

МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ

научно-технический журнал





Журнал индексируется системами РИНЦ и Google Scholar.
Сведения о журнале публикуются в международной системе «Ulrich's Periodicals Directory»

Редакционная коллегия

Главный научный редактор

Корчунов А.Г. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

Заместитель главного научного редактора

Анцупов В.П. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

Бобарикин Ю.Л. – «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», доцент, кандидат технических наук, г. Гомель, Республика Беларусь.

Горбатьюк С.М. – Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», профессор, доктор технических наук.

Кузьминов А.Л. – «Череповецкий государственный университет», профессор, доктор технических наук.

Нижегородов В.В. – главный механик ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Раскатов Е.Ю. – «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор, доктор технических наук.

Трофимов В.Н. – «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор, доктор технических наук.

Ответственный редактор

Слободянский М.Г. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кандидат технических наук.

Журнал основан в 2012 г.
Периодичность выхода – 2 номера в год.

Адрес редакции:
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Тел.: (3519) 29-85-07, 29-84-51
Website: www.momz-magtu.ru
E-mail: momz-magtu@yandex.ru;
momz-magtu@mail.ru

Журнал отпечатан издательским центром МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Выход в свет 25.06.2015. Заказ 467.
Тираж 300 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

М.-Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, Д. И. Юсупов Плазменный подогрев стали и конструкции промежуточных ковшей МНЛЗ для его реализации	3
К.С. Нейгебауэр, А.В. Королев Распределения внешней комбинированной нагрузки между шариками и выявление критической силы удара при шариковой раскатке упорных подшипников	8
А.В. Анцупов (мл), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, В.А. Русанов Теоретический метод обеспечения ресурсных характеристик деталей машин.....	14
А.А. Герасимова, А.Г. Радюк Исследование способов повышения стойкости узких стенок кристаллизаторов МНЛЗ	18
Р.Н. Савельева, К.В. Чернов Прогнозирование долговечности клапанов насоса сжиженных газов по критерию износостойкости рабочих элементов	23
В.В. Драгобецкий, А.А. Шаповал, Д.В. Мосьпан Использование эвристических методов при разработке технологий изготовления лент из тугоплавких металлов.....	29
А.А. Королев, А.В. Королев, Е.В. Мухина Математическая модель стохастического способа комплектования шариковых подшипников	35
К.Н. Вдовин Разработка рафинирующих устройств модернизируемых промежуточных ковшей МНЛЗ....	42
А.А. Королев, А.В. Королев, Е.В. Мухина, А.С. Яковинин, А.Ф. Балаев Повышение производительности сборки колец подшипников с использованием нового способа стабилизации геометрических параметров	46
В.В.Точилкин Методология выбора параметров и создание металлоприемника промежуточного ковша МНЛЗ	50
Ю.В. Жиркин, Е.А. Пузик Алгоритм подбора смазочного материала для смазывания подшипниковых опор рабочих валков клетей кварто	55
Ю.С. Ляшева, О.А. Марочкин Оборудование системы промежуточный ковш - кристаллизатор сортовых МНЛЗ	61



УДК 621.746.32

М.-Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, Д.И. Юсупов
Объединённый институт высоких температур РАН
г. Москва, Россия
E-mail: spt_yusupov@mail.ru
Дата поступления 05.03.2015

В авторской редакции

ПЛАЗМЕННЫЙ ПОДОГРЕВ СТАЛИ И КОНСТРУКЦИИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ МНЛЗ ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Аннотация

Описан зарубежный и отечественный опыт применения плазменного подогрева стали в проковше МНЛЗ для снижения перегрева стали над ликвидусом и стабилизации температуры, разливаемой стали, что положительно сказывается на качестве непрерывнолитой заготовки и повышает выход годного металла. Приведены особенности конструкций промежуточных ковшей с камерами для плазменного подогрева стали при непрерывной разливке, разработана конструкция двухручьевого проковша с камерами подогрева для первого отечественного опытно-промышленного опробования технологии.

Ключевые слова: проковш, конструкция, непрерывная разливка, камера подогрева, плазменный подогрев стали, качество сляба.

Многолетний зарубежный опыт применения плазменного подогрева стали в промежуточном ковше при непрерывной разливке [1, 2] и недавние опытно-промышленные испытания технологии на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» [3] показали эффективность и надёжность данной технологии. Возможность оперативного тепловложения в разливаемый металл непосредственно перед попаданием его в кристаллизатор позволяет снизить температуру разливаемой стали и приблизить её к температуре ликвидуса для разливаемой марки стали с перегревом в пределах 5-10 °С, свести к минимуму колебания температуры стали при разливке, улучшить условия охлаждения металла в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, снизить уровень термомеханических напряжений в затвердевающей корочке. Кроме этого, уменьшается ширина зоны столбчатых кристаллов, увеличивается доля равноосных кристаллов в сечении сляба, снижается вероятность возникновения таких дефектов, как осевая ликвация и центральная пористость.

Технологию плазменного подогрева стали в проковше используют многие зарубежные фирмы: CORUS (Великобрита-

ния), DUNAMET ANVAL (Швеция), KAVASAKI, NIPPON STEEL NKK (Япония), POSKO (Ю. Корея), SOLLAC (Франция) и др. Тепловой КПД нагрева газа в генераторах плазмы (плазмотронах) в указанных технологиях варьируется в широких пределах: от 30% до 80%. Нагрев металла обеспечивается излучением плазмы и тепловым потоком от опорных пятен дуги на поверхности жидкой стали. Эффективность нагрева определяется многими факторами: направлением и скоростью потоков металла в промежуточном ковше, количеством шлака на поверхности металла, скоростью разливки, конфигурацией промежуточного ковша и его свода, длиной и силой тока дуги [1].

Специалистами ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», ОАО «ММК», ОИВТ РАН и ООО «АГНИ-К» впервые в России в ноябре 2011 года были успешно проведены опытно-промышленные испытания (рисунок 1) технологии и оборудования плазменного подогрева стали в проковше МНЛЗ №4 ККЦ ОАО «ММК» [4]. Последующие исследования металла слябов, разлитых с применением новой технологии показали, что снижение перегрева стали над ликвидусом при разливке

с 30 до 10 °С приводит к значительному росту показателей пластичности и снижению разброса значений показателей пластичности и прочности по сечению сляба [5, 6]. Кроме того, снижение перегрева при разливке уменьшает расход воды на охлаждение непрерывнолитой заготовки,

повышает срок службы футеровки промковша за счёт более благоприятных температурных условий и экономит электроэнергию и графитовые электроды в агрегате печь-ковш, а также позволяет повысить производительность разливки.



Рисунок 1. Испытания плазменного подогрева в промковше

В начале внедрения технологии непрерывной разливки стали промежуточный ковш имел функцию промежуточной ёмкости между стальковшом и кристаллизатором, необходимой для того, чтобы иметь возможность заменять опорожнённый стальковш на полный, не прерывая при этом разливку и сохраняя относительно постоянный напор металла, поступающего в кристаллизатор. Исполнение промковшей с учетом влияния на расплав негативных факторов позволяет рассматривать промковш как отдельный металлургический агрегат, предназначенный для дополнительного, внепечного рафинирования стали и другого воздействия, повышающего ее качество. Современные промковши МНЛЗ оснащены устройствами, снижающими загрязнение стали от вторичного окисления, взаимодействия со шлаком, эрозии огнеупоров и т.п. За счет организации рационального движения металла обеспечивается всплытие и отделение неметаллических включений, исключение

укороченных путей и застойных зон, а также использование дополнительных технологических приемов: применение крышек специальной конструкции и покровных флюсов, продувка нейтральным газом, регулирование температуры, осуществление микролегирования и раскисления стали [7, 8].

Для осуществления эффективного плазменного подогрева стали при разработке конструкции промковша необходимо учитывать, что металл должен не только нагреваться в камере подогрева, но и выпускаться из промежуточного ковша в кристаллизатор с минимальными отклонениями по температуре в течение всего времени разливки плавки. Известно, что переливные каналы активно влияют на тепло- и массообменные процессы в промежуточном ковше. При плазменном нагреве роль переливных каналов возрастает. Форма и вид переливных каналов обеспечивают равномерное распределение температуры металла в камере подогрева и

разливочном отсеке, а также повышение качества литой заготовки.

Известна конструкция промежуточного двухручьевого ковша [9] с двумя камерами для плазменного подогрева жидкого металла с крышками 43, в которой камеры для плазменного подогрева металла расположены между приемным 36 и разливочными 42 отсеками и разделены перегородками 37, 40 с переливными каналами

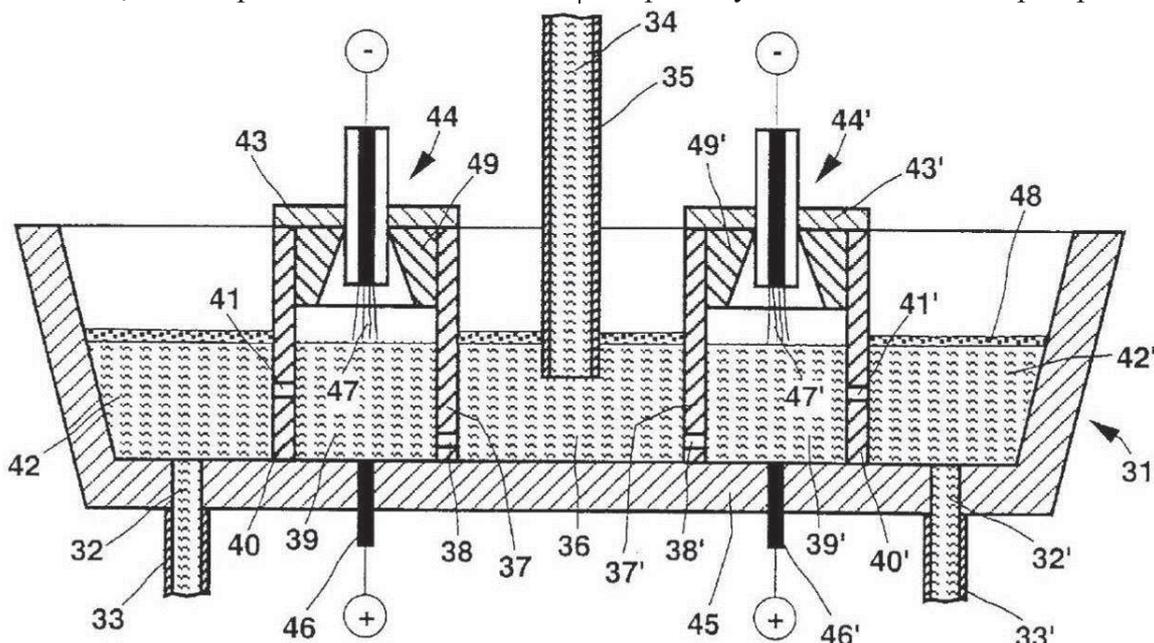


Рисунок 2. Конструкция промежуточного ковша с камерами подогрева

Недостатком этого ковша является малая турбулентность металла как в камере подогрева металла, так и в разливочных отсеках ковша при перемещении металла на пути от приемного отсека промежуточного ковша до разливочного стакана и кристаллизатора. Отмечается низкое качество непрерывнолитых заготовок из-за затягивания неметаллических включений в зону действия стопоров и последующему зарастанию погружного стакана.

Для проведения опытно-промышленного опробования технологии и установки плазменного подогрева стали (УППС) в промковше МНЛЗ № 4 ККЦ ОАО «ММК» был разработан и запатентован двухручьевой промковш с камерами для плазменного подогрева стали [10, 11, 12].

Разливка стали с применением плазменного подогрева осуществляется следующим образом (рисунок 3). С помощью механизмов перемещения плазмотроны 6

41, 38 (рисунок 2). Внутренние стены промежуточного ковша и перегородки сформированы из огнеупорного материала. Вставка 49 из огнеупорного материала, имеющая отверстие расширяющейся формы, дополняет крышку 43 и верхнюю часть внешней стены промежуточного ковша и перегородок камеры нагрева. Крышка крепится к огнеупорной части промежуточного ковша и перегородок.

опускают через отверстия 14 в крышках 7 до необходимого положения их торцов от зеркала металла 4. Оператор посредством компьютера производит запуск процесса нагрева. Подается аргон, включаются источники вспомогательных дуг. После замыкания рабочей дуги через расплав параметры процесса подогрева определяются в зависимости от температуры и скорости разливки стали. Вертикальное перемещение при работе плазмотронов осуществляется в соответствии с изменением уровня металла в промежуточном ковше. Металл 4, подаваемый из сталь-ковша через защитную трубу 3, попадает в приёмный отсек 2 промковша 1. Через цилиндрические отверстия 8 в скиммерных перегородках 16, расположенных под углом к горизонтали, расплав из приёмного отсека 2 поступает в камеры подогрева 5 в направлении столба дуги плазмотрона. Эффективному тепловложению в расплав от плазменного столба способствует перемешива-

ние металла в камере подогрева и его постоянное течение под анодным (катодным) пятном на зеркале расплава. Для этого в центре камеры подогрева 5 уставлен отбойник 11, который увеличивает вертикальную составляющую скорости течения расплава, полученную от его прохождения через цилиндрические отверстия 8. Сочетание отверстий 8, расположенных под углом к горизонтали, и отбойника 11 обеспечивает направление основного потока металла непосредственно к источнику тепла – столбу дуги генератора плазмы 6. После прохождения зоны нагрева металл поступает в разливочный отсек 15 через прямоугольное отверстие 9 в перегородке 17, от-

куда производится разливка в кристаллизатор МНЛЗ. Для полного опорожнения проковша при его замене предусмотрены отверстия 10 в отбойнике 11 и отверстие 12 в перегородке 17, через которые проходит незначительный расход металла при работе проковша в установившемся режиме. Через отверстие 18 в перегородке 17 сбрасывается избыток давления газа из камеры подогрева 19 в разливочный отсек 15. Замер температуры разливаемого металла производится с помощью системы непрерывного измерения температуры, термopара 13 которой погружается в расплав в разливочном отсеке.

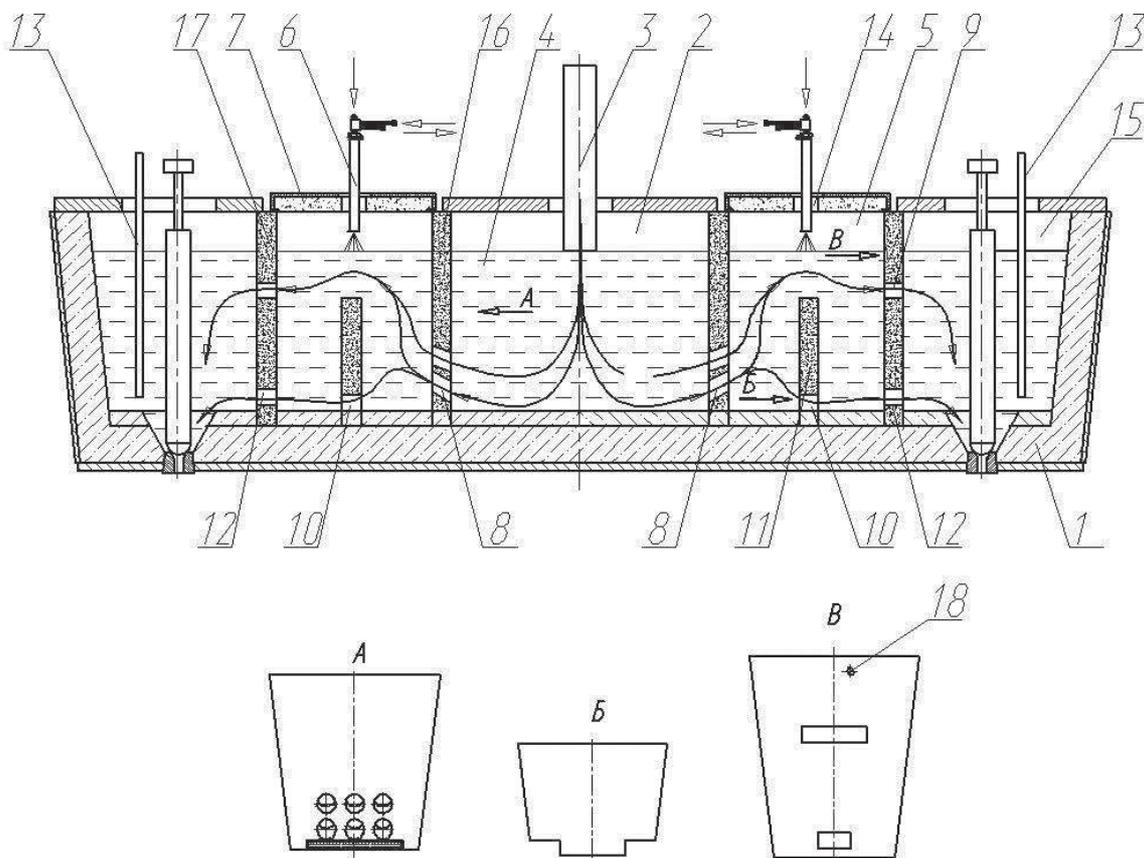


Рисунок 3. Схема течения стали в проковше с камерами подогрева

На рисунке 4 представлен экспериментальный проковш с камерами для плазменного подогрева стали при непрерывной разливке.

По результатам экспериментальных плавов с применением УППС скорректирована технология плазменного подогрева стали и стабилизации температуры металла в промежуточном ковше, проведены исследования металла слябов, показавшие,

что данная технология способствует повышению качества непрерывнолитой заготовки: уменьшается центральная химическая и структурная неоднородности заготовок, более равномерно распределяются неметаллические включения, уменьшается количество трещин, выравниваются механические свойства по сечению слитка, существенно повышается пластичность [5, 6].



Рисунок 4. Экспериментальный промковш с камерами для плазменного подогрева

Стоит отметить, что описанные выше конструкции промежуточных ковшей с камерами для плазменного подогрева стали предназначены для двухручьевого машины непрерывного литья заготовок. Для их совершенствования необходимо проводить исследования с применением методов математического моделирования течения металла в промковше, особенно, если задачей является разработка конструкции многоручьевого промковша с камерами подогрева.

Разработанная технология и полученные результаты применимы на металлургических предприятиях, особенно, при непрерывной разливке проблемных марок стали, например, перитектических сталей, склонных к образованию дефектов непрерывнолитой заготовки.

