настоящее время в России насчитывается около 1650 литейных предприятий, которые, по экспертной оценке, произвели в 2015 году 7,68 млн. тонн отливок, в том числе из чугуна – 5,28 млн. т, из стали – 1,3 млн. т, из цветных сплавов – 1,1, млн. т [3].

Объёмы производства литых заготовок находятся в пропорциональной зависимости от объёмов производства машиностроительной продукции, так как доля литых деталей в автомобилях, тракторах, комбайнах, танках, самолётах и других машинах составляет 40...50 %, а в металлорежущих станках и кузнечнопрессовом оборудовании доходит до 80 % массы и до 25 % стоимости изделия, но не смотря на повсеместное применение литых изделий, на сегодняшний день практически все литейные предприятия требуют обширной модернизации.

Обладая теоретическим преимуществом в 36 % от цены конечной продукции благодаря низкой стоимости сырья, энергии и труда, российская литейная промышленность съедает это преимущество за счет расточительного использования ресурсов. Вследствие чего, российской литейной отрасли сложно конкурировать на внешних рынках за счет соотношения цена-качество: цена приближается к уровню европейских производителей, а качество зачастую не соответствует стандартам.

Только немногие российские предприятия имеют опыт и экспортируют свою продукцию за пределы стран СНГ. Из-за этого с этим российские предприятия до сих пор не испытывали потребности в следовании жестким системам качества. Доля брака на российских литейных предприятиях значительно варьируется и может составлять от доли процента на ведущих производствах до 15...30 % в среднем по отрасли. По сравнению с европейскими предприятиями уровень брака в России (в процентном отношении к выпускаемой продукции) в 2 раза выше.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 13 |

Однако зарубежные требования к качеству значительно превышают российские. Это означает, что, если бы российское литье проходило проверку на качество по европейским стандартам, уровень брака был бы в среднем в 4 раза выше.

В России в основном все предприятия имеют низкий уровень автоматизации и механизации, обширно используется ручной метод формовки, изготовление отливок как правило происходит в песчано-глинистые формы, уровень загрязнений на предприятиях далек от стандартов [4].

Реализовать стратегические возможности повышения конкурентоспособности и рентабельности можно за счет модернизации старых и создания новых предприятий, используя современные технологии изготовления готовой продукции и контроля ее качества, а также качества технологического процесса.

В настоящее время развитие производства высококачественных отливок на базе современных технологических процессов в различных отраслях машиностроения осуществляется неравномерно. Наиболее высокие объемы производства отливок наблюдаются в транспортном (автомобильном, железнодорожном и коммунальном) машиностроении, тяжелом и энергетическом машиностроении и оборонной промышленности.

В существующих условиях для дальнейшего развития литейного производства, реконструкции старых литейных цехов и строительства новых на базе новых технологических процессов и современного экологически чистого оборудования большую роль играет информационная деятельность, которую проводит Российская ассоциация литейщиков.

1.2 Получение отливок центробежным литьем

Центробежное литье применяют в массовом, серийном и единичном производстве отливок из различных сплавов в металлических и песчаных формах. Этим способом отливают трубы, цилиндрические втулки, гильзы автотракторных двигателей, заготовки для поршневых колец, шестерни, шкивы, орудийные стволы, а также получают двухслойные (биметаллические) отливки, поочередно заливая форму различными сплавами. Этот способ литья широко используется в

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 14 |

промышленности, особенно для получения пустотелых отливок (со свободной поверхностью).

Центробежным литьем изготавливают отливки из чугуна, стали, сплавов титана, алюминия, магния и цинка (трубы, втулки, кольца, подшипники качения, бандажи железнодорожных и трамвайных вагонов).

Масса отливок - от нескольких килограммов до 45 тонн. Толщина стенок от нескольких миллиметров до 350 мм. Центробежным литьем можно получить тонкостенные отливки из сплавов с низкой текучестью, что невозможно сделать при других способах литья [5].

1.2.1 Сущность метода

Центробежный метод литья (центробежное литьё) используется при получении отливок, имеющих форму тел вращения. Подобные отливки отливаются из чугуна, стали, бронзы и алюминия. При этом расплав заливают в металлическую форму, вращающуюся со скоростью 3000 об/мин.

Под действием центробежной силы расплав распределяется по внутренней поверхности формы и, кристаллизуясь, образует отливку. Центробежным способом можно получить двухслойные заготовки, что достигается поочередной заливкой в форму различных сплавов. Кристаллизация расплава в металлической форме под действием центробежной силы обеспечивает получение плотных отливок.

Действие центробежных сил оптимизирует питание формирующейся отливки, обеспечивает вывод шлаковых частиц на свободную поверхность заготовки, гарантирует геометрически правильную форму изделий [6].

При этом, как правило, в отливках не бывает газовых раковин и шлаковых включений. Особыми преимуществами центробежного литья является получение внутренних полостей без применения стержней и большая экономия сплава в виду отсутствия литниковой системы. Выход годных отливок повышается до 95 %.

Технология центробежного литья обеспечивает целый ряд преимуществ,

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 15 |

зачастую недостижимых при других способах, к примеру:

- Отливки имеют плотную структуру, высокая плотность металла.
- Центробежные отливки в меньшей степени загрязнены неметаллическими включениями (в изломе отливки редко встречаются шлаковый или песчаный засор и газовые раковины).
- Для образования отверстий в цилиндрических отливках не требуется стержень.
- Отсутствие во многих случаях литниковой системы увеличивает выход годного до 90...95 %
- Возможность получения тонкостенных отливок.
- Производительность труда выше, а условия лучше, чем при литье в разовые формы.
- Центробежным литьем можно получить двухслойные (биметаллические) отливки.
- Высокая износостойкость.
- Отсутствие раковин.

Недостатки, присущие этому способу литья:

- неточность размеров свободных поверхностей отливок,
- повышенная склонность к ликвации компонентов сплава,
- повышенные требования к прочности литейных форм,
- сложность получения точного размера отверстия в отливке, образованного свободной поверхностью. Это объясняется тем, что диаметр отверстия зависит от количества заливаемого в форму металла.
- четко выраженная ликвационная неоднородность сплава по сечению отливки. При заливке, например, свинцовой бронзы, расплав которой представляет эмульсию, во вращающейся форме свинец центробежными силами отбрасывается к периферии, а медь, как более легкая, вытесняется к свободной поверхности. Ликвация может таким образом проявиться настолько сильно, что внутренняя часть отливки окажется медной.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 16 |

- возможность появления дефектов в виде продольных и поперечных трещин, газовых пузырей [7].

1.2.2 Оборудование и инструменты

Оборудование - машины с вертикальной и с горизонтальной осью вращения форм (рисунок 1) [8].

Рисунок 1 – Схема центробежного литья на различных машинах:

- а – с горизонтальной осью вращения: 1 – ковш; 2 – желоб; 3 – форма; 4 – отливка; б – с вертикальной осью вращения: 1 – ковш; 2 – изложница; 3 - расплав

Литейная форма приводится в движение специальной машиной, называемой центробежной. Различают машины с вращением формы вокруг вертикальной и горизонтальной (или наклонной) осей. Если диаметр отливки значительно меньше ее длины (трубы, гильзы, втулки), то ось вращения формы размещают горизонтально. Если же диаметр отливки больше, чем ее высота (колеса, шкивы, шестерни), то ось вращения располагают вертикально. Металлические формы изложницы изготовляют из чугуна и стали. Толщина изложницы в 1,5...2 раза больше толщины отливки. В процессе литья изложницы снаружи охлаждают водой или воздухом. На рабочую поверхность изложницы наносят теплозащитные покрытия для увеличения срока их службы. Перед работой изложницы нагревают до 200°С.

В процессе получения отливок методом центробежного литья, залитый в форму металл подвергается действию центробежных сил. Развитие центробежных сил в металле достигается заливкой металла во вращающуюся форму или приведением формы во вращение непосредственно после заполнения ее металлом.

Скорость вращения форм определяется из условий качества получаемых отливок и устанавливается тем большей, чем меньше диаметр отливки.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 17 |

Применяемые на практике скорости вращения колеблются от 250 до 1500 об/мин.

Под действием центробежных сил металл прижимается к боковой стенке изложницы. Литейная форма вращается до полного затвердевания отливки. После остановки формы отливка 5 извлекается.