Библиографический список

1. Состояние и пути развития плазменного подогрева стали в промежуточном ковше МНЛЗ. Часть 1 / А.С. Тюфтяев, Г.А. Филиппов, Д.И. Юсупов и др. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2014. №4. – С. 42-47.
2. Пути развития плазменного подогрева стали в промежуточном ковше. Часть 2 / А.С. Тюфтяев, Г.А. Филиппов, Д.И. Юсупов и др. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2014. №5. – С. 50-55.
3. Применение плазменного подогрева металла в промежуточном ковше на примере технологии получения непрерывнолитых слябов на ОАО «ММК» /

- Ю.А. Пак, М.В. Глухих, Д.И. Юсупов и др. // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. – 2013. – №2. – С. 21-25.
4. Установка плазменного подогрева стали в промежуточном ковше / Э.Х. Исакаев, Г.А. Филиппов, Д.И. Юсупов и др. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2012. – №11. – С. 42-45.
5. Исследования макроструктуры и механических свойств стали, разлитой с применением плазменного подогрева в промежуточном ковше МНЛЗ / Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, Г.А. Филиппов, Д.И. Юсупов // Металлург. – 2013. – №5. – С. 69-74.
6. Влияние перегрева при непрерывной разливке на структуру и свойства стали / Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, Г.А. Филиппов, Д.И. Юсупов и др. // «Сталь». – 2014. №9. – С. 24-37.
7. Патент РФ № 2189292 Промежуточный ковш установки непрерывной разливки стали. Оpubл. 20.09.2002. Тахаутдинов Р.С., Корнеев В.М. и др.
8. Патент РФ № 2167030 Промежуточный ковш. Оpubл. 20.05.2001. Савченко В.И., Шталалов К.В. и др.
9. Патент США № 6110416(А), 10.03.2009.
10. Патент РФ № 2477197. Промежуточный ковш для разливки стали с камерами для плазменного подогрева жидкого металла при разливке. Оpubл. 10.03.2013. Галкин В.В., Исакаев М.-Э.Х., Пак Ю.Ю., Филиппов Г.А., Юсупов Д.И. и др.
11. Патент РФ № 2478021. Промковш МНЛЗ для плазменного подогрева металла. Оpubл. 27.03.2013. Пак Ю.А., Филиппов Г. А., Углов В. А., Глухих М. В., Исакаев М.-Э.Х., Тюфтяев А.С., Сарычев Б.А., Юречко Д.В., Юсупов Д. И. и др.
12. Патент РФ № 2490089. Двухручьевой промежуточный ковш установки непрерывной разливки стали. Оpubл. 20.08.2013. Исакаев М.-Э. Х., Тюфтяев А.С., Спектор Н.О., Филиппов Г.А., Юсупов Д.И.



УДК 621.774

К.С. Нейгебауэр, А.В. Королев
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»
г. Саратов, Россия
E-mail: Kristina.neigebauer@yandex.ru
Дата поступления 05.02.2015

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ШАРИКАМИ И ВЫЯВЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ СИЛЫ УДАРА ПРИ ШАРИКОВОЙ РАСКАТКЕ УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ¹

Аннотация

В статье рассмотрен механизм шариковой раскатки колец шариковых подшипников. Установлены закономерности распределения внешней комбинированной нагрузки между шариками. Предложена математическая модель процесса раскатки, позволяющая установить соотношение между нагрузкой на шарики и действующими факторами, в том числе углом контакта шариков с дорожкой качения и соотношением радиальной и осевой внешних нагрузок.

Ключевые слова: подшипник, шариковая раскатка, деформация колец, раскатник, дорожка качения.

Введение

Известны многочисленные попытки ряда авторов, таких как, R. Stribeck (Р. Стрибек), Д.Н. Решетова, М.П. Белянчикова, Е. Meldau (Е. Мелдау) и других, определить распределение нагрузки между телами качения, так как оно оказывает существенное влияние не только на процесс раскатки, но и на грузоподъемность и долговечность подшипников. К сожалению, достаточно точного решения получено не было, и в настоящее время эти нагрузки определяют по эмпирическим коэффициентам.

Для автомобильных подшипников типа 1118-2902840, которые используются в верхней опоре передней подвески автомобилей Калина, Приора, Гранта, основную опасность при эксплуатации составляют удары. Фактически для подшипников, кольца которых подвергались шариковой раскатке, критической силой удара является сила, при которой нагрузка на наиболее нагруженный шарик равна аналогичной силе воздействия на шарик при

раскатке. Под действием этой силы в течении нескольких первых оборотов осуществляется пластическая деформация дорожек качения, которая затем переходит в упругую деформацию и обеспечивает стабилизацию геометрических параметров подшипника. Поэтому исследование механизма распределения внешней нагрузки между шариками является важным для повышения эффективности процесса шариковой раскатки.

Основная часть

Раскатка дорожки качения кольца 2 (рисунок 1) шарикового подшипника осуществляется раскатником, состоящим из набора шариков 1 с числом z и оправки 3, прижимающей шарики к обрабатываемой поверхности под углом контакта β . На оправку действует внешняя нагрузка P , направленная в центр симметрии расположения шариков под углом α к оси вращения кольца 1. Требуется определить распределение нагрузки P между шариками.

¹

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России - УИН ФЦП RFMEFI57414X0015

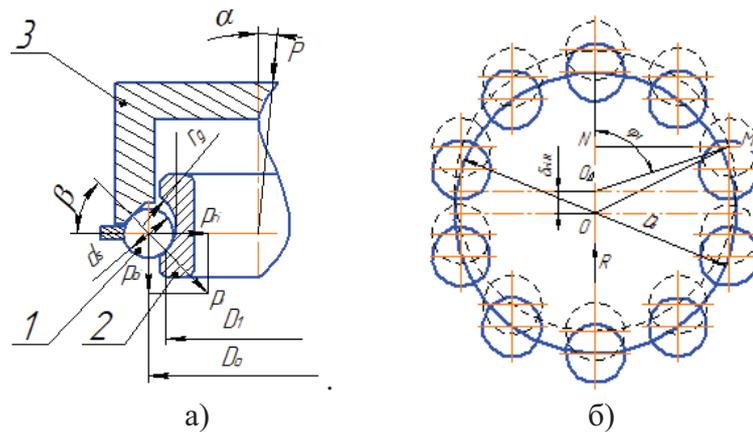


Рисунок 1. Схема контакта тел и дорожки качения:
а) поперечное сечение; б) вид в плане

Примем следующие допущения:

1. Деформация колец под действием внешней нагрузки пренебрежимо мала по сравнению с локальной деформацией тел и дорожки качения.
2. Осевой и радиальный зазоры между обрабатываемой поверхностью, поверхностью оправки и шариками отсутствуют.
3. Угол контакта тел и дорожки качения в подшипнике постоянный и пренебрежимо мало зависит от деформации тел и дорожки качения.

Обозначим нагрузку на шарик, действующую вдоль линии контакта с дорожкой качения, через p_i , осевую нагрузку, действующую вдоль оси кольца, через P_{oi} , а радиальную нагрузку P_{ri} .

$$P_{iA} = \frac{A}{z \cdot \sin \beta}, P_{riA} = P_{iA} \cdot \cos \beta = \frac{A}{z \cdot \operatorname{tg} \beta}; P_{oiA} = P_{iA} \cdot \sin \beta = \frac{A}{z}, \quad (1)$$

где P_{iA} - нагрузка, действующая на шарик вдоль линии его контакта с дорожкой качения, вызванная внешней осевой нагрузкой A ; P_{riA} - составляющая нагрузки на шарик, возникающая под действием нагрузки A , в радиальном направлении; P_{oiA} - составляющая нагрузки на

$$\delta_{iA} = K_g \sqrt[3]{P_{iA}^2}, \delta_{riA} = K_g \sqrt[3]{\frac{A^2}{z^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}} \cdot \cos \beta; \delta_{oiA} = K_g \sqrt[3]{\frac{A^2}{z^2}} \cdot \sin \beta \quad (2)$$

где δ_{iA} - деформация шарика с дорожкой качения кольца под действием осевой нагрузки; δ_{riA} - составляющая деформации δ_{iA} , действующая в радиальном

Рассмотрим распределение этих сил, возникающих от действия внешней нагрузки P , между шариками.

Внешняя нагрузка P , действующая под углом α к оси вращения кольца подшипника, раскладывается на две составляющие: осевую A , равную $A = P \cdot \cos \alpha$ и радиальную R , равную $R = P \cdot \sin \alpha$. Момент этой силы P относительно центра симметрии шариков равен нулю, так как сила P направлена в этот центр. Составляющие внешней нагрузки A и R передаются на шарик под углом контакта β .

Внешняя нагрузка, действующая вдоль оси подшипника A , равномерно распределяется между шариками:

шарик, возникающая под действием нагрузки A и действующая в осевом направлении.

Под действием нагрузки P_{iA} между шариками и дорожкой качения возникает упругая деформация, равная [1, 2]:

направлении; δ_{oiA} - составляющая деформации δ_{iA} , действующая в осевом направлении; K_g - коэффициент, определяемый в зависимости от размеров тел и

дорожки качения и упругих свойств их материалов.

Под действием радиальной внешней нагрузки R по линии контакта шариков, находящихся в поле действия этой нагрузки, вдоль линии контакта возникает сила, равная (рисунок 1 б):

$$P_{iRr} = P_{oR} \cdot \cos \varphi_i \cdot \cos \beta, \quad (3)$$

при $-(\pi/2) < \varphi < \pi/2$

где φ_i - угол расположения i -ого шарика относительно направления действия радиальной нагрузки (рисунок 1б); P_{oR} - максимальная нагрузка, вызванная действием силы R на шарик, расположенный под углом $\varphi=0$; p_{iR} - нагрузка, действующая на i -ый шарик, находящийся под углом φ_i .

Составляющие силы p_{iR} (3) равны:

$$\begin{aligned} P_{riR} &= p_{iR} \cdot \cos \beta; \\ P_{oiR} &= p_{iR} \cdot \sin \beta, \end{aligned} \quad (4)$$

где P_{riR} - составляющая нагрузки на i -ый шарик, возникающая под действием нагрузки R и действующая в радиальном направлении; P_{oiR} - составляющая нагрузки на i -ый шарик, возникающая под действием нагрузки R и действующая в осевом направлении.

Под действием нагрузки P_{iR} между шариками и дорожкой качения возникает упругая деформация, равная:

$$\begin{aligned} \delta_{iR} &= K_g \cdot \sqrt[3]{p_{iR}^2} \\ \delta_{riR} &= K_g \sqrt[3]{p_{riR}^2 / \cos \beta \cdot \cos \beta} \\ \delta_{oiR} &= K_g \sqrt[3]{p_{riR}^2 / \cos^2 \beta \cdot \sin \beta} \end{aligned} \quad (5)$$

где δ_{iR} - деформация i -ого шарика с дорожкой качения от действия радиальной нагрузки; δ_{riR} - составляющая деформации i -ого шарика и дорожки качения, возникающей под действием нагрузки R и действующая в радиальном направлении; δ_{oiR} - составляющая деформации i -ого шарика и дорожки качения, возникающей под действием нагрузки R и действующая в осевом направлении подшипника.

Определим зависимость деформацию δ_{riR} i -ого шарика от деформации δ_{roR} максимально нагруженного шарика, находящегося к направлению действия нагрузки R под углом φ . Обозначим точку контакта i -ого шарика с дорожкой качения внутреннего кольца через M . Из рисунка 1б видно, что величина упругой деформации дорожки качения и шарика, расположенного к оси $O_v Y$ под углом φ , равна:

$$\delta_{riR} = \Delta_i = OM - O_{\Delta}M,$$

где $O_{\Delta}M = 0,5 \cdot D_o$.

Из треугольника ONM после преобразований находим:

$$\delta_{riR} = \frac{D_o}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4\delta_{roR}}{D_o} \cos \varphi_i + \frac{4\delta_{roR}^2}{D_o^2}} - 1 \right). \quad (6)$$

Так как деформация тел δ_{roR} намного меньше их размера D_o , то раскладывая выражение (6) в ряд и отбрасывая малозначимые члены ряда с погрешностью менее 0,1% получим:

$$\delta_{riR} = \delta_{roR} \cdot \cos \varphi_i. \quad (7)$$

Далее определим суммарную силу, действующую на i -ый шарик от сил A и R . Деформация от этой силы равна сумме деформаций от ее составляющих:

$$\delta_i = \delta_{iR} + \delta_{iA}.$$

Тогда сила, действующая на i -ый шарик от силы P , равна

$$\begin{aligned} p_i &= (\delta_i / Kg)^{\frac{3}{2}} = ((\delta_{iR} + \delta_{iA}) / Kg)^{\frac{3}{2}} = \\ &= ((\delta_{roR} \cdot \cos \varphi + \delta_{riA}) / (Kg \cdot \cos \beta))^{\frac{3}{2}} \end{aligned}$$

Силу p_i (7), действующую на i -ый шарик, разложим на две составляющие:

$$\begin{aligned} p_{ri} &= ((\delta_{riR} + \delta_{riA}) / (Kg \cdot \cos \beta))^{\frac{3}{2}} \cdot \cos \beta; \\ p_{oi} &= ((\delta_{riR} + \delta_{riA}) / (Kg \cdot \cos \beta))^{\frac{3}{2}} \cdot \sin \beta. \end{aligned} \quad (8)$$

Так как связь между силой и деформацией не является линейной, то это существенно усложняет механизм влияния геометрических параметров подшипника на распределение нагрузки между шариками. Разделим равенства (8) на максимальные значения соответствующих нагрузок P_{ro} и P_{oo} ($\varphi_o = 0$) и получим:

$$\begin{aligned}
 p_{ri} &= p_{ro} \cdot \left(\frac{\delta_{roR} \cos \varphi_i + \delta_{rA}}{\delta_{roR} + \delta_{rA}} \right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}}; \\
 p_{oi} &= p_{oo} \cdot \left(\frac{\delta_{roR} \cos \varphi_i + \delta_{rA}}{\delta_{roR} + \delta_{rA}} \right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где $c = \delta_{roR} / \delta_{rA}$.

После операции суммирования равенств (9) по всем шарикам можно найти максимальные значения взаимно перпендикулярных нагрузок на шарики. Учитывая направление действия радиальной нагрузки R , а также то, что угол между шариками равен $2\pi/z$, получим систему двух уравнений:

$$R = p_{ro} \cdot \sum_{i=0}^{z_a-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}} \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) ; A = p_{oo} \cdot \sum_{i=0}^{z_a-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}}, \tag{10}$$

где φ_o угол расположения наиболее нагруженного шарика $0 \leq \varphi_o \leq \pi/z$.

Система уравнений (10) не решается, так как неизвестно значение c . Третье уравнение можно определить, если взять отношение первых двух.

Обозначим:

$$m_r = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=0}^{z_a-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}} \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) ; m_a = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=0}^{z_a-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}}. \tag{11}$$

Разделив равенства (10) друг на друга и учитывая обозначения (11), получим:

$$\frac{m_r}{m_a} = \frac{R \cdot \sin \beta}{A \cdot \cos \beta} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta. \tag{12}$$

Так как зависимости m_r и m_a от значения c находятся в неявном виде, то их решение осуществляется численными методами. Результаты расчета представлены в таблице.

Таблица 1

Значения коэффициентов m_r , m_a и m_r/m_a при $\varphi_o = 0$

	n	c										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
m_r	3	0	0,066	0,117	0,157	0,189	0,215	0,237	0,255	0,269	0,281	0,292
m_a		1	0,868	0,767	0,686	0,623	0,571	0,530	0,496	0,470	0,448	0,433
m_r/m_a		0	0,076	0,171	0,229	0,303	2,82	2,40	2,12	1,91	1,76	0,674
m_r	5	0	0,065	0,114	0,151	0,180	0,203	0,220	0,233	0,243	0,250	0,256
m_a		1	0,868	0,766	0,866	0,622	0,570	0,528	0,494	0,466	0,443	0,425
m_r/m_a		0	0,075	6,72	4,53	3,45	2,82	2,40	2,12	1,92	1,77	0,602
m_r	0	0	0,065	0,114	0,151	0,180	0,202	0,220	0,233	0,243	0,250	0,255
m_a		1	0,868	0,766	0,866	0,622	0,570	0,528	0,494	0,466	0,443	0,424
m_r/m_a		0	0,075	0,149	0,175	0,289	0,354	0,417	0,472	0,521	0,536	0,601

Важно отметить, что процесс раскатки будет устойчивым, если $c < 1$, а, следовательно, как следует из таблицы, $m_r/m_a < 0,6$. Этому соответствует $tg\alpha < 0,6/tg\beta$. В противном случае часть шариков будет выходить из контакта с дорожкой качения и могут возникнуть вибрации.

Как видно из таблицы при $n > 5$ значения коэффициентов практически не зависят от числа шариков.

Расчеты также показали, что при $n = 3$ значение коэффициента m_r колеблется в зависимости от значения φ_0 от 5% при $c = 0.1$ до 30% при $c = 1$. Следовательно, осуществлять шариковую раскатку тремя шариками не рационально, так как при этом могут возникнуть вибрации и погрешности формы обработанной поверхности. С увеличением числа шариков раскатного инструмента колебание нагрузки уменьшается и при $z \geq 5$ эта разница не достигает 1%.

С учетом (9) определим искомую зависимость нагрузки на i -ый шарик от нагрузки, действующей на наиболее нагруженный шарик.

$$P_u = \frac{P_o \cdot z_p}{\sqrt{\frac{\cos^2 \alpha}{m_r} + \frac{\sin^2 \alpha}{m_a}}} = \frac{6549 \cdot 46}{\sqrt{\frac{\cos^2 7^\circ}{0,137} + \frac{\sin^2 7^\circ}{0,726}}} = 110600 \text{ Н.} \quad (15)$$

Найдем силу, при которой начинается пластическая деформация дорожек качения, не подвергавшихся раскатке. Используя формулу при $p_p = 0$, найдем силу воздействия на наиболее нагруженный

$$P_u = \frac{P_o \cdot z_p}{\sqrt{\frac{\cos^2 \alpha}{m_r} + \frac{\sin^2 \alpha}{m_a}}} = \frac{3556 \cdot 46}{\sqrt{\frac{\cos^2 7^\circ}{0,137} + \frac{\sin^2 7^\circ}{0,726}}} = 60070 \text{ Н.}$$

Как видно из результатов расчета, подшипник после раскатки выдерживает на 84% большую силу удара, чем стандартный подшипник.

Таким образом, решена задача определения механизма распределения внешней нагрузки, действующей на раскатчик, между шариками и выявлена критическая сила удара на наиболее нагруженный шарик.

$$p_i = p_o \cdot \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

Равенство (13) показывает распределение внешней нагрузки между шариками. Как видно, оно существенно зависит от значения c . При $c = 0$, что соответствует $\alpha = 0$, нагрузка между шариками распределяется равномерно. С увеличением значения c неравномерность нагрузки на шарик возрастает. При $c > 0$ нагрузка на шарик уменьшается при увеличении угла их расположения φ_i от нуля до $\varphi_i = \pi$. При дальнейшем увеличении угла φ_i нагрузка на шарик возрастает.

В свою очередь, как не сложно определить:

$$P_o = \frac{P}{z} \cdot \sqrt{\frac{\sin^2 \alpha}{m_r \cdot \cos^2 \beta} + \frac{\cos^2 \alpha}{m_a \cdot \sin^2 \beta}} \quad (14)$$

Как было сказано ранее критической силой удара является сила, при которой нагрузка на наиболее нагруженный шарик равна аналогичной силе воздействия на шарик при раскатке.

Значение этой силы равно P_o . Тогда критическая сила удара равна:

шарик, при котором начинается пластическая деформация дорожек качения в стандартном подшипнике:

Тогда критическая сила удара равна:

Заключение

В результате определения механизма распределения внешней нагрузки, действующей на раскатчик между шариками достигается следующий эффект:

- Снижение контактных напряжений в шарикоподшипнике, так как радиус локальных дорожки качения наружного и внутреннего колец, по кото-

рым катятся шарики в шарикоподшипнике, близок к радиусу шариков, а контактные напряжения распределены по поверхности контакта более равномерно, чем в стандартном подшипнике.

- Упрочнение поверхности в зоне контакта с шариками компенсирует эффект, получаемый от снижения твердости колец подшипника.
- Снижение момента трения в подшипнике, так как размеры площадки контакта ограничены размером поперечного сечения локальной дорожки качения даже при больших внешних нагрузках.
- Снижение требований к точности предшествующих технологических операций механической обработки колец шарикоподшипника, так как процесс шариковой раскатки устраняет такие дефекты, как волнистость, отклонение от круглости, шероховатость.

Все это обеспечивает повышение качества изготовления подшипников и снижение затрат на их производство.

Библиографический список

1. Королев А.А. Математическое моделирование упругих тел сложной формы/ А.А. Королев.- Саратов: Изд-во СГТУ, 2001. 128с.
2. Королев А.В. Совершенствование технологии изготовления тонкостенных колец подшипников/ А.В. Королев, Королёв Ан.А., Королёв Ал.А.- Саратов: Изд-во СГТУ, 2004. 136 с.
3. Королев А.В. Точная холодная торцовая раскатка/ А.В. Королев , Королев Ан.А. - Саратов: Изд-во СГТУ, 2003. 142 с.
4. Патент РФ 2222392 Годунов В.Б., Королев А.А., Королев А.А. Способ раскатки деталей. МПК В21В19/06.
5. Королев А.В. Воробьев Р.В. Новая прогрессивная технология получения сложнопрофильных заготовок колец подшипников из трубного проката. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. Ч.1: «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (X Бернардовские чтения) Т1 - Иваново, 2001, С. 221.
6. Королев А.В., Воробьев Р.В. Прогрессивная технология получения кольцевых заготовок из трубного проката. Вестник инженерной Академии Украины. КВ № 2635. №3. 2001г. Ч1 С. 211-214.
7. Королев А.В., Воробьев Р.В. Математическое моделирование процесса холодной раскатки. «Динамика технологических систем». Труды VI Международной научно-технической конференции Т1. - Ростов н/Д., ДГТУ. 2001-С.55-59
8. Патент РФ 2094158 Королев А.В., Полстьянов П.Ф., Козин В.А. Устройство для раскатки деталей // Патент РФ №2094158, МПК В21Н1/02, В21D37/12.
9. Королев А.В. Технология окончательной обработки дорожек качения подшипников / А.В. Королёв, С.А. Ефимов, А.А. Меркулов. 3-я международная научная конференция "Современные материалы, техника и технология" Курск 2013.
10. Королев А.В. Момент сопротивления вращению упорно-радиального подшипника / А.В.Королёв К.С., Нейгебауэр, Е.В Мухина. Материалы 3-ей Международной научно-практической конференции "Перспективное развитие науки, техники и технологий" Курск 2013, с. 161-165



ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Аннотация

Предложен метод теоретического анализа и обеспечения долговечности наиболее нагруженных деталей машин на стадии их конструирования на основе моделирования процессов их деградации в предполагаемых условиях эксплуатации. В его основу положена методика постановки и решения краевых задач физической теории надежности элементов механических систем по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов.

Ключевые слова: надежность, долговечность, краевая задача, критерий, прочность, износостойкость ресурс, срок службы.

На стадии конструирования новых машин при их компоновке в процессе сравнительного анализа различных вариантов конструкции основных, наиболее нагруженных элементов, выполняют контрольную проверку их надежности [1]. С этой целью применяют статистические модели отказов, построенные на основе многочисленных испытаний модельных или натуральных образцов, что существенно увеличивает материальные и временные затраты этапов проектно-конструкторской разработки. Поэтому для решения актуальной проблемы физической теории надежности (особенно при создании новых, уникальных изделий единичного производства) - обеспечения требуемого в техническом задании уровня надежности наиболее нагруженных деталей и узлов без проведения модельных и натуральных экспериментов, в данной работе представлен метод теоретической оценки их ресурсных характеристик [2 - 4].

В его основу положена кинетическая концепция моделирования физики процессов разрушения материалов в известных условиях внешнего нагружения и методология построения моделей параметрических отказов исследуемых объектов, которая с позиции математической физики трактуется как методология постановки и

решения краевых задач теории параметрической надежности деталей машин [5 - 9].

В этом случае краевая задача для предсказания ресурсных параметров исследуемого элемента формулируется на основе следующих допущений и условий [7, 9]:

- нормального распределения выбранного для анализа контролируемого параметра X_t состояния изделия, как случайной величины;
- постоянного во времени распределения случайной величины скорости деградации исследуемого объекта - $dX_t / dt = \dot{X} = const$;
- стационарных условий внешнего теплового (температура $T = const$) и силового (максимальное напряжение $\sigma = const$) нагружения;
- задачу решают относительно среднего ожидаемого ресурса $t_{50} = \bar{t}$ и срока службы $\bar{t}_{сл}$, принимая допустимое значение вероятности безотказной работы $[P(t)] = \gamma = 0,5$ и квантили $[u_{np(\gamma)}] = 0$.

В результате формулируется незамкнутая система уравнений в общем виде [7, 8, 10]:

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{– уравнения эволюции изделия по выбранному параметру:} \\
 \bar{x}_t = \bar{x}_0 \pm \bar{x} \cdot t; \quad (1) \\
 \text{– уравнения перехода изделия в предельное состояние:} \\
 \bar{x}_t = \bar{x}_0 \pm \bar{x} \cdot t = x_{np}; \quad (2) \\
 \text{– уравнения для оценки ресурса и срока службы:} \\
 \bar{t} = \pm(x_{np} - \bar{x}_0)/\bar{x}; \quad \bar{t}_{cr} = \bar{t} \cdot (1 + \Pi), \quad (3)
 \end{array} \right\}$$

где $\bar{x}_0 = (x_{0\max} + x_{0\min})/2$ среднее значение случайного параметра $X_t = X_0$ состояния изделия на начальный момент времени t_0 ; $x_{0\max}, x_{0\min}$ - его максимальное и минимальное значения, задаваемые как начальные условия; (знак "плюс" используется для возрастающего, знак "минус" - для убывающего во времени параметра X_t);

x_{np} - задаваемое предельное значение параметра X_t ;

Π - доля плановых простоев исследуемого объекта.

При аналитическом решении задачи (1)-(3) необходимо сформулировать в явном виде кинетическое уравнение деградации исследуемого изделия для оценки средней скорости изменения контролируемого параметра \bar{x} в функции условий его внешнего нагружения, геометрических и микрогеометрических характеристик, а также свойств материала.

Если рассматриваемые элементы проектируемой машины подвержены возможному объемному разрушению в условиях статического или циклического стационарного нагружения, то в качестве параметра \bar{x}_t их технического состояния принимают плотность скрытой энергии $u_e(t) = u_{e_t}$ дефектов структуры локальных, наиболее нагруженных объемов материала, в которых действуют максимальные статические или циклические напряжения $\sigma = \sigma_{\max}$ при температуре T .

В этом случае скорость \bar{x} деградации нагруженного элемента определяется скоростью повреждаемости его материала - скоростью накопления плотности скрытой энергии \dot{u}_e , для оценки которой мож-

но использовать кинетическое уравнение повреждаемости твердых тел под нагрузкой, выведенное в рамках термодинамической теории прочности В.В. Федорова, в общем виде [10, 11]:

$$\bar{x} = \dot{u}_e = A \cdot sh \left[\frac{\nu}{2 \cdot R \cdot T} \left(\frac{k_\sigma^2 \cdot M_R^2 \cdot \sigma_i^2}{6 \cdot G(T)} - \bar{u}_e \right) \right] \quad (4)$$

$$\text{где } A = \frac{2 \cdot R \cdot T \cdot U(\sigma_0, T)}{h \cdot N_0} \exp \left[- \frac{U(\sigma_0, T)}{R \cdot T} \right];$$

R - универсальная газовая постоянная; h - постоянная Планка; N_0 - число Авогадро; σ_0 и σ_i - шаровая и девиаторная часть тензора напряжений:

$$\sigma_0 = M_R \cdot \sigma_{\max} / 3 \quad \text{и} \quad \sigma_i = M_R \cdot \sigma_{\max} \quad (4a)$$

$M_R^2 = ((1+r)^2 + (1-r)^2)/4$ - коэффициент эквивалентности нестационарных напряжений; $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ - коэффициент асимметрии; σ_{\max} и σ_{\min} - максимальное минимальное напряжение цикла; k_σ - коэффициент перенапряжения межатомных связей:

$$k_\sigma = 1 / \left(6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-2} \right)^2; \quad (4б)$$

HV - среднее значение твердости по Виккерсу;

$U(\sigma_0, T)$ - энергия активации процесса разрушения межатомных связей при данном напряжении σ_{\max} и стационарной температуре T :

$$U(\sigma_0, T) = U_0 - \Delta U(T) - \left(\frac{M_R^2 \cdot k_\sigma^2}{18 \cdot \nu \cdot K(T)} \right) \cdot \sigma_0^2; \quad (4в)$$

U_0 и ν - свободная энергия активации процесса при $T = 0$, $\sigma = 0$, и коэффициент неравномерности распределения внутренней энергии по объему нагруженной детали, значения которых выбираются по рекомендациям [11];

$\Delta U(T)$ - доля энергии активации, определяемая температурой:

$$\Delta U(T) = 3 \cdot \alpha_0(T) \cdot K(T) \cdot T / 2; \quad (4.г)$$

$K(T)$ - модуль объемной упругости материала при температуре T :

$$K(T) = E(T) / (3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu(T))); \quad (4.д)$$

$\alpha_0(T)$, $E(T)$, $\mu(T)$ и $G(T)$ - коэффициент линейного теплового расширения, модуль упругости, коэффициент Пуассона и модуль сдвига материала при температуре T , которую можно оценить по методике [11];

\bar{u}_e - среднее значение плотности скрытой энергии дефектов структуры материала элемента для заданных условий нагружения (σ_{\max}, T):

$$\bar{u}_e = (u_{e*} + u_{e0}) / 2; \quad (4.е)$$

u_{e*} и u_{e0} - ее критическое и начальное значение:

$$u_{e*} = \Delta H_S - u_T; \quad (4.ж)$$

$$u_{e0} = (0,071 \cdot HV)^{2,4} \cdot k_\sigma / (6 \cdot G);$$

ΔH_S - энтальпия материала в жидком состоянии при температуре плавления T_S ;

$u_T = \rho(T) \cdot c(T) \cdot T$ - тепловая составляющая плотности внутренней энергии материала при температуре T ; ρ , c - его плотность и теплоемкость.

Таким образом, система уравнений (3), (4)-(4.ж) становится статически определимой и позволяет на основе сравнительного теоретического анализа ресурса различных вариантов конструкции проектируемого изделия обеспечить требуемый в техническом задании уровень его долговечности по критерию объемной прочности материалов.

Если рассматриваемые элементы проектируемой машины являются деталями узлов трения и подвержены возможному процессу изнашивания в стационарных условиях поверхностного нагружения, то в качестве параметра \bar{x}_i их технического состояния обычно принимают изменяющийся при изнашивании линейный размер детали, средняя скорость скоростью \bar{x} искажения которого равна средней скорости \dot{y} его линейного изнашивания [12, 13].

Для ее определения можно использовать теоретическую зависимость, выведенную на основе энерго-механического подхода при совместном решении базовых уравнений молекулярно-механической и структурно-энергетической теории трения [12, 13]:

$$\bar{x} = \dot{y} = \alpha^* \cdot v \cdot f_{\text{мех}} \cdot p_a \cdot V_{\text{ск}} / \Delta u_{e*}, \quad (5)$$

где $\alpha^* = A_a / A_T$ - коэффициенты перекрытия (A_a и A_T - номинальная площадь контакта и площадь трения элемента);

v_i - коэффициент поглощения внешней энергии поверхностным слоем трибоэлемента, определяемый по методике Б.В. Протасова [14]

$f_{\text{мех}}$ - механическая составляющая коэффициента трения, определяемая для стационарных условий по методике И.В. Крагельского в функции физико-механических характеристик материалов поверхностных слоев при температуре T , вычисляемой по методике А.В. Чичинадзе [14];

$p_a = F_n / A_a$ - среднее номинальное давление на контакте (F_n - нормальная сила в сопряжении); $V_{\text{ск}}$ - скорость скольжения в трибоконтате;

$\Delta u_{e*} = \Delta H_S - u_{e0} - u_T$ - критическое приращение плотности скрытой энергии дефектов в поверхностном слое трибоэлемента. Здесь ΔH_{S_i} - энтальпия плавления материалов трибоэлементов в жидком состоянии; u_{e0} - плотность потенциальной составляющей внутренней энергии материалов поверхностных слоев в исходном состоянии, определяемая по (4.ж); $u_T = \rho(T) \cdot c(T) \cdot T$ - плотность кинетической составляющей внутренней энергии разрушаемых локальных объемов материалов поверхностного слоя трибоэлементов, нагретого до температуры T ; $\rho(T)$, $c(T)$ - их плотность и теплоемкость.

Таким образом, система уравнений (3) и (5) становится статически определимой и также позволяет на стадии конструирования обеспечить требуемый в техническом задании уровень долговечности исследуемых деталей узлов трения.

Предложенный метод исследования проектного ресурса деталей машин по критериям прочности и износостойкости материалов без проведения модельных или натуральных экспериментов практически реализован на ряде металлургических предприятий, в частности [3, 4, 14, 15]:

- при проектной оценке реконструкции привода вращения обжиговой печи по критерию прочности фундаментных болтов;
- для повышения долговечности системы уравнивания прокатных валков по критериям износостойкости уплотняющих элементов исполнительных гидродвигателей;
- для продления ресурса системы очистки горячекатаных полос от окалины по критериям износостойкости пар трения гидрораспределителей;
- для прогнозирования и повышения долговечности опорных валков листовых станов.

Библиографический список

1. Надежность в машиностроении: Справочник 1/Н17 Под общ. ред. В.В. Шашкина, Г. П. Карзова.- СПб.: Политехника, 1992.- 719 с.
2. Antsupov A.V. Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria / A.V. Antsupov, A.V. Antsupov (jun), V.P. Antsupov // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. №5 (45). P. 62-66.
3. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов / В.П. Анцупов, Л.Т. Дворников, Д.Г. Громаковский, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2014. №1. С. 141-146.
4. Анцупов А.В. (мл.). Развитие теории прогнозирования надежности деталей машин / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №2. С.26-32.
5. Оценка долговечности нагруженных деталей по кинетическому критерию прочности А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 70-й научно-технической конференции. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. Т.1. С. 137-141.
6. Научные и методологические основы прогнозирования надежности трибосопряжений на стадии их проектирования / А.В. Анцупов, М.В. Чукин, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. №4. С. 56-61.
7. Методология вероятностной оценки элементов машин по различным критериям / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, А.М. Овсов // Механическое оборудование металлургических заводов: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. Корчунова А.Г. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та, 2012. С. 28-34.
8. Методология аналитической оценки надежности технических объектов / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 70-й научно-технической конференции. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. Т.1. С. 141-144.
9. Анцупов А.В. Методология прогнозирования надежности элементов машин по различным критериям / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Надежность, 2013. – №3 (46).– С. 5-14.
10. Особенности проектной оценки долговечности деталей машин в условиях много- и малоциклового усталости / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, В.А. Русанов // Механическое оборудование металлургических заводов: Междунар. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Вып.3 - Магнито-

- горск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 40-47.
11. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Издательство «Фан» УзССР, 1985. 165с.
 12. Прогнозирование показателей надежности трибосопряжений / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.С. Губин и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. т.1. С.262-264.
 13. Модель процесса изнашивания трибосопряжений на основе термодинамического анализа их состояния / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), М.Г. Слободянский и др. // Актуаль-

ные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. Т.1. С.264-268.

14. Анцупов А.В. Обеспечение надежности узлов трения машин на стадии проектирования: Монография / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013.- 293с.
15. Анцупов А.В. (мл.), Слободянский М.Г. Прогнозирование долговечности опорных валков и оценка эффективности способов продления их ресурса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. №3. С. 74-79.



УДК 621.793

А.А. Герасимова, А.Г. Радюк
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
г. Москва, Россия
E-mail: allochka@rambler.ru
Дата поступления 27.02.2015

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ УЗКИХ СТЕНОК КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

Аннотация

Для повышения срока службы кристаллизаторов МНЛЗ в работе на их отработанных узких стенках из меди М1 и медного сплава МН2,5CoKpX создавали диффузионные слои напылением алюминия с последующей термической обработкой. В качестве основных показателей работоспособности диффузионного слоя использовали его толщину и микротвердость.