Отливки, полученные на машине с вертикальной осью вращения, имеют разностенность по высоте - более толстое сечение в нижней части. Применяют для получения отливок небольшой высоты - коротких втулок, колец, фланцев.

Таким образом, заготовки обладают следующими свойствами:

- отливки имеют плотную структуру, высокую плотность металла;
- практически не загрязнены неметаллическими включениями (в изломе отливки редко встречаются шлаковый или песчаный засор);
- высокая годность заготовок, до 95 %;
- возможность получить двухслойные (биметаллические) отливки;
- высокая износостойкость;
- отсутствие раковин;
- возможна неточность размеров свободных поверхностей отливок;
- наблюдается повышенная склонность к ликвации компонентов сплава;
- сложно получить точный размер отверстия в отливке, образованного свободной поверхностью. Это объясняется тем, что диаметр отверстия зависит от количества заливаемого в форму металла;
- возможно наличие дефектов в виде продольных и поперечных трещин, газовых пузырей [7].

1.2.3 Кристаллизация стали при центробежном литье

Кристаллизация стали при центробежном литье происходит по сложному принципу из-за циркуляции воздуха у свободной поверхности расплава. В толщине будущей заготовки возникают конвективные потоки, за счет чего охлажденные и имеющие большую плотность порции расплава со свободной поверхности перемещаются вглубь формирующегося тела заготовки. Взамен из толщины тела отливки на свободную поверхность выходят горячие порции

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 18 |

расплава.

Затвердевание происходит от внешней поверхности к внутренней, кристаллы металла растут в направлении поступления новых порций расплава в условиях высокого избыточного давления. Расплав в таких условиях проникает в образующуюся кристаллическую решетку, предупреждая образование ледебуритной сетки, придающей металлу хрупкость. При центробежном литье стали карбиды образуют замкнутые конгломераты-зерна, что при использовании других методов литья может достигаться только проковкой изделия [9].

1.2.4 Силы, действующие на инородные частицы в расплаве

Центробежное литье – это способ изготовления отливок, при котором заполнение формы расплавом и его затвердевание происходит в поле действия центробежных сил. Такое поле возникает при вращении литейной формы. Таким образом, сущность процесса центробежного литья заключается в том, что жидкий металл заливают во вращающуюся форму, при этом под действием центробежных сил он плотно прижимается к внутренним стенкам формы, воспринимает ее конфигурацию и в таком состоянии затвердевает [10].

На любую частицу вращающегося расплава действуют две силы: гравитационная $F_g=mg$ и центробежная $F_c=F=m\omega^2r$, где m – масса частицы, ω – угловая скорость вращения, r – расстояние частицы от оси вращения [11].

Рисунок 2 - Свободная поверхность отливки при вертикальном центробежном литье

Если твердая или жидкая частица погружена в расплав и ее плотность отлична от плотности расплава, то действующая на частицу сила со стороны расплава не уравновешивается ее собственной центробежной и силой тяжести. Поэтому частица перемещается в ту или другую сторону по отношению к свободной поверхности. В соответствии с законом Архимеда, результирующая сила, действующая на погруженную во вращающийся расплав частицу

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 19 |

$$F_{ц} = V(\rho_1 - \rho) \omega^2 r,$$

где V - объем дисперсной частицы;

ρ_1, ρ - плотность частицы и плотность жидкого металла;

ω - угловая скорость вращения;

r - расстояние от оси вращения, совпадающее с радиусом центра сил инерции частицы и равный ему радиус центра сил вытесненного объема жидкого металла.

Из формулы видно, что силы, действующие на частицу, погруженную во вращающийся расплав, возрастают в $\omega^2 r/g$ раз. Видно также, что сила, действующая на частицы при центробежном литье, увеличивается с увеличением плотности частиц, помещенных в расплав [12].

При $\rho_1 > \rho$ сила положительна и частица движется от оси вращения к стенке формы, при обратном соотношении плотностей частица перемещается к оси вращения и всплывает на свободную поверхность расплава.

Если твердая частица касается стенки формы, то она прижимается расплавом к стенке и не всплывает. На этом явлении основано применение сыпучих покрытий для металлических форм при центробежном литье.

Действие поля центробежных сил обязательно учитывается при разработке систем шлакозадержания и питания, например, песчаных форм для стальных фасонных отливок при их центробежной заливке [13].

1.3 Процессы распределения дисперсных частиц по объему кристаллизующегося металла

Предпосылкой для неравномерного распределения дисперсных частиц в объеме металла служит природа вводимых дисперсных частиц: плотность вводимой тугоплавкой частицы и плотность металлического расплава различны. Следовательно, для управления распределением дисперсными частицами необходимо приложить к ней определенную силу, в частности, такой силой может быть центробежная сила.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 20 |

Суть способа градиентного упрочнения центробежно-литых стальных заготовок: при разливке металла на машине центробежного литья в струю металла постоянно, в течение всего времени разливки подаются твердые тугоплавкие дисперсные частицы различной плотности. Если плотность вводимых дисперсных частиц меньше плотности расплава, то при определенной разнице плотностей, центробежная сила, и Архимедова сила не уравниваются, и возникают условия для перемещения частиц к свободной поверхности расплава, то есть во внутренние поверхностные слои вращаемой заготовки. Если плотность вводимых частиц больше плотности расплава, то суммарное воздействие центробежной силы и Архимедовой силы будут перемещать вводимые частицы к фронту кристаллизации, то есть во внешние поверхностные слои вращаемой заготовки (рисунок 3).

Многообразие дисперсных частиц, их физико-химических и механических свойств, а также возможность варьировать скоростью вращения горизонтальной изложницы, создают предпосылки для получения новых дисперсно-упрочненных материалов. Свойства получаемого материала будут определяться типом дисперсных частиц, их концентрацией, дисперсностью, фракционным составом и т.д. [2].

Рисунок 3 – Способ градиентного упрочнения металла:

1 – дозатор; 2 – ковш; 3 – горизонтальная изложница; 4 – крышка изложницы; 5 – сталеразливочный носок; 6 – кристаллизующийся металл; 7 – частицы с плотностью равной или больше плотности металла; 8 – частицы с плотностью, меньшей плотности металла

Вывод по главе: Таким образом, выявленные и проанализированные литературные источники позволили рассмотреть и изучить существующие методы введения дисперсных частиц в расплавы на основе различных технологий. Анализ позволил выбрать метод производства металлических (или

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 21 |

композиционных) материалов, получаемых введением дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав, и обеспечивающий управление распределением вводимых частиц. Предложен метод введения дисперсных частиц в процессе центробежного литья, который будет использоваться для изготовления исследовательских и экспериментальных образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов.

2 Анализ существующих методов введения дисперсных частиц в расплав и методов производства металлических (или композиционных) материалов, получаемых введением дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав, обеспечивающие управление распределением вводимых частиц

2.1 Введение дисперсных частиц при центробежном электрошлаковом литье

Сущность технологии заключается в электрошлаковом переплаве электрода в плавильной емкости, обеспечивающей накопление жидкого металла и шлака в нужных количествах, и последующей его заливке во вращающуюся форму. В качестве переплавляемого металла могут применяться расходоуемые электроды любой формы и сечения. Данная технология и была использована для изготовления фланцевых заготовок ответственного назначения. Например, авторами [14] переплав расходоуемого электрода осуществляли под флюсом, представляющим собой смесь фтористого кальция, электрокорунда, магнезита и кремнезема. Такой флюс обеспечивает рафинирование жидкого металла и плавильной емкости от серы и фосфора, защиту от вредного воздействия окружающей среды, а также отличается значительной текучестью при высокой скорости охлаждения [15].

Метод электрошлакового литья прост и производителен. Оборудование для реализации этой технологии включает в себя серийные установки, гарнисажную плавильную емкость специальной конструкции, центробежную машину с вертикальной осью вращения и литейную форму.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 22 |

Точность получаемой отливки определяется литейной формой. Поэтому использовался составной кокиль, изготовленный методом токарной обработки кольцевых заготовок, каждая из которых повторяет часть наружной конфигурации отливаемой детали. При сливе шлакометаллической струи в кокиль под действием центробежных сил происходит ее разделение. Шлак препятствует прилипанию отливки к стенкам литейной формы, располагаясь тонким и ровным слоем на ее поверхности. Значительная часть шлака вытесняется внутрь и вверх отливки, где является тепловой надставкой и не позволяет образовываться усадочным полостям и раковинам. По мере общего снижения температуры металла и шлака на поверхности отливки образуется гарнисаж, отделяемый от заготовки только после ее извлечения из формы.