Рекомендовано нанесение на рабочие узкие стенки кристаллизатора алюминиевого газотермического покрытия с последующей термической обработкой в защитной среде по скорректированным режимам и испытание кристаллизатора на МНЛЗ с оценкой состояния стенок в процессе эксплуатации и изменения качества разливаемого металла.

Ключевые слова: узкая стенка, кристаллизатор МНЛЗ, газотермическое покрытие, термообработка, диффузионный слой.

Введение

Из литературных источников известно, что многие детали оборудования металлургического производства (кристаллизаторы, конвертерные и доменные фурмы и т.д.) изготавливают из меди и ее сплавов,

которые имеют высокие электро- и теплопроводность [1]. В то же время медь имеет низкие показатели жаростойкости и износостойкости [2]. Опыты показали, что оксиды меди не сопротивляются тепловым ударам и разрушаются после первой же

теплосмены, а также отслаиваются при испытании на трение.

Одним из способов повышения эксплуатационных свойств изделий из меди является термодиффузионное насыщение поверхности легирующими элементами [3]. Одним из основных элементов, используемым для насыщения, является алюминий. Алитирование можно проводить, например, методом насыщения в порошковой смеси, состоящей из 50% алюминиевой пудры, 49% Al_2O_3 и 1% NH_4Cl [4].

Испытание меди марки М1 с покрытием на окисление при $850^\circ C$ на воздухе показало, что термодиффузионное алитирование является перспективной защитой меди от окисления [5]. Алитированные образцы окисляются значительно медленнее, быстро наступает стабилизация процесса; по-видимому, их окисление происходит по логарифмической зависимости. Образцы алитированной меди после окисления имеют плотный и прочный оксидный слой, который не отслаивается в условиях теплосмен.

Что касается износостойкости, то у алитированных образцов из меди она увеличивается в 1,3 раза [6].

Однако метод диффузионного насыщения в порошковых смесях является сравнительно трудоемким и обладает низкой производительностью. В настоящее время для получения диффузионных слоев на деталях металлургического оборудования применяется метод газотермического напыления покрытий с последующей термообработкой [7]. Стандартное оборудование для напыления таких покрытий является сравнительно компактным и дешевым, ничем не лимитируются размеры покрываемых деталей и возможно напыление локальных и односторонних покрытий [8]. Технологический процесс напыления позволяет получать требуемую производительность нанесения покрытия и характеризуется относительно небольшой трудоемкостью [9].

В результате напыления газотермических покрытий на медь и ее сплавы и последующей термообработки образуется диффузионный слой [10] с жаростойко-

стью и износостойкостью, не уступающим свойствам, полученными с использованием метода диффузионного насыщения из порошков, необходимыми для повышения срока службы оборудования металлургического производства.

Основная часть

В настоящее время на ряде отечественных заводов в качестве материалов для изготовления стенок кристаллизаторов МНЛЗ используют медь марки М1, а также медно-никелевый сплав МН2,5КоКрХ. Поэтому для исследований использовали отработанные узкие стенки кристаллизаторов из этих материалов.

В работе диффузионные слои создавали на поверхности меди М1 и медного сплава МН2,5КоКрХ напылением алюминия толщиной около $1,5 \text{ мм}^1$ с последующим диффузионным отжигом при $t=800^\circ C$ в течение 10 ч в окислительной среде.

Было установлено, что на поверхности меди М1 наблюдается упрочняющий диффузионный слой толщиной до 1,5 мм, а сплава МН2,5КоКрХ – 0,6–1,4 мм, что объясняется сдерживанием диффузионного процесса содержащимися в нем легирующими элементами. В любом случае толщина диффузионного слоя не превышает толщину напыляемого покрытия.

Для выяснения причин уменьшения толщины диффузионного слоя на сплаве МН2,5КоКрХ были проведены металлографические и микрорентгеноспектральные исследования.² Покрытие наносили на стенку из сплава МН2,5КоКрХ, микротвердость диффузионного слоя измеряли на микротвердомере ПМТ–3 (таблица 1).

Микроструктура диффузионного слоя состоит из эвтектоида ($\alpha+\gamma_2$) и выделений α -фазы и γ_2 -фазы по границам зерен. В структуре слоя можно выделить несколько зон:

- в поверхностной зоне на фоне эвтектоида наблюдаются зерна серого цвета γ_2 -фазы;

¹ В работе принимал участие А.Е. Кузнецов

² В работе принимали участие Л.В. Полунина, Т.В. Жбанова и С.А. Ковалева

- средняя зона состоит из светлых зерен α -фазы и темных полей эвтектоида ($\alpha+\gamma_2$) разной степени дисперсности (рисунок 1);
- зона, примыкающая к линии раздела слой-металл, представляет собой светлые зерна α -фазы.

Поверхность слоя исследуемых образцов характеризуется наличием пор глубиной от 0,1 до 0,4 мм.

Фазовый состав диффузионного слоя, распределение Al и других химических элементов в зоне, прилегающей к линии раздела слой-металл, определяли микро-рентгеноспектральным методом на приборе "Сamebax". Результаты исследования приведены в таблице 2.

Таблица 1

Микротвердость диффузионного слоя

№ образца	Состав покрытия	Микротвердость, кг/мм ²			
		Поверхность диффузионного слоя	Середина диффузионного слоя	Граница слой-металл	Основной металл
1	Al	367	272	190	110

Таблица 2

Результаты микро-рентгеноспектрального анализа диффузионного слоя

№ образца	Состав покрытия	Содержание химических элементов, %									
		фаза ближе к поверхности диффузионного слоя			фаза в середине диффузионного слоя				фаза ближе к границе раздела слой-металл		
		Al	Ni	Cr	Al	Ni	Cr	Si	Al	Ni	Si
1	Al	18,1-22,3	1,5-1,6	0	14,0-14,8	3,5-4,1	0	0,1-0,3	11,5-11,8	4,0-4,2	0,8-1,7

Известно, что ресурс работы диффузионного слоя, создаваемого на медных деталях металлургического оборудования, определяется, прежде всего, его толщиной. Увеличение толщины напыляемого покрытия и повышение температуры и времени термообработки, как правило, приводят к увеличению толщины диффузионного слоя. Однако увеличение толщины напыляемого покрытия сопровождается снижением его адгезии, а повышение температуры термообработки – сильным окислением покрытия и непокрытых участков медной основы. В связи с этим для увеличения толщины диффузионного слоя диффузионный отжиг покрытий на меди проводили в защитной среде (95%N₂ 5%H₂ или H₂) при температурах 800–900 °С в течение десяти часов.

В работе исследовали образцы из меди М1 с алюминиевым покрытием.

Маркировка образцов: № 1 – без диффузионного отжига, остальные – после диффузионного отжига (таблица 3).



Рисунок 1. Микроструктура диффузионного слоя (образец № 1), x500

Основные результаты исследований образцов с покрытием³ представлены в таблице 3.

³ В работе принимала участие Е.С. Клименко

Влияние толщины алюминиевого покрытия, режима термообработки и защитной среды на толщину и микротвердость диффузионного слоя

№	$h_{\text{П}}$, мм	t , °С / τ , ч	Среда	$h_{\text{д.с.}}$, мм	Микротвердость, $H_{\text{ц}}$, МПа
1	1,1–1,5	–	–	–	310
2	1,0	800/10	95%N ₂ 5%H ₂	0,7 – 0,9	1650–3010
3	1,5	850/10	H ₂	3,8 – 4,0	1490–3880
4	1,0	900/10	95%N ₂ 5%H ₂	2,3 – 2,4	1180–2100
5	1,0	900/10	H ₂	2,6 – 3,0	1420–1510
6	1,5	900/10	H ₂	3,3 – 4,0	1350–2750
7	2,5	900/10	95%N ₂ 5%H ₂	4,0 – 4,6	1140–3330

При проведении анализа было установлено, что существуют режимы термообработки, обеспечивающие получение диффузионного слоя на поверхности медных образцов без язвин и размывов, толщиной более 4,0 мм и высокой твёрдости; увеличение толщины напыляемого покрытия и повышение температуры термообработки, как правило, приводят к увеличению толщины диффузионного слоя; изменение защитной среды с 95 %N₂+5 %H₂ на 100 %H₂ практически не изменяет толщину диффузионного слоя; максимальная толщина диффузионного слоя $h_{\text{д.с.}} = 4,0–4,6$ мм достигается при $t = 900$ °С и $h_{\text{П}} = 2,5$ мм; микротвердость диффузионного слоя в 2–6 раз превосходит микротвердость меди и составляет 1140–3880 МПа против 460–590 МПа на медной основе.

В дальнейшем на поверхность двух пар, выведенных из эксплуатации узких стенок кристаллизаторов, было нанесено алюминиевое газотермическое покрытие толщиной около 2,0 мм⁴. Одна пара прошла термообработку в защитной среде (95%N₂, 5%H₂) при температуре 800 °С в течение 10 ч, а другая в защитной среде (H₂) при температуре 900°С в течение 10ч⁵ (рисунок 2).

В результате исследований образцов из стенки первой пары толщина диффузионного слоя составила 0,9–1,2 мм, а его

микротвердость 1650–3250 МПа. Однако такой толщины недостаточно для механической обработки поверхности стенок со стороны покрытия и получения остаточных значений толщин, обеспечивающих значительное увеличение их срока службы.

Осмотр второй пары стенок показал, что их термообработка в защитной среде при температуре 900 °С и времени выдержки 10 ч приводит к их короблению в результате данного процесса, которое не устраняется механическим способом⁶.



Рисунок 2. Стенки кристаллизатора после термообработки в защитной среде (H₂) при температуре 900 °С в течение 10 ч

⁴ В работе принимал участие Н.И. Крикунов

⁵ В работе принимал участие А.А. Петухов

⁶ В работе принимал участие Н.В. Андросов

Заключение

Результаты исследований, повышения стойкости узких стенок кристаллизаторов МНЛЗ позволяют заключить следующие:

- существуют режимы термообработки, обеспечивающие получение диффузионного слоя на поверхности медных образцов без язвин и разрывов, толщиной более 4,0 мм и высокой твердости;
- увеличение толщины напыляемого покрытия и повышение температуры термообработки, как правило, приводят к увеличению толщины диффузионного слоя;
- изменение защитной среды с 95%N₂+5%H₂ на 100%H₂ практически не изменяет толщину диффузионного слоя;
- максимальная толщина диффузионного слоя $h_{д.с.} = 4,0-4,6$ мм достигается при $t = 900$ °С и $h_{п} = 2,5$ мм;
- микротвердость диффузионного слоя в 2–6 раз превосходит микротвердость меди и составляет 1140–3880 МПа против 460–590 МПа на медной основе.

Целесообразно нанесение на рабочие узкие стенки кристаллизатора алюминиевого газотермического покрытия с последующей термической обработкой в защитной среде по скорректированным режимам и испытание кристаллизатора на МНЛЗ с оценкой состояния стенок в процессе эксплуатации и изменения качества разливаемого металла.

Библиографический список

1. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
2. Радюк А.Г. Формирование диффузионных слоев на поверхности меди и ее сплавов / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, А.Е. Украинцев // Цветные металлы. – 2007. – №5. – С. 95–97.
3. Зайт В. Диффузия в металлах / В.Зайт. – М.: Металлургия, 1966. – 654 с.
4. Минкевич А.Н. Химико–термическая обработка металлов и сплавов / А.Н.

Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.

5. Вавиловская Н.Г. Окалиностойкость и сопротивление истиранию меди, диффузионно-насыщенной алюминием, никелем, цирконием / Н.Г. Вавиловская, Л.Г. Тимонина // Защитные покрытия на металлах. – 1971. – вып. 5. – С. 177–179.
6. Дубинин Г.Н. Жаростойкость и коррозионная стойкость меди и бронзы после алитохромирования / Г.Н. Дубинин, В.С. Соколов // Защитные покрытия на металлах. – 1979. – вып. 13. – С. 79–82.
7. Радюк А.Г. Совершенствование работы деталей металлургического оборудования из меди напылением газопламенных покрытий / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов // Сталь. – 2011. – №3. – С. 7–9.
8. Какуевицкий В.А. Применение газотермических покрытий при изготовлении и ремонте машин. – Киев: Техника, 1989. – 174 с.
9. Поляк М.С. Технология упрочнения: в 2-х т. / М.С. Поляк. – М.: Машиностроение, 1995. – 832 С. ISBN 5-217-02810-6, Т.1.
10. Радюк А.Г. Свойства поверхностного слоя на меди, образующегося после нанесения и термообработки алюминиевого газотермического покрытия / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, Э.М. Самедов // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 2007. – №3. – С. 70–74.



УДК 531.43/46

Р.Н. Савельева, К.В. Чернов
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: sav-r46@yandex.ru
Дата поступления 15.03.2015

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КЛАПАНОВ НАСОСА СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ ПО КРИТЕРИЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация

Представлена общая схема процесса формирования износных отказов нагнетательного и всасывающего клапанов насоса сжиженных газов, которая является составной частью методики прогнозирования долговечности клапанов насоса. Данная методика позволит проанализировать эффективность различных способов повышения срока службы клапанов, выявить и предложить к внедрению наиболее целесообразные из них.

Ключевые слова: насос, надежность, клапан, прогнозирование, износ, долговечность, ресурс, вероятность.

В настоящее время одной из важнейших проблем производства продуктов разделения воздуха является вопрос повышения надежности вспомогательного оборудования воздуходелительных установок. Ужесточение требований качества к продуктам разделения воздуха – кислорода, азота, аргона вызывает необходимость использования насосов сжиженных газов, обеспечивающих точное позиционирование и скорость перемещения сжиженных газов. В качестве устройств различных криогенных газифицированных либо криогенных воздуходелительных установок при перекачивании сжиженных газов и газожидкостных смесей, используемых в технологических процессах нефтехимической промышленности, холодильной технике и при транспортировании природного газа, кислорода, азота, аргона, применяют насосы сжиженных газов (НСГ).

Поскольку почти 80% всех отказов насосов сжиженных газов составляют постепенные отказы, связанные с износом корпуса, нагнетательного и всасывающего клапанов, актуальной народнохозяйственной проблемой является прогнозирование моментов отказов НСГ по критериям износостойкости элементов нагнетательного и всасывающего клапанов, а также разработ-

ка способов снижения интенсивности их изнашивания и, следовательно, повышения надежности системы в целом [1].

Для повышения надежности и долговечности нагнетательного и всасывающего клапанов насоса сжиженных газов необходимо математическое описание физических закономерностей процесса повреждения и разрушения поверхностных слоев трибоэлементов для создания физико-вероятностной модели процесса формирования их износных отказов и методики прогнозирования срока службы нагнетательного и всасывающего клапанов.

Для создания методики прогнозирования долговечности клапанов цилиндрической группы насоса по критериям износостойкости рабочих элементов может быть использован общий методологический подход прогнозирования надежности трибосопряжений, базирующийся на выводе кинетического уравнения изнашивания трибоэлементов. Для вывода кинетического уравнения повреждаемости рабочих элементов необходима разработка модели их изнашивания в предполагаемых условиях эксплуатации, которую можно построить на основе зависимостей, предполагаемых современной теорией трибологии.

Построенная на основе физико-вероятностной модели методика прогнозирования срока службы нагнетательного и всасывающего клапанов, в свою очередь, позволит проанализировать эффективность различных способов его повышения (выбором материалов, применением покрытий, тех или иных смазочных материалов, изменением конструкции и т.д.), выявить и предложить к внедрению наиболее целесообразные из них.

Прогнозирование долговечности клапанов насоса сжиженных газов предполагает последовательное решение следующих задач:

- формирование общей схемы параметрических отказов клапанов;
- построение модели процесса изнашивания рабочих элементов и вывод кинетического уравнения повреждаемости клапанов;
- создание физико-вероятностной модели параметрической надежности нагнетающего и всасывающего клапанов;
- разработка методики прогнозирования срока службы клапанов НСГ по критерию износостойкости рабочих элементов.

В данной статье рассматривается первая задача - общая схема процесса формирования износных отказов клапанов и ее графическая интерпретация.

Общая схема параметрической надежности клапанов насоса сжиженных газов по критерию износостойкости рабочих элементов может быть сформулирована на основе методологического подхода, изложенного в [2-5]. При этом будем полагать, что пара трения «клапан - корпус» относится к «стационарному» сопряжению. Это означает, что большую часть времени (до момента появления в них зазора) она работает в стационарном режиме усталостного изнашивания при нормальной работе, когда исключаются грубые формы изнашивания (микрорезание, схватывание и др.).

Используя основные рекомендации общего методологического подхода [2], сформулируем поэтапно базовые уравнения (1.1) - (1.6) общей схемы формирова-

ния отказов клапанов НСГ по критерию износостойкости рабочих элементов.

На первом этапе в качестве параметра X_t состояния клапанов принимаем внутренний диаметр как при сборке корпуса клапана, увеличивающийся при его изнашивании во время работы. Износом клапана, как показывает практика, в данном случае можно пренебречь.

На втором этапе формулируем уравнение состояний «стационарного» сопряжения «клапан - корпус» в виде зависимости параметра X_t сопряжения от случайной величины линейного (диаметрального) износа Y_t рабочих элементов или постоянной во времени случайной величины скорости $\dot{Y} = dY_t/dt = const$ их линейного изнашивания в виде:

$$X_t = X_0 + Y_t = X_0 + \dot{Y} \cdot t, \quad (1)$$

где X_0 - распределение случайной величины параметра X_t в момент времени $T = t_0$, характеризующее исходное состояние сопряжения.

Распределение величин X_0 и \dot{Y} в любой момент времени $T = t$, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, близки к нормальному распределению, обеспечивая нормальное распределение случайной величины X_t [6].

Уравнение (1) моделирует поведение (смену состояний) клапанов НСГ, как процесс его деградации в течение всего периода работы.

На третьем этапе математически формулируем условие работоспособности клапанов по выбранному параметру:

$$X_t = X_0 + \dot{Y} \cdot t < x_{np}. \quad (2)$$

Последнее неравенство отражает закономерность изменения параметра состояния X_t во времени до момента достижения им предельного значения x_{np} , т.е. область всех возможных работоспособных состояний клапанов НСГ.

Предельное значение x_{np} параметра X_t при проектировании клапанов НСГ принимаем равным минимальному диаметру клапана для обеспечения постоянной герметичности сопряжения и предупреждения абразивного износа.

На четвертом этапе, решая прямую задачу теории надежности, выводим уравнение для оценки основного показателя безотказности клапанов НСГ - вероятности его безотказной работы $P(t)$ в любой фик-

сированный момент времени $T = t$, как вероятности выполнения условия работоспособности (2) в виде закона надежности [7]:

$$P(t) = P(X_t < x_{np.}) = \Phi(u_{np(t)}) = \Phi\left[\frac{(x_{np.} - (\bar{x}_0 + \bar{y} \cdot t))}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_y^2 \cdot t^2}}\right], \quad (3)$$

где $u_{np(t)}$ - значение квантили нормального нормированного распределения параметра состояния X_t в произвольный момент времени $T = t$;

Φ — функция Лапласа.

Числовые характеристики случайного параметра $X_t = X_0$ состояния на начальный момент времени $T = t_0$ (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение), оцениваем по рабочим чертежам трибосопряжения:

$$\bar{x}_0 = \frac{x_{0max} + x_{0min}}{2} \quad \text{и} \quad (3a)$$

$$\sigma_{x0} = \frac{x_{0max} - x_{0min}}{6}$$

где $x_{0max} = \bar{x}_0 + 3 \cdot \sigma_{x0}$ и $x_{0min} = \bar{x}_0 - 3 \cdot \sigma_{x0}$ - максимальное и минимальное значения проектного размера X_0 элементов (или их сочетания) трибосопряжения определяют границы полей допусков, установленных конструктором.

На пятом этапе формулируем уравнение перехода клапанов в предельное состояние (состояние параметрического отката) в виде:

$$u_{np(t)} = x_{np} - \frac{x_0 + \bar{y} \cdot t}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_y^2 \cdot t^2}} \quad \text{или} \quad X_t = X_0 + \dot{Y} \cdot t = x_{np}, \quad (4)$$

Это уравнение отражает область всех его возможных предельных состояний.

На шестом этапе, решая обратную задачу теории надежности, выводим уравнения для оценки показателей долговечности (ресурсных характеристик) клапанов НСГ в виде зависимости для определения гамма-процентного ресурса t_γ , как решение уравнения (4) относительно t при заданном допустимом значении вероятности безотказной работы $[P(t)] = \gamma$ и соответствующем ему табличном значении квантили $[u_{np(\gamma)}]$:

$$t_\gamma = \frac{\bar{y}_{np} \cdot \bar{y} - \sqrt{(\bar{y}_{np} \cdot \bar{y})^2 - (\bar{y}^2 - [u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_y^2) \cdot (\bar{y}_{np} - [u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_{x0}^2)}}{\bar{y}^2 - [u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_y^2} \quad (5)$$

где $\bar{y}_{np} = x_{np} - x_0$ - математическое ожидание предельной величины линейного (радиального) износа клапана и корпуса.

Подставляя в (5) значение $[u_{np(\gamma)}] = 0$ для $[P(t)] = \gamma = 0,5$ получим уравнение для оценки среднего ресурса:

$$\bar{t} = \bar{y}_{np} / \bar{y}. \quad (5a)$$

Подставляя в (5) значение $[u_{np(\gamma)}] = 3,0$ для $[P(t)] = \gamma = 0,9986$ получим уравнение для оценки гарантированного ресурса:

$$t = \bar{y}_{np} / \dot{y}_{max}, \quad (5.6)$$

где $\dot{y}_{max} = \bar{y} + 3 \cdot \sigma_y$ - максимально возможная скорость изнашивания рабочих элементов.

На седьмом этапе разрабатываем математическую модель процесса изнашивания рабочих элементов.

С этой целью используем зависимость для определения линейного износа элементов «стационарных» трибосопряжений [8, 9], которая в данном случае может быть представлена в виде кинетического

уравнения повреждаемости рабочих эле-

$$\dot{y} = 2 \cdot \frac{\dot{U}_\varepsilon}{\Delta u_\varepsilon} = 2 \cdot \delta_{\varepsilon 2} \cdot \frac{N_{\text{ТР}}^{\text{уд}}}{\Delta u_\varepsilon} = 2 \cdot \nu_2 \cdot f_{\text{мех}} \cdot p_{\text{max}} \cdot \frac{V_{\text{ск}}}{\Delta u_\varepsilon \cdot c'} \quad (7)$$

необходимого для оценки числовых характеристик \bar{y} и σ_y , скорости \dot{Y} их линейного изнашивания, как случайной величины. Здесь числом «2» учитывается диаметральный износ рабочих элементов.

В этом уравнении:

$\delta_{\varepsilon 2} = \nu_2 \cdot (f_{\text{мех}}/f)$ доля и ν_2 - коэффициент преобразования удельной мощности внешней энергии $N_{\text{ТР}}^{\text{уд}} = f_{\text{мех}} \cdot p_{\text{max}} \cdot V_{\text{ск}}$ в скорость \dot{U}_ε изменения внутренней энергии дефектов структуры материалов наиболее нагруженных объемов поверхностных слоев рабочих элементов;

$f_{\text{мех}}$ - механическая составляющая коэффициента трения f ;

ментов:

p_{max} - максимальное значение контактного давления в паре трения «корпус - клапан»;

Δu_ε - критическая энергоемкость материала рабочих элементов.

Вывод зависимостей для оценки числовых характеристик \bar{y} и σ_y скорости линейного изнашивания \dot{Y} элементов для расчетной схемы и граничных условий взаимодействия элементов клапанов НСГ, представлен при построении модели их изнашивания [10, 11].

Графическое толкование уравнений (1) - (6), дающее наглядное представление о схеме формирования износных отказов клапанов НСГ, представлено на рисунке 1.

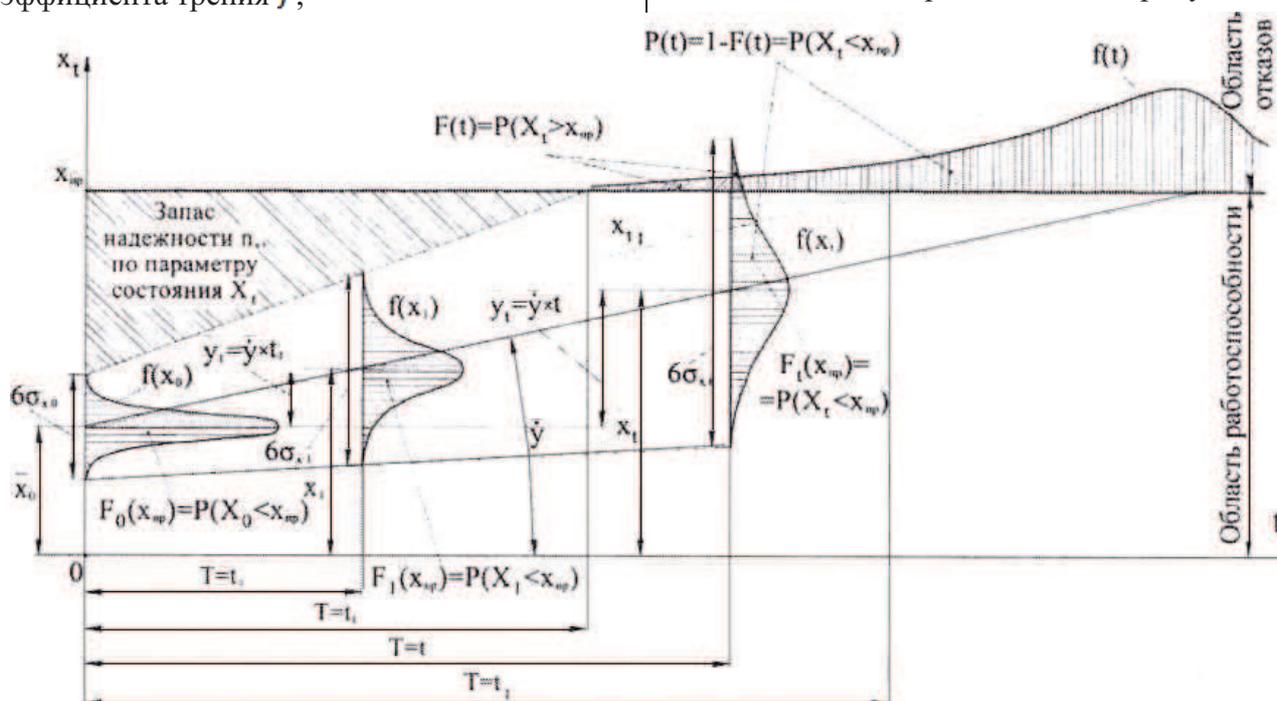


Рисунок 1. Изменение состояния и показателей надежности нагнетающего и всасывающего клапана во времени

Графическая интерпретация зависимостей (1)-(6), представленная на рисунке 1, отражает область всех возможных значений параметра X_t состояния нагнетающего и всасывающего клапанов, т.е. область всех его возможных работоспособных и предельных состояний. В этих выражениях случайный параметр X_t состояния «стационарного» сопряжения «клапан - корпус», распределенный на лю-

бой момент времени $T = t$ по нормальному закону (рисунок1), возрастает во времени в соответствии с линейной моделью (1) изнашивания рабочих элементов.

Графически решение прямой задачи теории надежности - определение вероятности $P(t)$ безотказной работы по уравнению (3), как вероятности выполнения условия работоспособности (2), для моментов времени $T = t_0$, $T = t_1$, и $T = t$:

$$P(t_0) = F_0(x_{np}) = P(X_0 < x_{np}) > P(t_1) = F_1(x_{np}) = P(X_1 < x_{np});$$

$$P(t) = F_t(x_{np}) = P(X_t < x_{np}),$$

демонстрируют площади $F_0(x_{np})$, $F_1(x_{np})$ и $F_t(x_{np})$ под соответствующими кривыми плотности распределения $f(x_0)$, $f(x_1)$ и $f(x_t)$.

Они расположены ниже линии - границы $x_t = x_{np}$ в области работоспособности (рисунок 1) и уменьшаются по величине при переходе от $T = t_0$ к $T = t_1$ и далее к $T = t$.

$$F(t) = P(T < t) = P(X_t > x_{np}) = 1 - F_t(x_{np}). \quad (7)$$

Условие (7) на рисунке 1. отражается следующим образом.

Значение $P(X_t > x_{np}) = 1 - F_t(x_{np})$, определенное для произвольного момента времени $T = t$, демонстрирует площадь под кривой распределения $f(x_1)$, лежащая выше линии - границы $x_t = x_{np}$ (в области отказов). Значение $F(t) \sim P(T < t)$ на рисунке 1. демонстрирует равная ей по величине площадь под кривой $f(t)$, лежащая левее вертикальной линии - границы $T = t$.

Значение вероятности $P(t) = 1 - F(t) = P(T > t)$ для любого фиксированного момента времени t , как вероятность того, что возможное значение случайной величины T превысит это зна-

Вероятность отказа сопряжения $P(t) = P(T < t)$ в любой фиксированный момент времени t , как вероятность того, что возможное значение случайной величины T не превысит фиксированное значение t , равна вероятности выхода возможного значения случайного параметра X_t за его предельное значение x_{np} .

Для исследуемого сопряжения математически это условие можно представить в виде:

чение t , определяет вероятность безотказной работы клапанов. Геометрически это значение на рисунке 1 демонстрирует площадь под кривой $f(t)$, лежащей правее вертикальной линии - границы $T = t$.

Графически решение обратной задачи теории надежности - определение ресурсных характеристик «стационарных» трибосопряжений по уравнениям (5), на рисунке 1 отражается следующим образом.

Значение гамма-процентной наработки (ресурса) $T = t_\gamma$ графически определяется абсциссой точки пересечения линии предельного значения $x_t = x_{np}$ с линией верхней доверительной гамма-процентной границы:

$$x_{t\gamma} = \bar{x}_t + [u_{np(\gamma)}] \cdot \sigma_{xt} = \bar{x}_t + [u_{np(\gamma)}] \cdot \sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_y^2 \cdot t^2}. \quad (8)$$

Здесь $[u_{np(\gamma)}]$ - табличное значение квантили нормированного нормального распределения, соответствующее заранее заданному предельно-допустимому значению вероятности безотказной работы сопряжения $[P(t)] = \gamma$.

Средний ресурс $T = \bar{t}$ определяется абсциссой точки пересечения графиков зависимостей: $\bar{x}_t = \bar{x}_0 + \dot{y} \cdot t$ и $x_t = x_{np}$ (рисунок 1).

Гарантированный ресурс $T = t_c$ определяется абсциссой точки пересечения графиков зависимостей:

$$x_{tmax} = x_{0max} + \dot{y} \cdot t \quad \text{и} \quad x_t = x_{np} \quad (\text{рисунок 1}).$$

Таким образом, проведенный анализ базовых уравнений (1) - (6) и их графическая интерпретация на рисунке 1 показывают, что еще на стадии проектирования клапанов можно исследовать процесс формирования их износных отказов, проследить за изменением показателей их безотказности и ресурсных характеристик в предполагаемых условиях эксплуатации.

Однако для решения этих задач необходимо вывести кинетическое уравнение повреждаемости (6) для оценки чис-

ловых характеристик \bar{y} и σ_y скорости изнашивания \dot{Y} рабочих элементов, как случайной величины. С этой целью разрабатывается математическая модель процесса их изнашивания [10,11].

Библиографический список

1. Савельева Р.Н., Чернов К.В. Совершенствование конструкции насосов сжиженных газов кислородного цеха ОАО «ММК» // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г. И. Носова, 2012. С. 52-55.
2. Прогнозирование безотказности трибосопряжений по критерию износостойкости на стадии их проектирования / А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.) и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. №11. С. 38-45.
3. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов / В.П. Анцупов, Л.Т. Дворников, Д.Г. Громаковский, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, 2014. №1. С. 141-146.
4. Оценка долговечности нагруженных деталей по кинетическому критерию прочности / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, Р.Н. Савельева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 70-й научно-технической конференции. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. Т.1. С. 137-141.
5. Научные и методологические основы прогнозирования надежности трибосопряжений на стадии проектирования / А.В. Анцупов, М.В. Чукин, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университе-

та им. Г.И. Носова, 2011. №4. С. 56-61.

6. Методология вероятностной оценки надежности элементов машин по различным критериям / А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), М.Г. Слободянский, А.М. Овсов // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г. И. Носова, 2012. С. 28-34.
7. Анцупов А.В., Анцупов А.В.(мл.), Анцупов В.П. Методология прогнозирования надежности элементов машин по различным критериям // Надежность. 2013. №3. С. 5-14.
8. Методология вероятностного прогнозирования и ресурса трибосопряжений / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.А. Русанов и др. // Известия Самарского научного центра «Надежность» Российской академии наук. 2011. Т.13. №4(3). С. 947-950.
9. Оценка долговечности и повышение срока службы золотниковых распределителей / А.В. Анцупов, В.А. Русанов, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), Р.Н. Савельева // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г. И. Носова, 2012. С. 44-52.
10. Артемов И.И., Синицкий В.Я., Сорокин С.А. Моделирование изнашивания и прогнозирования ресурса трибосистем: монография. Пенза: Инф.-изд. центр ПТУ, 2004. 374с.
11. Моделирование процесса изнашивания трибосопряжений / А.В. Анцупов, М.Г. Слободянский, А.С. Губин и др. // Современные технологии в машиностроении: сб. статей XIV международной научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2010. С. 290-294.



УДК 620.018.45

В.В. Драгобецкий, А.А. Шаповал, Д.В. Мосьпан
Кременчугский национальный университет
имени Михаила Остроградского
г. Кременчуг, Украина
E-mail: tungsten@yandex.ru
Дата поступления 02.03.2015

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕНТ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация

Дан анализ технологических процессов вибрационного волочения и плющения вольфрамовой проволоки при производстве вольфрамовых лент и катодов электронно-лучевых установок. Выбор технологических схем и процессов выполнен с использованием морфологического анализа и оптимального управления. Задача проектирования структуры материала катодов решена в рамках феноменологической теории. Оптимизация проведена по деформациям, соответствующим максимальному пределу выносливости материала катодов. Исследовано влияние схемы вибрационного волочения на механические свойства и структуру проволоки из вольфрама. При принятой схеме волочения вольфрамовая проволока характеризуется меньшим пределом прочности и более высокой характеристикой пластичности.

Ключевые слова: катод, лента, вольфрам, волочение, плющение, структура.

Введение

Ленты из тугоплавких металлов широко используют в электротехнической и электронной промышленности для изготовления катодов электронных пушек печей электронно-лучевой плавки. Действующие технологии производства лент, как правило, включают комплекс операций получения спеченных штабиков, круглой заготовки и ее плющение прокаткой на стане или волочением через роликовые волокна [1]. Однако большинство освоенных технологий не обеспечивают необходимой производительности, формирование оптимальной структуры и механических свойств вольфрама.

Одним из главных препятствий для расширения сферы применения, как вольфрама, так и его сплавов, является малая пластичность этих материалов при пониженных температурах, что приводит к снижению сопротивления ударным нагрузкам и затрудняет обработку давлением. Низкотемпературная хрупкость, недостаточный уровень жаропрочности характерны не только для вольфрама, но и для ряда других металлов с объемной центрированной кубической решеткой и их

сплавов и накладывают на процесс пластической деформации этих материалов существенные ограничения и особенности. Высокая температура рекристаллизации, наличие в металлах технической чистоты температурных зон хрупкости и повышенная реакционная способность ограничивают возможность процессов обработки давлением тугоплавких металлов. Поэтому определение режимов процессов обработки давлением с учетом исходных свойств заготовок и особенностями конкретного процесса обработки металлов давлением (ОМД) и требованиями к эксплуатационным свойствам готовых изделий.

Комплекс технологий обработки давлением при изготовлении вольфрамовых катодов направлен на повышение их эксплуатационных свойств, т.е. нацелен на проектирование и создание структуры материала, в которой формируются и создаются области замыкания или непроходимости трещин. Для обоснованного выбора составляющих технологий пластического деформирования возникает необходимость сведения задач механики пластического деформирования к задачам математическим. Основными методами подхода к ис-

следованию поведения пластически деформируемых сред являются статистический метод и феноменологическая теория. В статистическом методе применяется вероятностный подход к изучаемым явлениям и вводятся средние по большому ансамблю частиц характеристики. Феноменологическая теория основана на общих, добытых из опыта закономерностях и гипотезах.