Важным преимуществом представленной технологии является возможность упрочнения металла заготовок за счет его модифицирования. Выбор модификатора осуществлялся согласно методике, изложенной в работе [16]. Установлено, что наиболее эффективным является комплексное модифицирование синтетическими ультрадисперсными частицами карбонитрида титана и титана в количестве 0,3...0,5 % от массы расплава. Модификатор получали смешиванием порошковых компонентов с последующим холодным прессованием в таблетки диаметром 25...30 мм и толщиной 8...15 мм. Размеры таблеток были выбраны из условия их растворения в модифицируемом расплаве в течение 20...30 с. Модификатор вводили при температуре 1650 °С за 2 мин до слива, что обеспечивало равномерное распределение дисперсных частиц-инокуляторов по всему объему жидкого металла в плавильной емкости. Заливку металла в металлическую литейную форму кокиль проводили при температуре 1600 °С.

Заготовки фланцев, полученные центробежным электрошлаковым литьем с модифицированием (ЦЭШЛМ), удовлетворяют всем предъявляемым требованиям к выпускаемой продукции: это и геометрическая точность отливки, и высокие свойства металла. Так, припуск под механическую обработку по наружной поверхности составляет 2...2,5 мм, по высоте до 1 мм, по внутреннему диаметру

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 23 |

5...8 мм. Коэффициент использования металла при этом достигает 0,6-0,8. Это существенно снижает металлоемкость изделия и энергозатраты на его изготовление.

Электрошлаковый модифицированный металл отличается от металла, полученного открытой плавкой, мелкозернистой структурой, большей химической однородностью, отсутствием инородных окисных включений, воздушных пузырей, пор, раковин, трещин, низким содержанием вредных примесей серы и фосфора, равномерной плотностью металла по всему объему, а, следовательно, и изотропностью физико-механических свойств по всем направлениям. Так, например, анализ структуры полученных отливок из стали 12Х13 свидетельствует о том, что немодифицированный металл имеет направленную транскристаллитную структуру с большой протяженностью первичных осей дендритов. Металлографический анализ показал, что в этом случае происходит огрубление структуры мартенсита, сопровождающееся значительным повышением твердости с межкристаллитной формой разрушения металла. Введение в металл 0,4 % модификатора приводит к существенному изменению структуры и свойств литого металла. Устраняются зоны транскристаллизации в кольцевых отливках, резко уменьшаются размеры дендритов, которые к тому же приобретают благоприятную форму по всему объему закристаллизовавшегося металла. Структура отливок характеризуется наличием ферритно-мартенситной матрицы с компактными карбидами, расположенными большей частью в микрочастицах, а разрушение ударных образцов носит в основном транскристаллитный характер.

В этом случае уровень механических свойств отливок практически не отличается от свойств кованой заготовки. Результаты механических испытаний некоторых марок сталей, применяемых для изготовления фланцев, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты механических испытаний марок сталей, применяемых для изготовления фланцев, полученных различными технологиями

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 24 |

| Марка стали | Режимы термической обработки | σ_B , МПа | σ_T , МПа | δ , % | ψ , % | KCU +20, МДж/м ² |
|------------------------------------|---|------------------|------------------|--------------|------------|-----------------------------|
| 09Г2С | Нормализация 930°С, воздух | 505 | 332 | 34 | 62 | 1,34 |
| 09Г2С (индукционная плавка) | | 481 | 324 | 21 | 49 | 0,76 |
| 09Г2С (ЦЭШЛМ) | | 512 | 343 | 29 | 61 | 1,25 |
| 12Х13 | Закалка 1050 °С, масло, отпуск 660 °С, воздух | 808 | 636 | 21,3 | 68,1 | 1,42 |
| 12Х13 (индукционная плавка) | | 784 | 615 | 15,4 | 50,2 | 0,68 |
| 12Х13 (ЦЭШЛМ) | | 816 | 622 | 20,4 | 64,6 | 1,39 |
| 10Х18Н10Т | Аустенитизация 1050 °С, воздух | 546 | 278 | 55,2 | 67,5 | 2,62 |
| 10Х18Н10Т (индукционная плавка) | | 514 | 249 | 44,3 | 50,1 | 1,64 |
| 10Х18Н10Т (ЦЭШЛМ) | | 598 | 324 | 52,6 | 61,2 | 2,13 |

Представленная технология перспективна, впрочем, у неё есть немаловажный недостаток: нельзя обеспечить равномерное распределения упрочняющих частиц внутри упрочняемого материала, вследствие различия плотностей частиц и упрочняемого металла. Значительно перспективнее разработка упрочнения, позволяющего распределять частицы в получаемой заготовке там, где в их есть необходимость – на наружной и внутренней поверхности.

2.2 Введение дисперсных частиц в слиток на стадии разливки сверху

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 25 |

При данном способе металл модифицируют мелкозернистой смесью порошков, вводя смесь в струю заливаемой в форму стали через специальную течку, прикрепленную к днищу ковша (рисунок 4).

В [17] описан эксперимент, в котором сталь марки 45Л (0,42 % С; 0,56 % Мп; 0,37 % Si; 0,025 % S; 0,030 % Р; 0,032 % Al) для отливки модельных слитков диаметром 145 мм и высотой 600 мм выплавляли в печи ДСП-5 двухшлаковым процессом с раскислением в ковше алюминием (800 г/т). Бесприбыльные слитки массой 70 кг, отливали из одного ковша со стопором в вертикальные шамотные формы. Половину из слитков модифицировали тонкодисперсной смесью (ТДС) порошков SiO_2+C .

Рисунок 4 – Введение дисперсных частиц в металл при разливке сверху:

1 – изложница; 2 – сталеразливочный ковш; 3 – течка, через которую осуществляется подача частиц; 4 – упрочняемый расплав

Исследование включало определение химического состава металла, выявление его макро- и микроструктуры, снятие серных отпечатков, изучение неметаллических включений в анодно-выделенных осадках и на шлифах, определение механических свойств (растяжение, ударный изгиб, вязкость разрушения). Данные о химическом составе 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 устраняется крупнодендритная форма кристаллитов и формируется однородное зернистое строение по всему сечению темплетов. Изучение неметаллических включений выявило большое разнообразие форм и размеров алюмосиликатных и сульфидных

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 26 |

включений. Количество оксидных включений возросло незначительно. Механические испытания показали, что у модифицированного металла возросли на 18 % 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. К тому же этот метод имеет возможность быть актуальным только в случае использования изложниц сравнительно небольшого сечения, для того чтобы увеличить скорость кристаллизации заготовки и распределить вводимые частицы равномерно по сечению слитка.

2.3 Введение дисперсных частиц в металл при непрерывной разливке

Сегодня большая часть жидкого металла разливается на машинах непрерывной разливки стали (МНЛЗ). Заинтересованность научных работников и практиков улучшить данный процесс, с целью повышения свойств получаемой заготовки – является весьма актуальной задачей. В данном случае имеется два способа технологии упрочнения микрочастицами:

- 1) подача частиц в кристаллизатор МНЛЗ во время разливки;
- 2) подача частиц в промежуточный ковш МНЛЗ во время разливки металла.

В работе [18] беря во внимание низкую удельную плотность упрочняющих частиц (Y_2O_3 , TiN, TiCN), а значит, невозможность их введения в расплав (СтЗсп) стандартной методикой, частицы, в обоих случаях, располагали внутри специальной стальной проволоки. Проволоку с помощью трайб-аппарата подавали в объём металла, находящегося в кристаллизаторе и в промежуточном ковше. Исследования полученного экспериментального металла показали, что плотность модифицированного металла увеличилась на 25-56 кг/м³ (0,3-0,7 %)

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 27 |

при использовании всех порошковых инокуляторов. Изменилась структура стали: измельчилось зерно, уменьшились центральная пористость, осевая химическая неоднородность, общие ликвационные полосы и трещины. Результаты механических испытаний показали улучшение свойств модифицированных непрерывнолитых заготовок относительно не модифицированных [19]. Исследователями было отмечено, что подача нанопорошковых модификаторов в кристаллизатор МНЛЗ не позволяет получить концентрацию инокуляторов в слитке выше 0,005-0,007 % из-за технологических особенностей введения и ограниченных технических возможностей, поэтому повторное модифицирование проводили в ковше. Порошковую ленту с НПИ подавали с помощью трайб-аппарата со скоростью 2,0–7,5 м/мин в приемную ванну промежуточного ковша сортовой МНЛЗ, разливая сталь марки 18Г25С при скорости вытягивания слитка 2,2–2,4 м/мин. Вводили нитрид и карбонитрид титана. Исследование опытного металла показало, что введение модификаторов в ковш обеспечивает увеличение концентрации НПИ в металле до 0,015–0,047 % и существенно увеличивает ряд показателей:

- повысилась удельная плотность модифицированного металла до 48–82 кг/м³ (в зависимости от вида НПИ);
- снизилась балльность развития внутренних дефектов на 40–56 %;
- увеличилась толщина корочки на 25,8–26,9 %;
- сократились области равноосных кристаллов (на 46,7–53,5%), дендритная зона (20,5–25,4 %) и длина первичных осей дендритов (23,9–25,5 %).

Механические испытания образцов модифицированной стали показали увеличение предела текучести – на 7,2 %; временному сопротивлению разрыву – 1,0 %; предела прочности – 1,7 %; относительного удлинения – 8,4 %; относительного сужения – 14,8 %. Максимальное улучшение показателей получено при концентрации основного вещества НПИ в металле 0,015–0,025 %, что было достигнуто при подаче порошковой ленты в промежуточный ковш МНЛЗ [19].

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 28 |

Преимущество данного метода получения дисперсно-упрочненного материала в том, что он высокотехнологичен – для получения материала практически не требуется никаких дополнительных механизмов (за исключением трайб-аппарата), при этом, получаемый опытный металл, значительно превосходит по свойствам не модифицированные образцы сравнения.

Однако, при таком методе введения невозможно добиться равномерного распределения вводимых модификаторов по сечению получаемой заготовки, как вследствие кристаллизационных явлений, так и вследствие седиментации по удельному весу – нитрид титана имеет плотность 5,44 г/см³, оксид иттрия 4,84 г/см³. Таким образом, в жидком металле все вводимые частицы будут всплывать на поверхность расплава, за исключением тех, которые будут захватываться потоками металла (при введении в ковш) или растущими дендритами (при введении в кристаллизатор). И не стоит исключать тот момент, что растущие кристаллиты будут способствовать смещению дисперсных частиц в осевую зону слитка.

2.4 Введение дисперсных частиц в металл при вытягивании заготовки в направлении, обратном гравитационному полю

При данном методе разливки, перед подачей металла в центровую на струю подают дисперсные тугоплавкие частицы, металл с инжесктированными частицами попадает в центровую, дальше в литниковую систему и кристаллизатор, где происходит кристаллизация металла и вытягивание формуемой заготовки (с поддержкой затравки) в направлении, обратном гравитационному полю [20]. Принципиальная схема показана на рисунке 5.

Введенные частицы, за счёт разности в плотности по сравнению с упрочняемым материалом, под воздействием архимедовых сил будут смещаться вверх и, при вытягивании формируемой заготовки всплывающие частицы обогащают фронт кристаллизации. При соблюдении условий при которых скорость вытягивания равна скорости кристаллизации поступающего металла

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 29 |

формирует заготовку сплошного сечения. В случае, когда скорость вытягивания выше скорости кристаллизации формируется полая заготовка.

Рисунок 5 – Введение дисперсных частиц в металл при вытягивании заготовки в направлении обратном гравитационному полю: 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

В электросталеплавильном цехе №3 ОАО «Златоустовский металлургический завод» 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 металлический титан. Исследование характера распределения введённой в металлическую матрицу дисперсной фазы показало, что во всех полученных заготовках отмечается 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 неупрочнённой сталью и достижения уровня износостойкости сталей ЭИ 107 и 110Х18М-ШД [21]. Преимуществом данной технологии является то, что в ней учитывается разница плотностей дисперсной фазы и упрочняемого материала, однако для её реализации требуется специфическое оборудование.

2.5 Введение дисперсных частиц при центробежном литье

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 30 |

Центробежным литьём называют метод получения отливок, при котором жидкий металл заливается во вращающуюся форму. Формирование отливки и процесс кристаллизации металла проходит под воздействием центробежных сил. Центробежным литьём получают отливки из стали, чугуна и цветных сплавов. Большой технико-экономический эффект гарантируется при применении данного метода для получения отливок тел вращения (труб, втулок, гильз, цилиндров движков, колец подшипников качения и т.д.).

Машины для центробежного литья различают с горизонтальной и вертикальной осью вращения. Иногда используются машины с наклонной осью вращения. Машины с вертикальной осью вращения используются только для сравнительно коротких цилиндрических отливок с малым различием в толщине стенки по высоте. При горизонтальной оси вращения отливки получаются со стенками одинаковой толщины и практически любой длины. При центробежном литье металл заливается в железные формы (изложницы), внутренняя поверхность которых покрывается огнеупорной краской. Качество отливок при центробежном литье в значимой степени находится в зависимости от скорости вращения формы и температуры заливаемого металла. Так, очень малое количество оборотов может привести к тому, что малозначительные центробежные силы не удержат расплавленный металл у поверхности формы, а излишнее количество оборотов усложнит систему машины, вызовет её ранний выход из строя и может привести к образованию трещин в отливках.

Авторами [22] предложен способ упрочнения отливок в процессе центробежного литья. При разливке металлического материала на машине центробежного литья на струю металла постоянно, в течение всего времени разливки, подаются твердые тугоплавкие мелкодисперсные частицы различной плотности (рисунок 6).

Рисунок 6 – Введение дисперсных частиц в металл центробежном литье: 1 – введение карбидов с помощью дозатора; 2 – ковш; 3 – горизонтальная изложница;

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 31 |

4 – крышка изложницы; 5 – сталеразливочный носок; 6 – кристаллизующийся металл; 7 – частицы с плотностью равной или больше плотности металла; 8 – подающиеся частицы

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 объема отливки. Согласно данному способу были проведены эксперименты, и получены заготовки с различным содержанием дисперсных частиц. 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 в поверхностных слоях центробежно-литой заготовки до 5,1 шт./мм² позволяет увеличить предел прочности на 36–38 %, ударную вязкость на 23–26 %, износостойкость на 29–34 %, твердость на 30–33 % [22]. Несомненным преимуществом данного способа является возможность прогнозирования и управления распределением вводимых частиц [22].

Выводы по главе: проведен анализ существующих методов введения дисперсных частиц в расплавы на основе различных технологий. Анализа позволил выбрать метод производства металлических (или композиционных) материалов, получаемых введением дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав, и обеспечивающий управление распределением вводимых частиц. Предложен метод введения дисперсных частиц в процессе центробежного литья,

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 32 |

который будет использоваться для изготовления исследовательских и экспериментальных образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов. Иные вышеперечисленные методы позволяют получить дисперсно-упрочненные материалы, однако управление распределением дисперсными частицами по объему кристаллизующегося металла практически невозможно.

3 Получение экспериментальных образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов с разливкой во вращающуюся форму и введением дисперсных частиц при разливке на центробежно-литой машине вертикального типа

Перед началом проведения серий экспериментальных плавов проводился входной контроль шихтовых материалов. В качестве шихтового материала использовался стальной прокат. Химический состав соответствовал составу стали марки 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные» (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав шихтовых материалов, масс. %

| Химический элемент | C | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Cu | Fe |
|--------------------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-----------|
| Содержание | 0,09 | 0,68 | 1,73 | 9,76 | 0,005 | 0,015 | 18,6 | 0,19 | остальное |

Плавление шихтовых материалов осуществлялось с помощью индукционной печи с рабочим тиглем объемом 40 кг (рисунок 7). Плавильный узел

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | | | | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | | 33 |

предварительно был футерован новой огнеупорной смесью, для исключения перехода химических элементов из отработанной футеровки в жидкий расплав. После проведения процедуры набивки печи проводились обжиговая и закрепительная плавки. Обжиговая плавка осуществлялась последовательным нагревом до температуры расплавления металла в течении в течение 8 часов, после чего осуществлялась выдержка в течении одного часа. Закрепительная плавка проводилась в стандартном режиме: нагрев металла и его расплавление в течение одного часа, выдержка 10 минут, затем выпуск металла.