Сложность процесса упругопластического деформирования и разрушения твердых тел, недостаточно удовлетворительное теоретическое объяснение структурных изменений материала, возникающее при этом, вызывают необходимость уточнения, прогнозирования результатов и выдвижения новых концепций, реально описывающих реальные процессы структурообразования. Поэтому в настоящее время интенсивно разрабатываются и исследуются иерархические и синергетические механизмы пластического деформирования и разрушения. Несмотря на огромные достижения статистических методов, некоторые объекты конденсированного тела, характеризующиеся индивидуальным поведением, не могут быть описаны набором параметров, определяющих законы взаимодействия этих объектов. Альтернативу статистическому подходу составляет общая теория систем [2]. В основу этого подхода положено математическое определение системы как отношения, заданного на входном и выходном объектах системы, в качестве которых обычно выступают некоторые заданные множества. Теория систем не требует введение статистических ансамблей для объединения многовариантности поведения систем.

Однако ряд задач пластического деформирования, направленных на создание определенной структуры материала можно решить в рамках феноменологической теории с применением методом оптимизации. В данном случае возникает необходимость использования количественно-оптимизационных моделей, позволяющих дать количественные рекомендации по выбору параметров $F_i^{(p)}$ в связи с решением задачи оптимизации структуры материала для последующей операции пластического

деформирования и в конечном итоге для получения термостойкой структуры материала катодов.

В некоторой степени теория систем перекликается с оптимизационными технико-экономическими задачами, которые сводятся к определению экстремальных значений некоторых параметров отклика и величин соответствующих им определяющих параметров.

В настоящее время разработан значительный арсенал принятия технических и технологических решений: использование иерархического функционального классификатора (ИФК) [1], метод анализа функциональных связей, метод Парето, метод морфологического анализа, построение сценария, построение дерева целей, метод QUEST [1].

Например, с помощью ИФК увязывают в единую систему основные проблемы прогнозируемой технологии производства вольфрамовых лент и катодов. Для достижения окончательной цели (y_p) – получение вольфрамовых катодов с максимальным сроком эксплуатации, необходимо установить промежуточные цели (y_i). Порядок достижения y_n , определяется длиной пути $y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow \dots \rightarrow y_i \rightarrow \dots \rightarrow y_p$. С целью описания технологических процессов, характеризующихся качественными целями, необходимо подробное описание, как исходного решения y_i , так и промежуточных целей y_i . В этом случае в классификаторе необходимо помимо соблюдения иерархии уровней в достижении главной цели, предусмотреть иерархию подуровней, обеспечивающих решение промежуточных задач:

$$y_1(y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1j}) \rightarrow y_2(y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2k}) \rightarrow \dots \\ \dots \rightarrow y_m(y_{m1}, y_{m2}, \dots, y_{mn}) \rightarrow \dots \rightarrow y_p$$

где y_{ij} – j -й подуровень i -го этапа.

Для формирования тактов причинно-следственных связей необходимо классификатор ИФК дополнить методом анализа функциональных связей.

Цель исследования. Формирование возможных вариантов технологий производства вольфрамовых катодов с исполь-

зованием эвристических методов прогнозирования с выбором критериев оценки пластичности заготовок на операциях, предшествующих плющению и максимальной термочности при плющении.

Основная часть

Для описания комплекса технологических процессов, который качественными показателями, более нагляден морфологический классификатор [1]. На первом этапе выделяем наиболее важные аспекты проблемы, которые выступают в качестве оснований деления P_i . Затем для каждого i -го аспекта выявляются возможные варианты решения V_j^i . Вся совокупность аспектов проблемы и способов ее решения может быть представлена в виде системы

матриц, называемых «морфологическим ящиком» (рисунок 1).

Можно выделить 6 основных аспектов P_i , характеризующих развитие технологии изготовления вольфрамовых катодов. Если в рамках этого аспекта имеются подаспекты, используем дополнительный индекс. Для каждого из этих аспектов можно найти варианты решений V_j^i . Так, компактные заготовки из вольфрама для последующей обработки давлением P_1 производят методом: V_1^1 – вакуумная плавка; V_2^1 – порошковая металлургия. Методы плавки P_1^1 , в свою очередь, могут быть: V_1^{11} – индукционная, V_2^{11} – электродуговая, V_3^{11} – электронно-лучевая, V_4^{11} – плазменная.

Аспекты проблемы производства лент из тугоплавких металлов	P_i	Варианты решения y_i^j
Получение заготовок	P_1	
Метод плавки	P_1^1	
Методы порошковой металлургии	P_1^2	
Заготовка для последующей обработки	P_2	
Волочение	P_3	
Плющение	P_4	

Рисунок 1. Система матриц «морфологического ящика» при производстве лент из тугоплавких металлов

Методы порошковой металлургии P_1^2 ; V_1^{12} – гидростатическое прессование в вакууме; V_2^{12} – прессование в среде водорода; V_3^{12} – гидростатическое прессование в вакууме с модифицирующим воздействием на спекаемый порошок; V_4^{12} – горячим износостойким прессованием в вакууме; V_5^{12} – горячим изостатическим прессованием в среде водорода с модифицирующим воздействием на спекаемый порошок; V_6^{12} – горячим изостатическим прессованием в вакууме с модифицирующим воздействием на спекаемый порошок.

Исходная заготовка для последующей обработки давлением P_2 поставляется в виде: V_1^2 – штабик, прокованный на прутки; V_2^2 – винтокатанный пруток.

Винтокатанные прутки подвергаются термоциклическому отжигу и деформированию методом бесконтейнерного циклического прессования. Учитывая, что эти процессы достаточно апробированы и оптимальные параметры и режимы обработки определены, возможные варианты этих процессов рассматривать не будем. В результате этих операций, благодаря всестороннему сжатию в очаге деформации пластичность заготовки возрастает, достигая уровня, достаточного для обработки вольфрама волочением.

Варианты технологии волочения V_3^2 – волочение с применением вращательных, угловых и поперечных колебаний волоки; V_3^3 – волочение с вибрацией проволоки; V_3^4 – волочение с применением продольных колебаний; V_3^5 – ступенчатое вибрационное волочение; V_3^6 – волочение через роликовые волоки.

Плющение ленты из круглой заготовки производится на плющильных станах. Возможные варианты последних включают P_4 : V_4^1 – нереверсивные двухвалковые станы; V_4^2 – трехвалковые станы со средним валком меньшего диаметра; V_4^3 – трехвалковые станы со всеми приводными валками одинакового диаметра;

V_4^4 – реверсивные двухвалковые станы; V_4^5 – четырехвалковые реверсивные станы.

Необходимости расчленения прокатки на две операции путем последовательной установки двух или большего количества станов, как показал производственный опыт – нет.

Количественный анализ представленной модели показывает наличие $2 \times 4 \times 6 \times 2 \times 7 \times 4$ различных вариантов технологий производства вольфрамовых лент для катодов. Все из них практически осуществимы.

Для установления функциональных связей, влияющих на длительность эксплуатации вольфрамовых катодов, необходимо отразить способность последних выдерживать тепловые стационарные потоки. Создание термочувствительных катодов для высокотемпературных печных нагревателей может быть осуществлено на основе компромисса и оптимизации значений критериев максимальных напряжений, энергетических критериев с учетом микропластичности. Оптимизировать в целом работоспособность вольфрамовых катодов необходимо по комбинации физико-механических свойств (прочности и модуля упругости) с учетом предпочтительности материалов с малым коэффициентом термического расширения и высокой теплопроводностью.

Получение полуфабрикатов штабиков с использованием операций ротационнойковки удовлетворяют требованиям технических условий регламентированных по химическому составу, геометрическим размерам и состоянию поверхности. Однако, значительная часть штабиков разрушается на операцияхковки и при волочении. Поэтому, это привело к необходимости изучения характеристик не входящих в ТУ и поиска альтернативной технологии, исключающих образование трещин, возникающих при ротационнойковке [3]. Структура характеризуется пористостью, формой фазовых составляющих и размеров пор, фазового состава, величины зерна и др. Было предложено оценивать однородность микроструктуры по наличию микротрещин. Пористость снижает прочность и теплопроводность. Может, как

способствовать зарождению и распространению трещин, так и задерживать их распространение. Форма, размеренность распределения пор вызывает чрезвычайно многообразный характер влияния пористости на термopрочность.

Предложенный процесс винтовой прокатки, хотя и неоднозначно, влияет на качество изделий из полуфабрикатов, но исключает брак по обрыву и расслоению проволоки. Винтовая прокатка, как и пористость, возникающая при спекании вольфрамовых штабиков, неоднозначно влияет на термopрочность изделий. Винтовая прокатка с одной стороны приводит к образованию плен и трещин на поверхности проката, но с другой стороны образование структуры в виде волокон, закрученных по винтовой линии относительно оси проката, препятствует расслоению металла на дальнейших операциях обработки давлением.

Возможно, термopрочность непосредственно зависит от трещиностойкости (ударной вязкости). Формально критерий максимальных термических R_2 (Вт/м^2) напряжений и энергетический критерий оценки термopрочности зависит от K_c – коэффициента интенсивности напряжений, т.е.

$$R_1 = \frac{K_c(1-\mu)}{\alpha_m E(\pi L)^{0,5}}; \quad (1)$$

$$R_3 = \frac{E\pi L}{K_c^2(1-\mu)}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона; L – критическая длина трещины; E модуль упругости;

$$K_c = Y\sigma(L)^{0,5},$$

где Y – геометрический коэффициент.

Из соотношений (1), (2) следует, что, как и для прочности и зависимость термopрочности от трещиностойкости неоднозначна. Кроме того, в работе [4] показано, что значительное увеличение K_c в 2-3 раза практически не сказывается на термopрочности.

Помимо, описанных характеристик материала, которые не позволяют прогнозировать эксплуатационную долговечность вольфрамовых катодов можно обратить

внимание на показатели циклической стойкости. Установлено, что технологическая последовательность, связанная с процессами пластического деформирования существенно влияет на предел выносливости обработанной детали [5]. Причем приращение предела выносливости будет наибольшим при оптимальной ε_p интенсивности деформаций.

В настоящее время установлено то, что макроскопическим проявлением в процессе деформирования является локализация деформаций, которая завершает стадию однородного пластического течения [2]. С ростом интенсивности деформаций происходит как увеличение степени физического упрочнения материала, так и усугубление процесса разупрочнения. Помимо этого наиболее интенсивный рост количества и размеров микродефектов наблюдается за пределами равномерной деформации. Таким образом, оптимальной интенсивностью деформаций должна быть равномерная деформация – $\varepsilon_p = \varepsilon_{iopt}$. Приближенные, но достаточно точные значения ε_p определяются из простых зависимостей, приведенных в работе [5]. В качестве пластической твердости вольфрама следует брать ее значения, соответствующие температуре пластического деформирования.

Определив значение ε_p для вольфрама по зависимости $НД = f(HV)$ и $\varepsilon_p = f(НД)$, где $НД$ – пластическая твердость; HV – твердость по Викерсу, определяем значения оптимальных параметров плющения вольфрамовой проволоки, которые обеспечивают максимальные значения предела выносливости, термopрочности и оптимальную монокристалличность.

На операциях, предшествующих плющению, необходимо добиться максимальной пластичности материала заготовки. Выбор в качестве меры пластичности, накопленной до момента разрушения пластическую деформацию или равномерную деформацию не является оптимальным [6]. Физически более обоснованным есть выбор в качестве меры пластичности, работы пластической деформации [6]. Практиче-

ски для характеристики напряженного состояния и оценки его влияния и на энергетические затраты целесообразно использовать инвариантные характеристики. Последние, позволяют исследовать траектории нагружения в пространстве инвариантов. Наиболее эффективно количественную оценку пластичности металлов производить по критерию В.А.Огородникова [6]:

$$\chi = (\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3)^{0,5} \cdot \sigma_u^{-1} \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_u – интенсивность напряжений.

Показатель χ удобно использовать для оценки объемности напряженного состояния, которое обеспечивает максимальную пластичность материала деформируемой заготовки [5].

Сопоставление показателей χ процессовковки и винтовой прокатки; различных схем прессования, процессов волочения и плющения ленты показало, что наибольшими показателями χ обладают процессы винтовой прокатки, циклического бесконтейнерного прессования, волочения через неподвижную волоку и плющения ленты на стане Дуо.

Величина восстановления запаса пластичности после циклического отжига определялась по методике В.А. Огородникова по зависимости [6]:

$$\Delta\psi_1 = \psi_1 + \sum_{i=2}^n \psi_i - 1, \quad (4)$$

где ψ_1 – использованный ресурс пластичности без отжига; $\Delta\psi_1$ – величина восстановленного запаса пластичности после отжига; ψ_i – использованный ресурс пластичности после i -го цикла отжига; $i = 2, 3, \dots, n$.

Заключение

В результате морфологического анализа возможных вариантов технологий обработки разработана морфологическая таблица, включающая 2688 вариантов технологий.

Параметром, по которому производится оптимизация процесса плющения, является значение граничной равномерной

интенсивности деформаций. Эффективность процессов пластического деформирования предшествующих плющению оценивалась по критерию В.А. Огородникова. Это позволило в рамках феноменологической теории установить набор технологий получения вольфрамовых катодов из винтокатаных прутков – термоциклический отжиг, бесконтейнерное циклическое прессование, волочение через неподвижную матрицу и плющение на стане Дуо.

Библиографический список

1. Ерохина Л. С., Калугина Л. В., Михайлов С. К. Методы прогнозирования развития конструкционных материалов - Л.: Машиностроение. Ленинградское отд.е, 1980. – 256 с.
2. Миклашевич И. А. Микромеханика разрушения в обобщенных пространствах – Минск, «Логвинов», 2003.- 195 с.
3. Shapoval A.N. Improving the technology for making tungsten wire / Shapoval, A.N.; Gorbatyuk, S.M.; Gorbatyuk, M.S. // Metallurgist Volume: 42 Issue: 9-10 Pages: 392-395
4. Шаповал А. Н., Горбатюк С. М., Шаповал А. А. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2006. – 352 с.
5. Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю. И. Инженерные расчеты упруго-пластической контактной деформации. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
6. Огородников В. А., Киселев В. Б., Сивак И. О. Энергия. Деформации. Разрушение. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.



УДК 608.4

А.А. Королев, А.В. Королев, Е.В. Мухина
ФГБОУ ВПО Саратовский государственный
технический университет им. Гагарина Ю.А
г. Саратов, Россия
E-mail: lento4ka.2013@mail.ru
Дата поступления 06.02.2015

В авторской редакции

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТОХАСТИЧЕСКОГО СПОСОБА КОМПЛЕКТОВАНИЯ ШАРИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ¹

Аннотация

Разработана математическая модель процесса комплектования методом индивидуального подбора деталей. В качестве закона распределения был взят усеченный закон нормального распределения. В основе способа лежит схема, основанная на измерении собираемых деталей и последующих расчетах значения вероятности собираемости деталей. Рассмотрены несколько видов предложенной схемы осуществления процесса комплектования.

Ключевые слова: стохастическая модель, подшипники качения, вероятность комплектования, индивидуальный подбор, закон нормального распределения.

Введение.

Наиболее распространенным методом сборки высокоточных изделий в машиностроении является метод селективной сборки, основанный на групповой взаимозаменяемости. Он заключается в изготовлении деталей со сравнительно широкими технологически выполнимыми допусками, сортировке деталей на равное число групп с более узкими групповыми допусками и сборке их (после комплектования) по одноименным группам. Процесс комплектования данными способами имеет некоторые недостатки: необходимость использования высокоточных средств сортировки, невозможность применения при мелкосерийном и единичном производствах, появление значительного незавершенного про-

изводства, увеличение амортизационных отчислений на контрольно-измерительное оборудование и затрат на контроль и др.

В связи с этим предлагается использовать способ комплектования подшипников, который основан индивидуальном подборе деталей. Элементарные расчеты показывают, что схемы комплектования подшипников, основанные на индивидуальном подборе поступающих на рабочие позиции деталей, обеспечивают максимально возможную собираемость изделий.

Основная часть

Для определения рациональных параметров комплектования подшипников примем схему, предложенную в работе [1] и изображенную на рисунке 1:

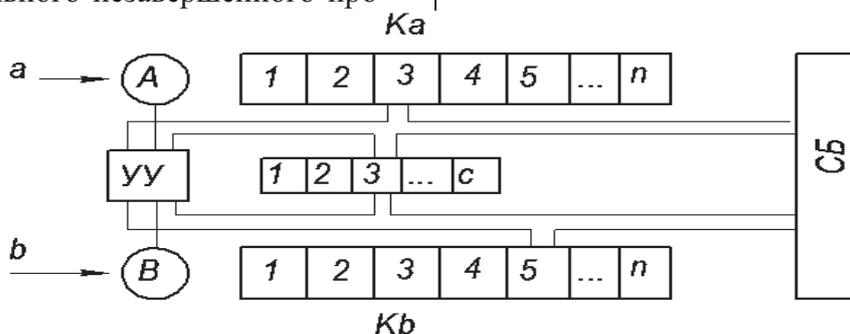


Рисунок 1. Обобщенная схема комплектования подшипников

1

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России -УИН ФЦП RFMEFI57414X0015

Предварительно в специальные бункеры (1,2,3...с) засыпают тела качения (в каждый бункер определенное количество шариков с одним типоразмером), а информацию об их размерах запоминают с помощью управляющего устройства УУ. С помощью того же устройства УУ запоминают допустимые величины зазоров в подшипнике.

Наружные a и внутренние b кольца подшипника подают на измерительные позиции А и В, подвергают измерению и направляют соответственно в накопитель наружных колец K_a и накопитель внутренних колец K_b , имеющих n позиций. Эти позиции постепенно заполняют кольцами.

Информацию о размерах колец также запоминают с помощью управляющего устройства УУ. Располагая информацией о размерах колец в накопителях K_a и K_b , об имеющихся размерах тел качения и заданных величинах зазоров, определяют возможность комплектования деталей. Если она имеется, то с помощью управляющего устройства УУ, например, наружное кольцо с позиции 3 накопителя K_a , внутреннее кольцо с позиции 5 накопителя K_b и тело качения из бункера 2 перемещают на комплектовочную позицию СБ. Освободившееся место в накопителях K_a и K_b заполняют новыми кольцами.