Мощность нагрузки транзисторного преобразователя во время процедур плавления шихтовых материалов для получения заготовок, составляла 42 кВт. Для наведения шлака во время плавления использовалась известь, предварительно прокаленная в нагревательной печи. Разжижение шлака производилось путем добавки порошка вермикулита. Во время процесса переплава и наведения полного объема печи жидким металлом, производилось три замера температуры, термопарой со сменными наконечниками. Перед началом проведения серии опытов по получению заготовок, проведена пробная плавка для определения угаров элементов. Химический состав полученного слитка показал угар титана и необходимость легирования им при последующих опытных переплавах в количестве 12 г на плавку. При наведении полного объема осуществлялась выдержка металла в течение 10 минут и легирование титаном. Первые выпуски металла в машину центробежного литья служил образцом сравнения (образец 1), в связи с чем процедура введения в него мелкодисперсных частиц на струю металла не производилась. Последующие заготовки были получены с введением частиц на струю металла. Общее количество введенных частиц представлено в таблице 3.

Рисунок 7 – Процесс плавления шихтовых материалов

Таблица 3 – Содержание дисперсных частиц в заготовках и их масса, г.:

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 34 |

| Обозначение заготовки | Количество частиц, г | | | Масса заготовки, г |
|--------------------------|----------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|
| | WC | B ₄ C | Y ₂ O ₃ | |
| 1 | - | - | - | 11345 |
| 2 | 220 | - | - | 11002 |
| 3 | - | 219 | - | 10968 |
| 4 | - | - | 230 | 11503 |

Разливка металла осуществлялась с использованием промежуточного ковша (рисунок 8). Промежуточный ковш был футерован ковшевой огнеупорной смесью и предварительно просушен. Перед процедурой выпуска металла промежуточный ковш прогревался пропаном докрасна. Выпуск металла осуществлялся при температуре 1650 °С. Для раскисления металла в ковше использовался алюминий в количестве 25 г на один выпуск металла в изложницу. После выпуска металла в ковш и перед подачей его в изложницу, проводилась повторная процедура снятия шлака во избежание попадания последнего в рабочую область изложницы. Подачу мелкодисперсных частиц на струю жидкого металла при разливке на машинах центробежного литья осуществляли дозатором шнекового типа. Шнек данного дозирующего устройства позволяет исключать слеживание частиц в его корпусе. Изложницы машин центробежного литья после каждого изъятия заготовок повторно покрывались гашеной известью.

Рисунок 8 – Процесс заливки жидкого металла в машину центробежного литья вертикального типа

Получение отливок проводилось с использованием машины центробежного литья вертикального типа. Скорость вращения изложницы машины центробежного литья вертикального типа составляла 1100 об./мин. Процедура плавления шихтовых материалов и заливки жидкого расплава и подачи мелкодисперсных частиц были идентичными [23].

Во время разливки на машине центробежного литья вертикального типа изложница приводилась в движение после подачи в нее всего объема жидкого металла и мелкодисперсных частиц. На дно изложницы во всех случаях предварительно помещался лист асбокартона соответствующей формы, для исключения ее промывания жидким металлом. Заливной носок центробежной машины вертикального типа покрывался раствором разведённой гашеной известью и просушивался газом. Частицы подавались непосредственно на струю жидкого металла с начала разливки и до ее завершения. После полной остановки изложницы проводилась выдержка в течение 5 минут, затем отливка извлекалась (Рисунок 9).

Рисунок 9 – Внешний вид изъятной заготовки из машины центробежного литья вертикального типа

В ходе проведения экспериментов, было получено 4 отливки типа «стакан» на машине центробежного литья вертикального типа. Полученные отливки имели удовлетворительное качество поверхности без видимых дефектов (Рисунок 10).

Рисунок 10 – Внешний вид охлажденной заготовки полученной на машине центробежного литья вертикального типа

Выводы по главе: в ходе работ были получены экспериментальные образцы дисперсно-упрочненных металлических материалов с разливкой во вращающуюся форму и введением дисперсных частиц при разливке на центробежно-литой машине вертикального типа.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 36 |

4 Исследование полученных образцов

4.1 Подготовка образцов из исследовательских образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов к металлографическому исследованию

Для получения образцов, необходимых для металлографического исследования исследовательских образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов была разработана схема порезки данных материалов, и согласно ей, проведена выборка образцов (рисунок 12).

Рисунок 12 – Схема вырезки образцов из исследовательских заготовок, полученных методом центробежного вертикального литья:

1 – образцы для определения твердости; 2 – образцы для исследования макро- и микроструктуры; 3 – образцы для исследования предела прочности на растяжение, предела текучести и относительного сужения; 4 – образцы для исследования ударной вязкости

Данная схема была разработана с учетом [2] бх [1] юсти дальнейших исследований физико-механических свойств, получаемых исследовательских образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов.

Предпосылкой для всех металлографических исследований [3] является изготовление шлифов, которые могут быть использованы для микроскопического

| | | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|---|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | 4 | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | 37 |

исследования с помощью светового и электронного микроскопов, для определения микротвердости, а также количественного измерения структурных составляющих и электронно-зондового микроанализа.

Правильное изготовление шлифов имеет чрезвычайно важное значение, поскольку от этого зависит правильность толкования микроструктур. Нельзя заранее предложить оптимальную методику изготовления шлифа, и ни одну из разработанных методик нельзя считать оптимальной.

Основным моментом при изготовлении металлографических шлифов является предотвращение повреждения поверхности шлифа, заключающегося в изменении микроструктуры поверхностного слоя материала в результате деформации или нагрева [24].

Целью всех стадий изготовления шлифа является последовательное создание поверхности требуемого качества. Таким образом, каждая следующая стадия процесса проводится с целью удаления повреждения поверхности, внесенного предыдущей обработкой.

Хорошо приготовленный металлографический шлиф должен удовлетворять ряду требований. Прежде всего, он должен быть типичным для данного образца материала. На поверхности не должно наблюдаться полированных царапин и ям, а также пятен в результате взаимодействия с жидкостями. Необходимо сохранить после обработки все неметаллические включения и другие элементы, отличающиеся повышенной хрупкостью. Шлиф должен быть достаточно плоским для исследований при больших увеличениях.

Изготовление и подготовка металлографических шлифов обычно состоит из 5 основных операций:

1. Вырезка образца.
2. Закрепление образца или монтирование.
3. Шлифовка.
4. Полировка.
5. Травление (выявление микроструктуры).

Металлографический образец часто отбирается от большого объема материала. Выбор места вырезки образца диктуется целью исследования. Используют несколько методов вырезки: резка абразивными кругами; резка пилами, электролитическая, электроискровая резка. Чаще всего используется искровая резка или резка абразивными кругами. Для резки сталей лучше всего использовать абразивные круги с Al_2O_3 , для цветных металлов – с SiC. Для мягких материалов используют круги с твердым связующим, а для резки твердых – с мягким связующим. Во всех случаях резку абразивными кругами следует проводить с использованием охлаждающей жидкости.

При исследовании некоторых изделий (тонкие листы, проволока и т.п.) их механическая обработка очень затруднена без применения специальных приспособлений. В таких случаях исследуемое изделие нужно заключить в нейтральную по отношению к нему твердую среду и обрабатывать комбинированный образец как одно целое так, чтобы в плоскость шлифа попало нужное сечение изделия.

Закрепление образцов в основном производится для того, чтобы было удобно приготавливать и исследовать шлифы, которые имеют сложную конфигурацию, низкую прочность или неудобные для изготовления размеры. Кроме того, бывает необходимо закрепить приповерхностные слои образцов от разрушения при шлифовке. При использовании различных автоматических установок бывает нужно помещать образцы в держатели специального типа, под которые сконструированы механизмы [25].

Можно выделить следующие основные виды закрепления образцов:

- а) монтирование с помощью клеящих веществ;
- б) монтирование в зажимах;
- в) запрессовка образцов.

При проведении работы применялось закрепление образцов методом запрессовки. Для этого использовался автоматический запрессовочный пресс «Simplimet 1000» фирмы «BUENLER». Образец при нагреве запрессовывается в формовочный материал (акриловая смола), который является терморезистивным.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 39 |

Процесс запрессовки осуществляется при совместном воздействии давления и нагрева.

Шлифовка является наиболее важной операцией в технологии изготовления образцов. Большое значение этой операции состоит в том, что оператор должен внимательно контролировать степень добавляемого механического повреждения поверхности, которое должно быть удалено последующим лакированием.

Абразивные материалы, применяемые при шлифовании, классифицируют по размеру частиц. Шлифование должно начинаться с наиболее мелкозернистого материала, способного за 2-5 мин создать исходную ровную поверхность образца и устранить эффект вырезки. Каждая последующая операция шлифования сопровождается уменьшением зернистости применяемого абразива.

Практически обязательным условием является применение «мокрого» шлифования, однако используется и сухое.

Для правильного выбора шлифовальных шкурок необходимо знать их маркировку, которая включает в себя тип (для металлов), способ нанесения абразивного материала, размеры листов (рулонов), марку бумаги-основы, марку абразивного материала, зернистость, тип связи и класс износостойкости.

Первичное выравнивание образцов производят на абразивных кругах зернистостью 40-60, избегая нагрева образцов. При шлифовке на этих абразивах образец следует держать в одном положении. При переходе от более грубой бумаги к менее грубой необходимо тщательно мыть в струе воды образец и руки, а также применявшиеся при шлифовке приспособления для того, чтобы исключить возможность переноса частиц крупного образца на мелкозернистую шкурку.

При переходе на более мелкозернистую шкурку необходимо изменять направление обработки поверхности на 90°. Это облегчает определение конца шлифовки на данной шкурке. Совершенно недопустим переход от грубых шкурок к самым тонким, т.к. грубые штрихи от предыдущей обработки забиваются порошком мелкого абразива и металлической пылью, что создает ложное впечатление хорошей шлифовки. Для равномерности износа бумаги и

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 40 |

исключения односторонней обработки образец при шлифовке следует медленно передвигать между центром и периферией вращающегося диска.

Полировку металлографических шлифов проводят для устранения имеющихся после неровностей поверхности без деформирования металла. Полировка шлифа может осуществляться механическим, электролитическим или химическим способами.

При механической полировке образцы осторожно обрабатывают весьма тонким абразивом, действие которого принципиально не отличается от действия абразивов при шлифовке. Наиболее часто для металлографической полировки используют окись алюминия, окись хрома, окись железа. Перед приготовлением полирующей суспензии полировальные материалы следует подвергать отмачиванию в больших количествах воды (на 1 литр воды 1-2 грамма порошка), отбрасывая фракцию, осевшую в течение первого часа.

Механическую полировку производят на специальном полировальном станке, диск которого обтянут фетром, сукном или бархатом, или вручную. Сплавы, в структуре которых имеются легко выкрашивающиеся включения, рекомендуется полировать на тканях, лишенных ворса, например, на фетре [26].

Полировальный диск смачивают полировальной жидкостью, состоящей из воды, в которой во взвешенном состоянии находятся очень мелкодисперсные частицы полировального порошка: окись хрома, окись алюминия, окись железа или другие соединения. Возможно использование суспензий из полировального порошка и органических жидкостей (спирта, керосина, глицерина). При полировке образец первое время лучше держать в таком положении, при котором направление движения диска перпендикулярно направлению риска от последней шлифовальной операции. При этом легче уловить момент исчезновения риска. При обработке на дисках удобнее и безопаснее держать образец на той части диска, которая движется от шлифовальщика. Образец не следует сильно прижимать к диску.

Полировка продолжается 5-10 мин. В конце полировки образец рекомендуется медленно поворачивать против вращения диска. Полировку заканчивают после

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 41 |

того, как микрошлиф приобретает зеркальную поверхность. Правильным критерием высокого качества поверхности микрошлифа является отсутствие на ней дефектов в виде рисок.

Шлифовка и полировка в ходе работ производилась при помощи шлифовально-полировального станка EcoMet® 250 и полуавтоматической насадки AutoMet® 250 фирмы «BUEHLER» (рисунок 13).

Готовый шлиф (рисунок 14) не должен иметь царапин от шлифовки, посторонних загрязнений, поверхность его должна быть плоской. Небольшой «завал» краев шлифа допустим только в том случае, когда исследование краев не предполагается.

Рисунок 13 – Шлифовально-полировальный станок EcoMet® 250, процесс полировки

Рисунок 14 – Запрессованные и отполированные образцы металла из экспериментальных слитков

Наибольшей чистоты шлифа следует добиваться при исследовании неметаллических включений. Совершенно недопустимо наличие на шлифе посторонних загрязнений, которые могут быть приняты за неметаллические включения. Глубина рельефа металлографического шлифа не должна превышать глубины фокуса, применяемого объектива. При изучении микроструктуры с увеличением до 100 раз максимальная глубина рельефа не должна превышать 4 мкм. При больших (максимальных) увеличениях возможно допускать глубину рельефа не более 0,5 мкм.

Отполированный образец, прежде всего, нужно изучить под микроскопом в нетравленном состоянии. Изучение нетравленного шлифа позволяет определить наличие дефектов (пор, трещин, и т.п.) и неметаллических включений.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 42 |

Поверхность отполированного образца нужно промыть, обезжирить и высушить. Для обезжиривания применяют спирт этиловый (C_2H_5OH), спирт метиловый (CH_3OH), эфир этиловый ($C_4H_{10}O$), ацетон (C_3H_6O).

Образцы промывают в отдельных случаях теми же жидкостями, что и обезжиривают, но чаще всего водой (водопроводной или дистиллированной). После промывки образец высушивают фильтровальной бумагой или подогретым сухим воздухом. Рассматривать нетравленные образцы нужно при двух увеличениях: при малом (50...100) для того, чтобы составить общее представление об образце, и при большом – для изучения нетравленной поверхности, в частности, строение и цвет неметаллических включений изучают при больших увеличениях.

Большинство способов выявления микроструктуры сводится к выявлению границ между фазами, к получению рельефа на поверхности зерен и окрашиванию фаз или структурных составляющих. При этом удастся выявить качественное различие фаз, двойниковые образования, блочную структуру и ориентировку зерна относительно плоскости шлифа и взаимную ориентировку зерен.

Из всех существующих способов выявления микроструктуры в ходе работы применялось химическое травление растворами, а именно 5 %-ным раствором азотной кислоты в спирте.

Под действием химических реагентов в чистых металлах и однофазных сплавах, прежде всего, выявляются границы между отдельными зернами. При более длительном интенсивном действии реагента на отдельные зерна выявляются фигуры травления, которые обычно имеют правильную геометрическую форму, отвечающую кристаллическому строению металла.

Принципиальные особенности протекающих при выявлении микроструктуры процессов таковы:

- процессы протекают на поверхности металла в течение сравнительно коротких временных отрезков;
- их интенсивность связана с различием в природе фаз и агрессивностью воздействующей среды;

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 43 |

- процесс воздействия должен быть прерван и не доведен до стадии глубокого разъедания металла.

Способ нанесения травящего реактива выбирается в зависимости от его состава и состава сплава. Применяется погружение образца полированной поверхностью кверху или книзу, втирание ватой, смачивание поверхности из капельницы или пипетки.

После травления образцы промывают струей проточной воды и затем сушат (фильтровальной бумагой или струей воздуха). Если образец оказался недотравленным, то необходимо дотравить повторным травлением.

Повторное травление должно следовать незамедлительно за первым. Если образец перетравлен, то необходимо споллировать верхний слой металла и снова произвести травление. К числу универсальных травителей относятся спиртовые и водные растворы азотной кислоты.

Однако для каждого металла и сплава опытным путем подбирается состав для получения наилучших результатов [27].

4.2 Металлографические исследования исследовательских образцов

Исследование макро- и микроструктур исследовательских образцов производилось при помощи светового микроскопа для исследования материалов Axio Observer.D1m с применением системы анализа изображений для решения металлургических задач и контроля качества Thixomet.