Если имеющиеся в накопителях K_a и K_b кольца не могут быть скомплектованы с находящимися в бункерах телами качения, то находящиеся на последних позициях накопителей K_a и K_b кольца подают на повторное комплектование, оставшиеся кольца смещают на одну позицию, а на позицию 1 подают новые кольца.

Кроме того, с помощью устройства УУ накапливают значения размеров колец, поступающих на комплектование, и вычисляют значение вероятности комплектования деталей подшипника с теми или иными размерами. Если для определенного размера колец значение вероятности их комплектования с имеющимися телами качения (далее собираемость) мало, то при поступлении колец с такими размерами на позицию 1 накопителей K_a и K_b они с помощью управляющего устройства УУ уда-

ляются и в дальнейшем комплектовании не участвуют.

Рассмотренную на рисунке 1 схему берем за основу при рассмотрении других схем.

За основные допущения примем следующие:

1. В качестве закона распределения размеров наружных и внутренних колец примем нормальный закон распределения и усеченный закон нормального распределения. Известно, что нормальный закон распределения обычно проявляется при изготовлении деталей на настроенных станках с автоматическим получением размера в тех случаях, когда на погрешность обработки действует множество случайных факторов одного порядка малости [2, 3]. Это - наиболее часто встречающийся на практике случай. Однако на комплектование подшипников кольца поступают с различных рабочих мест, на каждом из которых настроечный размер имеет различное значение. В таком случае проявляется действие систематического фактора - смещение среднего размера колец в каждой из партии. Если это смещение составляет основную долю в поле рассеивания размеров колец, то закон распределения поступающих на комплектование колец будет близок к усеченному закону нормального распределения.

2. Законы распределения наружных и внутренних колец примем одинаковыми, но с различными параметрами распределения (математическим ожиданием и дисперсией). Это допущение соответствует реальным производственным условиям, так как условия изготовления наружных и внутренних колец одинаковые, и к тому же различный характер распределения размеров наружных и внутренних колец, как известно, обеспечивает низкую собираемость подшипника.

3. Максимальное число различных размеров тел качения, с которыми осуществляется комплектование колец, примем равным трем (три типоразмера тел качения). Как будет показано ниже, это число размеров тел качения, с одной стороны, обеспечивает высокий уровень комплектования подшипников, а с другой стороны,

не вызывает трудностей в создании соответствующего технологического оборудования.

Обозначим $f(d)$ - плотность вероятностей распределения размеров внутренних колец с математическим ожиданием (МО) M_d и средним квадратическим отклонением (СКО) σ_d ; $f(D)$ - плотность вероятностей распределения размеров наружных колец с МО M_D и СКО σ_D . В бункеры загружены тела качения с размерами ds_1, \dots, ds_c . Допустимые максимальный и минимальный зазоры составляют соответственно Z_{\max} и Z_{\min} .

В общем виде распределение размеров колец подшипников является усеченным:

$$f_{yc}(D) = \frac{1}{A} f(D); \quad (1)$$

$$f_{yc}(d) = \frac{1}{B} f(d), \quad (2)$$

где

$$A = \int_{d_n}^{d_v} f(d) dd, \quad B = \int_{D_n}^{D_v} f(D) dD,$$

d_n, d_v, D_n, D_v - верхние и нижние значения размеров колец.

Усечение можно осуществлять искусственно для повышения производительности комплектования и предотвращения поступления на комплектование колец с крайними и редкими размерами, которые в процессе комплектования удаляют. Кроме того, усечение часто возникает на практике, так как размеры деталей ограничиваются допуском, а сами детали подшипников поступают на комплектование с разных рабочих мест и имеют различные поля рассеивания размеров.

Значение вероятности комплектования (в дальнейшем вероятность комплектования) того, что для произвольного наружного кольца подшипника с размером D будут подобраны при комплектовании внутренние кольца при наличии тел качения с размером ds_i , равна

$$p(D) = f(D) \int_{d_{ni}}^{d_{vi}} f(d) dd, \quad (3)$$

где

$$d_{vi} = D - 2ds_i - z_{\min}; \quad (4)$$

$$d_{ni} = D - 2ds_i - z_{\max}. \quad (5)$$

Если при комплектовании используется не один, а несколько комплектов тел качения, равных c , то выражение (3) примет вид:

$$p(D) = f(D) \sum_{i=1}^c \left(\int_{d_{ni}}^{d_{vi}} f(d) dd \right). \quad (6)$$

При суммировании вероятностей в формуле (6) следует придерживаться следующего правила. Если соседние размеры тел качения отличаются между собой более чем на величину допуска на зазор в подшипнике, то пределы интегралов, суммируемых в выражении (6), определяются по формулам (4) и (5). Если два соседних по размеру тела качения отличаются между собой на величину меньшую допуска на зазор, то нижнее значение предела интегрирования последующего интеграла принимается равным верхнему значению интегрирования предыдущего интеграла.

Указанное правило поясняется рисунком 2. Кривая на этом рисунке соответствует распределению размеров внутренних колец, D -случайный размер наружного кольца, Z_{\max} и Z_{\min} - предельные размеры зазоров в подшипнике, ds_1 и ds_2 - размеры тел качения.

Из рисунка 2 видно, что если $(ds_1 - ds_2) < (Z_{\max} - Z_{\min})$, то границы интегрирования перекрываются, а вероятности комплектования колец с первым и вторым телами качения (заштрихованные площади) частично накладываются одна на другую. Нижней границей интегрирования в этом случае является нижняя граница, рассчитанная по формуле (5) при $ds_1 = ds_2$, а верхней - верхняя граница, рассчитанная по формуле (4) при $ds_1 = ds_2$. При определенных размерах колец комплектование можно осуществлять как с теми, так и с другими телами качения.

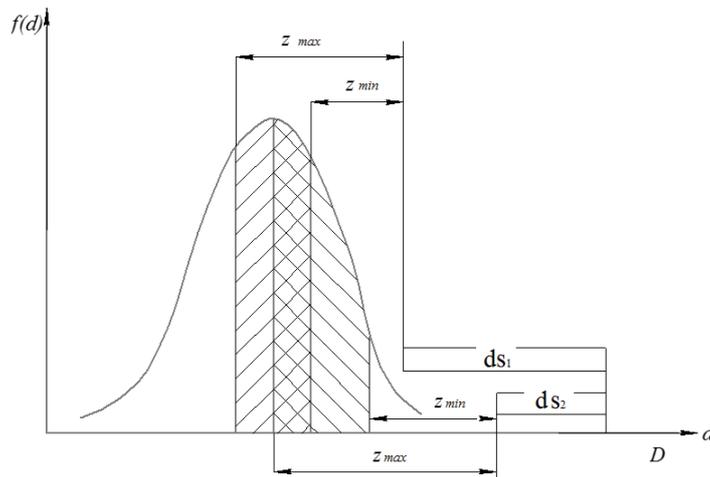


Рисунок 2. Схема индивидуального подбора внутренних колец к наружному кольцу размером D при комплектовании подшипника шарами двух размерных групп

Из этого следует вывод, что наибольшая вероятность комплектования, а следовательно и наибольшая производительность, достигается в том случае, если разноразмерность тел качения, засыпаемых в бункеры, будет больше допуска на зазор в подшипнике.

Вероятность того, что кольца и данные тела качения при заданных величинах зазоров будут собраны в подшипники, определится равенством:

$$p_y = \int_{D_n}^{D_v} f(D) dD \sum_{i=1}^c \left(\int_{d_{ni}}^{d_{vi}} f(d) dd \right). \quad (7)$$

Величина p_y представляет собой условную вероятность того, что два случайных наружных и внутренних кольца, попав на первую позицию, сразу могут быть скомплектованы с имеющимися в бункере телами качения. Полная вероятность комплектования p двух случайных поступивших в накопители колец определяется равенством:

$$p = p_y F, \quad (8)$$

где F - вероятность поступления на комплектование только тех колец, которые могут быть скомплектованы с имеющимися в бункерах телами качения.

Вероятность F представляет собой максимальную долю колец, которые могут быть скомплектованы с имеющимися телами качения при самых благоприятных для этого условиях. Назовем ее максимальной вероятностью комплектования и найдем ее значение.

На рисунке 3 приведена схема для расчета вероятности присутствия в партии колец, поступающих на комплектование, комплектных колец, т.е. колец таких размеров, которые могут быть скомплектованы с имеющимися телами качения.

Пусть для внутренних колец с размером d необходимо подобрать наружные кольца. Если в комплектовании подшипников участвуют тела качения одного размера, то к этим внутренним кольцам подойдут наружные кольца с размером: $D_i = d_i + 2ds + z$, где z -значение зазора.

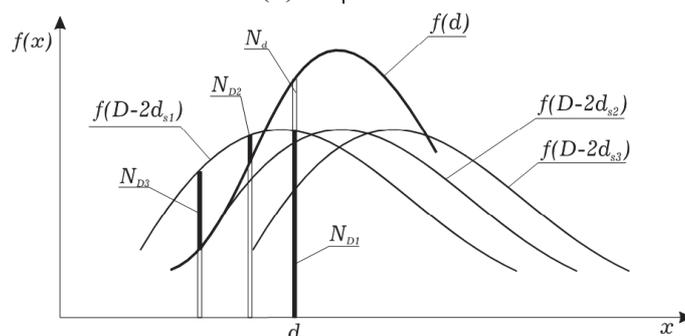


Рисунок 3. Схема к определению полной вероятности комплектования подшипника тремя группами размеров шаров

Но из рисунка 3 видно, что в партии находится разное количество колец нужных размеров D и d ($N_d > N_{D1}$). Если в партии наружных колец данного размера больше, чем внутренних, то останется нескомплектованной часть наружных колец; если в партии находится больше внутренних колец, как это представлено на рисунке 3, то часть этих колец также останется нескомплектованной. Поэтому при определении вероятности комплектования колец необходимо суммировать минимальные значения плотностей вероятностей распределения размеров наружных и внутренних колец:

$$F = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \min(f_d(d), f_D(d+2ds+z)) dd,$$

где $f_d(d)$ и $f_D(d+2ds+z)$ - плотности вероятностей распределения размеров соответственно внутренних и наружных колец при значениях размеров, стоящих в скобках.

Выражение $\min(f_d(d), f_D(d+2ds+z))$ означает, что из двух слагаемых при интегрировании надо взять минимальное.

При комплектовании с двумя или тремя размерами тел качения внутренние кольца размера d могут быть скомплектованы с наружными кольцами, имеющими другие размеры при соблюдении условия: $N_d = N_{D1} + N_{D2} + N_{D3}$. Причем, к внутренним кольцам размером d подойдут наружные кольца следующих размеров:

$$D_j = d + 2ds_{j-1} (j=1, 3),$$

где D_j - размеры наружных колец, с которыми собираются внутренние кольца d при комплектовании шаром ds_j , j - порядковый номер.

Введем следующие обозначения:

d_j - размеры внутренних колец, с которыми собираются наружные кольца D_j при комплектовании шаром ds_j , и определяются из выражения:

$$d_j = D_j - 2ds_{j-1} - z;$$

a_j - доля нескомплектованных d внутренних колец после последовательного комплектования его шарами различных размеров ds_1, \dots, ds_j ;

b_j - доля нескомплектованных D_j наружных колец после комплектации первым шаром ds_1 .

Доля скомплектованных внутренних колец d может быть найдена из выражения:

$$F(d) = f_d(d) - a_3, \quad (9)$$

где, учитывая, что

$$b_j = f_D(D_j) - \min(f_d(d_j), f_D(D_j)),$$

и

$$a_{j-1} = f_d(d) = f_d(d_1),$$

значение a_3 легко определяется из рекурсивной формулы:

$$a_j = a_{j-1} - \min(a_{j-1}, b_j).$$

Тогда долю всех скомплектованных внутренних колец можно получить, интегрируя выражение (9):

$$F = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} F(d) dd. \quad (10)$$

С учетом выражения (10) равенство (8) примет вид:

$$p = p_y \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} F(d) dd. \quad (11)$$

В таблице 1 представлены результаты расчета значения вероятности p комплектования подшипника при нормальном законе распределения размеров колец и $M_d = 9$ мм, $M_D = 21$ мм., $\sigma_d = \sigma_D = 0,040$ мм, $z_n = 0,006$ мм, $z_v = 0,014$ мм. Размеры тел качения соответствуют указанному выше наиболее благоприятному условию сборки:

-при сборке с одним телом качения $ds_1 = 5,995$ мм;

-при сборке с двумя телами качения $ds_1 = 5,991$ мм., $ds_2 = 5,999$ мм;

-при сборке с тремя телами качения $ds_1 = 5,987$ мм, $ds_2 = 5,995$ мм., $ds_3 = 6,003$ мм.

Таблица 1

Собираемость p подшипника при различных комплектах тел качения

Комплекты	ds_1	$ds_1 + ds_2$	$ds_1 + ds_2 + ds_3$
Вероятность комплектования p	0.0567	0.1122	0.1656

Как видно, вероятность комплектования p во многом зависит от числа размеров тел качения, находящихся в бункерах. Однако в целом она не велика, а поэтому и производительность процесса комплектования мала.

Рассмотрим случай, когда накопители наружных и внутренних колец содержат всего по одной позиции. Определим вероятность того, что после измерения i пар колец встретится такая пара, которую можно скомплектовать с заданной точностью с имеющимися телами качения. Вероятность этого события после измерения первой пары равна p . Вероятность p_2 того, что вторая измеренная пара колец удовлетворяет условиям комплектования, равна произведению двух вероятностей:

- вероятности $(1-p)$ того, что предыдущая пара колец не удовлетворила условиям комплектования, и

- вероятности p комплектования данной пары:

$$p_2 = qp, \text{ где } q = 1 - p.$$

Подобным же образом рассчитываем вероятности комплектования любой пары колец с порядковым номером m . Ряд этого распределения представлен в таблице 2

Таблица 2

Ряд распределения вероятностей появления комплектных колец подшипника

m	1	2	—	i	—
p_m	p	qp	—	$q^{i-1} p$	—

Математическое ожидание числа замеренных пар колец, через которое появляется пара, удовлетворяющая условиям комплектования, равно:

$$M_x = p \sum_{i=1}^{\infty} i q^{i-1} = \frac{1}{p}, \quad (12)$$

а дисперсия

$$D_x = p \sum_{i=1}^{\infty} i^2 q^{i-1} - M_x^2 = \frac{q}{p^2}. \quad (13)$$

Например, при $p=0,056$ по формулам (12) и (13) найдем $M_x=17,7$, т.е. через каждые 17-18 замеренных пар колец одна пара комплектуется. Если при этом среднее время измерения равно T_0 , то такт комплектации $T_k = T_0 \cdot M_x$. Для нашего примера он равен $T_k = 17,7 T_0$.

Пусть теперь число накопителей наружных и внутренних колец равно n , а накопители колец сразу после комплектования заполняются другими кольцами. Как было показано выше, вероятность ком-

плектования случайной пары колец равно p . Найдем вероятность P комплектования наружного кольца с внутренними. Она равна сумме вероятностей комплектования с каждым из находящихся в накопителе внутренних колец. Вероятность комплектования с кольцом, находящимся на первой позиции накопителя, равна p , с кольцом, находящимся на второй позиции, - qp и т.д. в соответствии с табл.2. Тогда $P = p + pq + pq^2 + \dots + pq^{n-1}$. После преобразования получим:

$$P = 1 - q^n. \quad (14)$$

Рассмотрим процесс комплектования подшипника по другой схеме. Пусть накопители наружных и внутренних колец имеют по n позиций. При поступлении в накопителя очередного наружного кольца с порядковым номером i оно может быть скомплектовано с теми внутренними кольцами, которые не были скомплектованы с другими предыдущими наружными кольцами. В общем виде вероятность осуществления события, состоящего в том, что наружное кольцо с порядковым номером i за время перемещения через накопитель с числом позиций n будет скомплектовано с одним из внутренних колец, равна:

$$P_i = \sum_{j=1}^N P_{ij} \quad (15)$$

где p_{ij} - вероятность комплектования наружного кольца имеющий порядковый номер i с внутренним кольцом имеющим порядковый номер j .

Пределы суммирования в выражении (15) ограничиваются только теми порядковыми номерами внутренних колец, с которыми данное наружное кольцо с порядковым номером i может быть скомплектовано в процессе прохождения через накопитель. Если накопители внутренних и наружных колец движутся поочередно навстречу друг другу, то число внутренних колец, с которыми может быть скомплектовано наружное равно $2n$. При других схемах перемещения накопителей число таких колец будет меньше, а следовательно, и условия для комплектования будут менее благоприятны. Поэтому в дальней-

шем будем рассматривать именно такую схему перемещения накопителей.

Определим вероятности p_{ij} . Вероятность комплектования первого наружного кольца подшипника с первым поступившим на комплектование внутренним кольцом равна $p_{11} = p$. Если предпочтение при комплектовании отдать первому кольцу, то вероятность комплектования этого кольца со вторым внутренним кольцом равна $p_{12} = pq$. Далее со всеми последующими кольцами первое наружное кольцо комплектуется с вероятностью, соответствующей табл. 2. Вероятность комплектования всех последующих i -ых наружных колец с каждым конкретно j -ым внутренним кольцом p_{ij} будет зависеть от произведения трех вероятностей: вероятности комплектования наружного кольца с самим внутренним кольцом p , вероятности того, что это наружное кольцо не было скомплектовано с предыдущими внутренними кольцами и вероятности того, что данное внутреннее кольцо не было скомплектовано с предыдущими наружными кольцами.

Известно, что линейные алгебраические преобразования удобно осуществлять с помощью матриц. Поэтому для удобства подсчета вероятностей комплектования i -го наружного кольца с j -ым внутренним кольцом p_{ij} рассмотрим матрицу $N \times N$, состоящую из элементов p_{ij} - пересечения i -ой строки и j -го столбца:

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{N1} & p_{N2} & \dots & p_{NN} \end{pmatrix}$$

Тогда каждый элемент матрицы, учитывая вышесказанное, может быть рекурсивно выражен через ее предыдущие элементы следующим соотношением:

$$p_{ij} = p \left(1 - \sum_{k=1}^{j-1} p_{ik} \right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^{i-1} p_{kj} \right),$$

где $\sum_{k=1}^{j-1} p_{ik}$ - вероятность того, что соответствующее наружное кольцо соберется хотя бы с одним предыдущим внутренним кольцом;

$\sum_{k=1}^{i-1} p_{kj}$ - вероятность того, что соответствующее внутреннее кольцо соберется хотя бы с одним предыдущим наружным кольцом.