В структуре всех исследовательских образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов наблюдаются слои металла в соответствии с формированием отливки методом центробежного литья. Во всех отливках активно присутствует окисная фаза. Слои разграничиваются окисными соединениями или порами. Принципиальных отличий в структуре заготовок не наблюдается. Структура отливок не имеет дефектов в виде пор, трещин и усадочных раковин. У всех образцов микроструктура представлена аустенитными зернами и карбидными частицами, располагающимися по границам зерен (первичные карбиды) и в теле зерен (вторичные выделения карбидов). Для

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 44 |

наглядности на рисунке 15 структуры представлены при различных увеличениях, но существенных различий, как было сказано выше, структуры отливок не имеют.

При сравнении образца-эталона (без вводимых частиц в различной концентрации – 1) с остальными образцами наблюдается, что введение дисперсных частиц карбидов и оксидов измельчает размер аустенитного зерна. Наиболее заметное измельчение аустенитного зерна наблюдается при увеличении количества вводимого WC (образец 2).

Для всех образцов характерно наличие неметаллических включений трех типов – сульфидов, оксидов, нитридов титана (рисунок 16). Ввиду различных вариантов модифицирования включения имеют сложный химический состав. Характерным для всех образцов является преимущественное расположение неметаллических включений по границам аустенитных зерен.

в)

г)

Рисунок 16 – Характерные виды включений в исследовательских образцах дисперсно-упрочненных металлических материалов: а – образец 1, $\times 650$;
б – образец 2, $\times 500$; в – образец 3, $\times 500$; г – образец 4, $\times 650$

Основным видом неметаллических включений в исследовательских образцах дисперсно-упрочненных металлических материалов являются точечные оксиды. Количество точечных оксидов оценивалось по ГОСТ 1778-70 при увеличении $\times 100$. Результаты анализа общей загрязненности металла ими представлены в таблице 4.

При сравнении количества и плотности неметаллических включений можно отметить то, что в образце 1 их меньше всего; это связано с тем, что он получен без введения дисперсных частиц. В остальных же образцах наблюдается примерно одна и та же картина: включения присутствуют во всех сечениях, а их количество прямо пропорционально концентрации вводимых частиц. Этими включениями являются, как и вводимые частицы, так и включения, образованные в процессе взаимодействия основного металла и частиц.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 45 |

Таблица 4 – Результаты анализа загрязненности металла оксидами

| Образец | Средняя доля включений на 1 поле зрения | Балл оксидов по ГОСТ 1778-70 |
|---------|---|------------------------------|
| 1 | 0,5 | Менее 1 |
| 2 | 1 | Менее 1 |
| 3 | 0,25 | 1 |
| 4 | 1,5 | 1-1,5 |

4.3 Исследование физико – механических свойств экспериментальных образцов

Наряду с исследованием предела прочности исследовались показатели предела текучести и относительного сужения, так как при исследовании первого параметра сразу возможно отследить значение остальных.

Измерение показателей значения предела прочности и предела текучести проводилось на испытательной машине Instron 5982 (рисунок 17).

Данная установка имеет микропроцессорную систему управления, которая обеспечивает:

- возможность подключения электронных измерительных приборов (экстензометры, электронные динамометры);

- автоматическое обнуление;

- математическую обработку результатов испытания;

- выдачу информации о результатах испытаний на дисплей;

- связь с внешними устройствами;

- программное обеспечение на русском языке для испытания материалов по ГОСТ, ASTM, ISO, DIN в рамках технических возможностей машины и технического задания на поставку;

- определение текущего и максимального значения нагрузки, действующей на образец, и соответствующего ей значения перемещения подвижной траверсы;

- проведение испытаний до разрушения образца, заданного значения нагрузки, перемещения, расчет деформации по перемещению подвижной траверсы, предел текучести при растяжении, относительное удлинение при разрыве;
- возможность проведения испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, малоцикловую усталость в пределах технических возможностей машины;
- программирование параметров испытаний образцов в диалоговом режиме;
- цифровую настройку всех датчиков;
- автоматический режим проведения испытаний;
- автоматическую цифровую защиту от перегрузки и аварийных ситуаций;
- цифровое ступенчатое и плавное задание скорости;
- автоматическую настройку ряда скоростей машины [28].

Рисунок 17 – Внешний вид испытательной машины Instron 5982

Изготовленные образцы для оценки предела прочности и текучести были испытаны согласно ГОСТ 1497-84. Результаты испытаний представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты исследования предела прочности, предела текучести и относительного сужения исследовательских образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов

| № слитка | № образца | Предел прочности, МПа | Предел текучести, Н/мм ² | Относительное сужение, % |
|----------|-----------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 1.3 | 600,2 | 289,3 | 59,3 |
| | 1.4 | 602,1 | 288,3 | 59,4 |
| 2 | 2.3 | 624,7 | 311,9 | 51,0 |
| | 2.4 | 626,7 | 312,8 | 50,9 |
| 3 | 3.3 | 612,0 | 305,0 | 55,2 |

| | | | | |
|---|-----|-------|-------|------|
| | 3.4 | 612,9 | 304,0 | 55,4 |
| 4 | 4.3 | 605,1 | 293,2 | 57,4 |
| | 4.4 | 603,1 | 295,2 | 57,6 |

На диаграммах показаны зависимости относительного сужения (рисунок 18), предела прочности (рисунок 19) и предела текучести (рисунок 20) от введенных дисперсных частиц.

Рисунок 18 – Относительное сужение экспериментальных образцов:

1 – слиток с введенными частицами WC, 2 – слиток с введенными частицами V_4C_3 ,
3 – слиток с введенными частицами Y_2O_3

Рисунок 19 – Предел прочности экспериментальных образцов

1 – слиток с введенными частицами WC, 2 – слиток с введенными частицами V_4C_3 ,
3 – слиток с введенными частицами Y_2O_3

Рисунок 20 – Предел текучести экспериментальных образцов

1 – слиток с введенными частицами WC, 2 – слиток с введенными частицами V_4C_3 ,
3 – слиток с введенными частицами Y_2O_3

Твердость исследовательских слитков с различными типами частиц измеряли при помощи твердомера ТБ5004 по методу Бринелля (рисунок 21).

Рисунок 21 – Внешний вид твердомера ТБ5004 по методу Бринелля

Твердомеры стационарные серии ТБ5004 предназначены для измерения твердости по методу Бринелля металлов и сплавов по ГОСТ 9012-59.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 48 |

Изготовленные образцы для оценки твердости были испытаны согласно ГОСТ 9012-59. Результаты испытаний представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты исследования твердости образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов

| № слитка | № образца | Твердость, НВ |
|----------|-----------|---------------|
| 1 | 1.5 | 164 |
| | 1.6 | 163 |
| 2 | 2.5 | 173 |
| | 2.6 | 174 |
| 3 | 3.5 | 170 |
| | 3.6 | 171 |
| 4 | 4.5 | 165 |
| | 4.6 | 165 |

На диаграмме показана зависимость твердости от введенных дисперсных частиц (рисунок 22).

Рисунок 22 – Твердость экспериментальных образцов

1 – слиток с введенными частицами WC, 2 – слиток с введенными частицами V_4C_3 ,
3 – слиток с введенными частицами Y_2O_3

Выводы по главе: в ходе работ проведены металлографические исследования исследовательских образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов по разработанной методике. По итогам исследования можно сделать следующие выводы:

- принципиальных отличий в структуре заготовок не наблюдается. Структура отливок не имеет дефектов в виде пор, трещин и усадочных раковин.

- у всех образцов микроструктура представлена аустенитными зёрнами и карбидными частицами, располагающимися по границам зёрен (первичные карбиды) и в теле зёрен (вторичные выделения карбидов);

- введение дисперсных упрочняющих частиц измельчает структуру металла, так как тугоплавкие частицы, не растворяясь в металле, являются дополнительными центрами кристаллизации, тем самым увеличивая скорость затвердевания металла;

- в исследовательских образцах дисперсно-упрочнённых металлических материалов неметаллические включения присутствуют во всех сечениях, а их количество прямо пропорционально концентрации вводимых частиц; этими включениями являются, как и вводимые частицы, так и включения, образованные в процессе взаимодействия металла и частиц;

- при введении дисперсных частиц в образцы наблюдается увеличение показателей ряда механических свойств; таких как предел прочности, предел текучести, твердость:

а) введение WC увеличивает показатели предела прочности в среднем на 4,1 %, V_4C – на 1,9%, Y_2O_3 – на 0,5 %;

б) введение WC увеличивает показатели предела текучести в среднем на 8,2 %, V_4C – на 5,4 %, Y_2O_3 – на 2 %;

в) введение WC увеличивает показатели твердости в среднем на 6 %, V_4C – на 4,3 %, Y_2O_3 – на 1 %;

Однако наблюдается и уменьшение показателей механических свойств, таких как относительное сужение:

а) введение WC уменьшает показатели относительного сужения в среднем на 14 %, V_4C – на 6,8 %, Y_2O_3 – на 3 %.

Введение дисперсных частиц при центробежном литье позволяет повысить показатели физико – механических свойств отливок, что вписывается в теорию и практику дисперсного упрочнения материалов. Снижение ряда физико – механических свойств скорее всего обусловлено тем, что дисперсные частицы не растворяются в расплаве, тем самым они являются концентраторами напряжений.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 50 |

Дальнейшие работы должны позволить определить оптимальные концентрации вводимых частиц карбидов и оксидов, составы их внедрения (смеси), а также режимы термической и пластической деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе написания выпускной квалификационной работы были решены поставленные задачи и раскрыта ее тема.

В аналитической части рассмотрены методы введения дисперсных частиц в расплавы на основе различных технологий. Анализ позволил выбрать метод производства металлических (или композиционных) материалов введением дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав, и обеспечивающий управление распределением вводимых частиц. Предложен метод введения дисперсных частиц в процессе центробежного литья, который использовался для изготовления исследовательских и экспериментальных образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов.

Были получены экспериментальные образцы дисперсно-упрочненных металлических материалов с разливкой во вращающуюся форму и введением дисперсных частиц при разливке на центробежно-литой машине вертикального типа.

В ходе работ проведены металлографические и физико – механические исследования экспериментальных образцов дисперсно-упрочненных металлических материалов по разработанной методике. Выводы по итогам исследования приведены в разделе 4.

Таким образом, задачи, поставленные в выпускной квалификационной работе, решены, цель достигнута.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 51 |

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Вовчук, И.П., Шишватова О.В. Конструкторско-технологическое решение получения литой заготовки с удовлетворительной свариваемостью / И.П. Вовчук, О.В. Шишватова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2016. – Т. 1. - С. 422 – 424

2 Аникеев, А.Н. Получение градиентных центробежно-литых стальных заготовок путем введения в кристаллизующийся расплав дисперсных частиц карбидов: автореферат дис. к-та тех.наук / Аникеев А.Н. – Ч.: Изд-во ЮУрГУ, 2013, 16 с.

3 Сайт «Ресурс машиностроения», статья «Ресурсоэффективность литейного производства в России». – <http://www.i-mash.ru> (дата обращения 15.04.21).

4 Сайт «Российская ассоциация литейщиков». – <http://www.ruscastings.ru> (дата обращения 15.04.21).

5 Братковский Е.В., Заводяный А.В. Курс лекций по дисциплине: «Литейное производство» для студентов «Металлургия черных металлов». - Новотроицк: НФ МИСиС, 2010.

6 Шиганов, И. Н. Разработка научных основ технологии сварки плавлением дисперсно-упрочненных металлических композиционных материалов / И. Н. Шиганов. –М., 1999. – 386 с.

7 Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Технология литейного производства. Специальные виды литья: Учеб. для вузов. Под ред. В.А. Рыбкина. М.: Academia, 2005. 350 с.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 52 |

8 Е.П. Круглов, Э.Р. Галимов, А.Г. Аблясова, Н.Я. Галимова, С.Ю. Юрасов, М.М. Ганиев, А.Г. Схиртладзе, Е.А. Рябов Выбор и способы изготовления заготовок для деталей машиностроения. Учебник для студентов машиностроительных специальностей, 2015.

9 Модифицирование непрерывнолитой стали нанопорошками тугоплавких соединений / В. П. Комшуков [и др.] // Сталь. – 2009. – №4 . – С. 65-68.

10 Малоотходные технологии в металлургии: метод. указания для студентов спец. 1103000 дневной формы обучения /НГТУ; сост.: Е.А.Чернышов, А.Л.Крылов, Э.Е,Филиппов. Н.Новгород, 2006. – 24 с.

11 <https://docplayer.ru/38005659-Laboratornaya-rabota-4-centrobezhnoe-lite-1-vvedenie-1-1-sushchnost-metoda.html> (дата обращения 20.04.21).

12 Durnev M.A., Eidelman E.D. // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2017. Vol. 8. N 3. – P. 360–364.

13 <https://lhx.ucoz.ru/dlyabloga/centrlitje.pdf> (дата обращения 20.04.21).

14 Еремин, Е. Н. Центробежное электрошлаковое литье фланцевых заготовок с применением инокулирующего модифицирования / Е. Н. Еремин, С. Н. Жеребцов // Современная электрометаллургия. – 2004. – № 3 (76). – С. 15-17.

15 Медовар, Б. И. Металлургия электрошлакового процесса / Б. И. Медовар, Л. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов. – Киев: Наукова думка, 1986. – 248 с.

16 Еремин, Е. Н. Закономерности комплексного модифицирования литого электрошлакового металла / Е. Н. Еремин // В сб. науч. тр.: Анализ и синтез механических систем; отв. ред. В. В. Евстифеева. – 1998. – С. 131–134.

17 Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми материалами на качество сортовой непрерывнолитой заготовки / В. П. Комшуков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2010. – №8. – С. 57-63.

18 Чуманов, И. В. Повышение износостойкости стали путём ввода карбида титана при кристаллизации слитка / И. В. Чуманов, В. И. Чуманов, Д. А. Пятыгин и др. // Электрометаллургия. – 2008. – №2. – С. 32-35.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 53 |

19 Патент РФ 2381087 МПК В 22 D 13/02 Способ формирования трубной заготовки №2008128677/02 / В. И. Чуманов, И. В. Чуманов, Д. А. Пятыгин и др. Заявл. 14.07.2008; опубл. 10.02.2010. – 5 с.

20 Чуманов, В. И. Упрочнение металлических материалов твердыми тугоплавкими мелкодисперсными частицами: монография / В. И. Чуманов, И. В. Чуманов, А. Н. Анিকেев. – Челябинск, 2009. – 100 с.

21. Пат. 2443505 РФ. Способ получения стальной трубной заготовки / Чуманов В.И., Анিকেев А.Н., Чуманов И.В.; заявл. 06.10.2010; опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6.

22. Вальтер А.И., Протопопов А.А. Основы литейного производства. – М.: Инфра-Инженерия, 2019. – 333 с.

23. Одарченко И.Б., Некрасов Г.Б. Основы технологии литейного производства. Плавка, заливка металла, кокильное литье. – М.: Высшая школа, 2013. – 225 с.

24. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми материалами на качество сортовой непрерывнолитой заготовки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 8. С. 57 – 63

25. Chumanov I.V., Kareva N.T., Chumanov V.I. etc. Study and Analysis of the Structural Constituents of Billets Hardened by Fine-Grained Particles and Formed by Centrifugal Casting // Russian Metallurgy (Metally). 2012. Vol. 2012. No. 6. P. 540 – 543.

26. Анিকেев, А.Н. Термодинамический анализ процессов взаимодействия карбида вольфрама с металлическим расплавом на основе железа / А.Н. Анিকেев, И.В. Чуманов // Электрометаллургия. – 2012. – №7. – С. 2–5.

27. Чуманов, И.В. Математическое моделирование распределения тугоплавких мелкодисперсных частиц при получении заготовки методом центробежного литья / И.В. Чуманов, А.Н. Анিকেев, В.А. Иванов, В.И. Чуманов // Сталь. –2011. – №3. – С. 15–18.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 54 |

28. Чуманов, В.И. Упрочнение поверхностных слоев при формировании полых заготовки методом центробежного литья / В.И.Чуманов, И.В Чуманов, А.Н. Анисеев, Р.Р. Гарифулин // Электromеталлургия. – 2010. – №1. – С. 33–35.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | 22.04.02.2021.849.00.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 55 |