Подставляя это выражение в равенство (15) получим вероятность комплектования i -го наружного кольца:

$$P_i = p \cdot \sum_{j=i-n+1}^{i+n} \left(1 - \sum_{k=1}^{j-1} p_{ik} \right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^{i-1} p_{kj} \right). \quad (16)$$

Очевидно, что индекс суммирования внешней суммы не может принимать значения меньше 1 и больше N . Если индекс выходит за допустимую границу, то он принимает значение самой границы.

Используя равенство (16) найдем математическое ожидание числа пар колец, которые будут скомплектованы при прохождении наружного кольца с порядковыми номерами x через накопитель. Обозначим: Z - число пар колец скомплектованных с Z -ым наружным кольцом.

Случайная величина Z может принимать два возможных значения: 0 и 1. Рассмотрим вероятности появления этих значений:

$$P(Z=0) = (1 - P); \quad P(Z=1) = P.$$

Тогда математическое ожидание и дисперсия определяются выражениями:

$$M_z = \sum_{i=0}^2 iP(Z=i) = P \quad (17)$$

$$D_z = \sum_i^2 P(Z=i) - M_z^2 = P \cdot (1 - P) \quad (18)$$

Используя выражения (17) и (18) найдем математическое ожидание такта комплектования колец при такте измерения деталей T_0 :

$$T_k = T_0(x). \quad (19)$$

Доля пар колец, возвращающихся для повторного комплектования:

$$Q = (1 - P)A + 1 - A, \quad (20)$$

где A - доля поступающих на комплектование колец подшипников, определяемая по зависимостям, приведенным вначале этого раздела.

Выражения (11) - (13) и (17) - (20) моделируют основные результаты комплектования подшипников с применением различных схем и позволяют обоснованно управлять этим процессом.

Заключение

В статье была рассмотрена математическая модель процесса комплектования подшипников, в которой были найдены величины вероятности комплектования наружного кольца с внутренними кольцами. Входными параметрами являлись: размер минимального d_{\min} и максимального d_{\max} внутреннего кольца, размер минимального D_{\min} и максимального D_{\max} наружного кольца, размеры трех тел качения ds_1, ds_2, ds_3 , максимальный z_{\max} и минимальный z_{\min} допустимый радиальный зазор, средние размеры внутренних $d_{\text{ср}}$ и наружных колец $D_{\text{ср}}$, а также средние квадратические отклонения размеров наружных σ_1 и внутренних σ_2 колец.

Предполагалось, что наружные и внутренние кольца имеют усеченный закон нормального распределения.

Алгоритм вычисления вероятности комплектования наружного кольца с внутренним кольцом состоял из трех отдельных этапов:



УДК 621.746.047:621.86

1. Нахождение вероятности p комплектования наружного кольца с внутренним кольцом
2. Вычисление значения доли F колец, которые вообще могут быть скомплектованны.
3. Вычисление вспомогательных функций, которые участвуют в процессе определения вероятностей.
4. Вычисление вероятности комплектования каждого наружного кольца.

Библиографический список

1. Замятин, В.К. Технология и автоматизация сборки. Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. - М.: Машиностроение, 1993. -464с.
2. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей. Изд. 5-е. М.: Наука, 1969. - 400 с.
3. Королюк, В.С. и др. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. - М.: Наука. Физико-математической литературы, 1985. -640с.

К.Н. Вдовин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

г. Магнитогорск, Россия

E-mail: vdovin@magtu.ru

Дата поступления 12.03.2015

РАЗРАБОТКА РАФИНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ МОДЕРНИЗИРУЕМЫХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ МНЛЗ

Аннотация

Рассмотрена возможность модернизации оборудования промежуточных ковшей (ПК) машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Отмечены известные способы и устройства рафинирования металла. Приведенные рекомендации по конструированию устройств модернизируемых ПК являются обобщением наиболее известных работ в этом направлении и озвучивают минимальные требования к конструкции ковша. Представлены созданные конструкции для ПК слябовой МНЛЗ.

Ключевые слова: МНЛЗ, модернизация, промежуточный ковш, рафинирующие устройства.

Введение

В настоящий момент перспективным для РФ направлением является модернизация существующих, типовых ПК МНЛЗ с

учетом имеющихся у предприятий ресурсов [1]. Работы конструкторов, ведущиеся в этом направлении, связаны с интенсификацией процесса рафинирования стали [1, 2]. Для этих целей применяются

рафинирующие устройства [1]. В работе освещаются отдельные известные способы и устройства рафинирования металла.

Основная часть

Основными источниками загрязнения стали неметаллическими включениями (НВ) являются [1]: продукты раскисления стали, частицы шлака и огнеупоров футеровки, продукты вторичного окисления металла. НВ удаляются из расплава в промежуточном ковше за счет всплытия к поверхности и коагуляции [2]. При этом, покровный шлак, наводимый на поверхности стали, должен обеспечивать защиту металла от вторичного окисления атмосферным воздухом и ассимилировать всплывающие частицы.

Всплытие связано с действием на частицу Архимедовых сил, что обусловлено разными плотностями стали и НВ. Скорость всплытия зависит от размеров частицы, ее агрегатного состояния (жидкие НВ или твердые), формы и смачиваемости [2, 3].

НВ, находящиеся в расплаве стали, принято разделять на крупные и мелкие [2]. К крупным относят включения размером более 20 мкм. Если размер частиц менее 20 мкм, их принято относить к мелким НВ.

Разделение НВ на крупные и мелкие связано с тем, что включения размером менее 20 мкм практически не удаляются из стали за счет всплытия. В работе [1] отмечается, что под воздействием межфазных поверхностных сил всплывание мелких НВ, под действием разности плотностей, полностью исключается, и они все попадают в затвердевающую заготовку.

Мелкие НВ удаляются из расплава за счет коагуляции. При этом возможно три вида коагуляции: путем коалесценции (слияние жидких частиц), коагуляции (слияние твердых частиц), адгезии (прилипание жидких частиц к твердым).

На коагуляцию влияют: концентрация НВ в расплаве, соотношение диаметров крупных $d_{>20}$ и мелких $d_{\leq 20}$ частиц и наличие внешних гидродинамических сил (турбулентное или электромагнитное перемешивание и пр.). Наиболее эффективно

процесс укрупнения происходит при соотношении размеров $\frac{d_{>20}}{d_{\leq 20}} > 20$ [1, 2].

Типовые конструкции модернизируемых промежуточных ковшей, с целью интенсификации процесса рафинирования стали, оснащают специальными рафинирующими устройствами. По механизмам рафинирования [1, 3] их можно разделить на газо-рафинирующие, гидродинамические и фильтрационные.

На практике, для достижения максимального эффекта, промежуточный ковш оснащают не одним, а несколькими различными рафинирующими устройствами. Комбинации различных гидродинамических устройств образуют систему распределения потоков стали (СРП).

Конструкция ПК должна учитывать следующие основные факторы [1, 3]:

- 1) число и расположение ручьев МНЛЗ;
- 2) число последовательно разливаемых плавов;
- 3) оснащенность рафинирующими устройствами;
- 4) характер конвективных потоков, способствующих отделению включений;
- 5) достаточную вместимость, позволяющую осуществлять замену сталеразливочных ковшей во время серийной разливки и обеспечивающую необходимое время для всплытия НВ;
- 6) способ начала разливки и метод удаления шлака и остатков металла после окончания разливки;
- 7) способ регулирования истечения металла из ПК;
- 8) возможность корректирующей доводки химического состава стали посредством ввода порошковой проволоки специального состава;
- 9) днище и стенки промежуточного ковша должны иметь ровные поверхности, чтобы не препятствовать движению потока стали. Выступающие углы футеровки подвергаются большому износу, сокращая срок службы ковша и затрудняя удаление настывшей;
- 10) для многоручьевых МНЛЗ с помощью специальных устройств и приемов

необходимо выровнять химический состав и температуру стали по ручьям;

11) подогрев ПК, что обеспечивает всплытие НВ и поддержание необходимой для разлива температуры стали;

12) герметизацию ПК для предотвращения вторичного окисления стали воздухом;

13) ограничение попадания шлака из разливочного ковша в промежуточный;

14) застойные зоны в объеме ПК не должны присутствовать, поскольку они вызывают неравномерное распределение концентраций и температуры стали.

К гидродинамическим устройствам можно отнести устройства, которые за счет своей формы и расположения в промежуточном ковше изменяют течение металла в нем, что способствует удалению неметаллических включений из расплава. К ним можно отнести различные перегородки, пороги, турбогасители, вихрегасители и т.д. [3, 4].

Компоновка турбогасителя - металлоприёмника ПК слябовой МНЛЗ на границе разливочной камеры представлена на рисунке 1. Главным недостатком практически всех гидродинамических устройств, является небольшая эффективность удаления мелких неметаллических включений. В тоже время они не требуют затрат на эксплуатацию. Некоторые устройства просты в конструкции, что обеспечивает простоту изготовления и монтажа [9].

Чаще остальных гидродинамических устройств, применяются перегородки. Перегородки разделяют объем промежуточного ковша на две и более камеры. Камеру, в которую поступает металл из сталеразливочного ковша, принято называть приемной, камеру, в которой происходит истечение металла из промежуточного ковша в кристаллизатор – разливочной [6]. В теле перегородок выполняют переливные отверстия, через которые происходит истечение металла в разливочные камеры. Затопленные струи, истекающие в разливочную камеру, за счет градиента давления от периферии к оси струи захватывают неметаллические включения, чем и достигается рафинирующий эффект перегородок.



Рисунок 1. Компоновка металлоприёмника промежуточного ковша слябовой МНЛЗ в приёмной камере: металлоприёмник; приемная камера ковша

Помимо перегородок в производстве часто применяются пороги. Пороги позволяют создать восходящие потоки стали, обеспечивают прием первой холодной порции металла и, в много-ручьевых промежуточных ковшах, способствуют выравниванию времени перемешивания металла по ручьям ковша.

В последние годы на отечественных предприятиях начали применяться разработанные в США турбогасители [8]. Турбогаситель-металлоприёмник представляет из себя стакан с заплечиками. Конструкция металлоприёмника (М) ПК слябовой МНЛЗ в разливочной камере представлена на рисунке 2 [5], в М попадает падающая из сталеразливочного ковша струя металла. Он выполняет следующие функции:

- рассеивается и гасится струя из трубы ковша;
- уменьшается затягивание покровного шлака;
- создаются благоприятные условия для всплытия неметаллических включений;
- улучшается эрозионная защита футеровки ПК и повышается его стойкость;
- уменьшаются всплески.

Газо-рафинирующие устройства рафинируют металл за счет продувки его инертным газом [1].

К ним относятся различные сопла (цилиндрические или щелевые), пористые блоки, пористые пробки, фурмы и т.д. Флотация неметаллических включений газовыми пузырями и последующий вынос к покровному шлаку способствует удалению мелких частиц, которые самостоятельно не всплывают к поверхности [4, 5]. Недостат-

ками газо-рафинирующих устройств являются: возникающее переохлаждение металла из-за взаимодействия с “холодным” газом, необходимость оснащения площадки системой подготовки газа и, собственно, расход инертных газов.

Компоновка созданного аргонного блока ПК слябовой МНЛЗ на границе разливочной камеры представлена на рисунке 2 [5].

Для отделения пузырьков аргона от сопла, должен быть определен диапазон рабочих давлений в аргонопроводе [6, 7]. При этом необходимо учесть величину атмосферного (p_a) и ферростатического давления, поверхностного натяжения ($2\sigma_{нов}/r$), а также потери давления в системе. Очевидно, что для обеспечения стабильности процесса продувки необходим запас давления аргона (Δp_3).



Рисунок 2. Компоновка блока (аргонного блока) промежуточного ковша слябовой МНЛЗ на границе разливочной камеры

Давление $p_{пол}$ в системе подачи аргона определяем по зависимости

$$p_{пол} = p_a + \rho_c \cdot g \cdot h_m + \rho_{ш} \cdot g \cdot h_{ш} + \Delta p_l + \Delta p_c + \Delta p_3 + 2\sigma_{нов}/r, \quad (1)$$

где ρ_c , $\rho_{ш}$ - плотности соответственно металла и шлака; h_m , $h_{ш}$ - высоты уровней соответственно металла и шлака; Δp_l - потери давления по длине трубопровода; Δp_c - потери давления на выходе из сопла; Δp_3 - запас давления; $2\sigma_{нов}/r$ - давление от поверхностного натяжения.

При истечении металла из сталеразливочных отверстий промежуточного ковша, в силу действия ускорения Кориолиса, над стаканами образуются вихри. Вихревые массы, генерирующиеся над разливочными стаканами, приводят к то-

му, что при падении уровня металла в промежуточном ковше образуются воронки с прорывом шлака в отверстия стаканов стали. Благодаря воздействию струй стали, из отверстий (см. рисунок 2) создается направленная конвекция, которая способствует выносу неметаллических включений в шлаковую зону, находящейся в верхней части промежуточного ковша. Также перемещение потоков металла из отверстий за стопор создает условия для уменьшения образования вихревых дорожек (вихрей Кармана) за стопором, что обеспечивает уменьшение высоты воронки над разливочным стаканом и уменьшает возможность затягивания неметаллических включений и покровного шлака в металл. Все это способствует повышению качества металла при разливке. Одновременно охватывающее воздействие потоков металла из отверстий обеспечивает устойчивую работу стопора относительно оси разливочного стакана, что создает условия для оптимального движения металла в кристаллизатор и обеспечивает высокое качество стали при разливке. Надежная фиксация аргонного блока в ПК обеспечивает стабильную и равномерную подачу инертного газа в процессе всего цикла работы ковша и машины непрерывного литья заготовки в целом. Все это также способствует повышению качества разливаемого металла в течение всего цикла разливки металла.

Заключение

1. Анализ конструкций рафинирующих устройств модернизируемых промежуточных ковшей МНЛЗ позволяет определить подходы к их проектированию и повысить качество непрерывно-литой заготовки.
2. Отмечены особенности конструирования систем распределения потоков стали с подачей аргона.
3. Решена задача создания конструкций системы распределения потоков стали с подачей инертного газа в промежуточном ковше одноручьевого слябовой МНЛЗ, что позволило разработать ряд новых эффективных систем распределения потоков стали.

4. Надежная фиксация опорных элементов в промежуточном ковше обеспечивает стабильную и равномерную подачу инертного газа в процессе всего цикла работы ковша и машины непрерывного литья заготовки в целом. Все это способствует повышению качества разливаемого металла в течение всего цикла разливки металла.

Библиографический список

1. Вдовин К.Н., Семенов М.В., Точилкин В.В. Рафинирование стали в промежуточном ковше МНЛЗ: Монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 118 с.
2. Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок: монография / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин В.В., И.М. Ячиков. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. 348 с.
3. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2012. 540 с.
4. Разработка систем подачи аргона для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ / К.Н. Вдовин, С.Н.Ушаков, О.А.Марочкин, В.В.Точилкин // Технология металлов. 2013, № 6. С. 38-40.
5. Разработка элементов приёмной камеры промежуточного ковша слябовой МНЛЗ / К.Н. Вдовин, Е.А. Мельничук, А.В. Нефедов, В.В. Точилкин // Известия вузов. Черная металлургия. 2014, № 3. С. 23-27.
6. Точилкин В.В., Филатов А.М. Пневмопривод металлургических манипуляторов: Монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2005. 211 с.
7. Точилкин В.В. Методика расчета металлоприёмника промежуточного ковша МНЛЗ // Ремонт, восстановление и модернизация. 2008, № 6. С. 44–47.
8. Разработка оборудования системы распределения потоков стали для промежуточного ковша / С.Н. Ушаков, А.А. Хоменко, К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин // Сталь. 2009, № 3. С. 13–17.
9. Семенов М.В., Точилкин В.В. Методика расчета работоспособности элементов промежуточного ковша МНЛЗ // Вестник машиностроения. 2007, № 6. С. 41–43.



УДК 608.4

**А.А. Королев, А.В. Королев,
Е.В. Мухина, А.С. Яковишин, А.Ф. Балаев**
ФГБОУ ВПО Саратовский государственный
технический университет им. Гагарина Ю.А.
г. Саратов, Россия
E-mail: bazilhadance@mail.ru
Дата поступления 14.02.2015

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СБОРКИ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОГО СПОСОБА СТАБИЛИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Аннотация

В условиях подшипникового производства данный способ, обладая высокой производительностью и энергоэффективностью, позволяет существенно сократить материальные и временные затраты на комплектацию подшипников, исключая необходимость применения метода селективной сборки. Устранение геометрических погрешностей формы и релаксация остаточных объемных напряжений, достигаемые данным способом, приводят к повышению надежности и увеличению долговечности подшипников.

Ключевые слова: подшипники качения, релаксация, остаточные напряжения, геометрические погрешности.

Введение

Наибольшее применение в подшипниковой промышленности получили способы сборки подшипников, при которых все детали предварительно сортируют на группы, а затем внутри каждой группы комплектование осуществляют простым соединением деталей. Недостатком данных способов является большой объем незавершенного производства, так как не используется возможность сборки деталей одной группы с деталями соседних групп. Кроме того, сложность реализации динных способов обусловлена необходимостью предварительной сортировки деталей на группы.

В работе Королева А.А. [1] предлагается совершенно иной способ комплектования деталей подшипников, основанный на статистическом анализе их посадочных размеров. Это позволяет избавиться от дорогостоящей операции рассортировки деталей. Но для этого необходимо обеспечить кольцам подшипников такую точность, при которой можно осуществить полную взаимозаменяемость деталей.

Существенная разница в полях рассеивания размеров наружных и внутренних колец создает очень неблагоприятное условие для комплектования подшипников, т.к. для уменьшения числа некомплектных деталей до приемлемой для практики величины требуется повышенное число тел качения различных размеров, и усложняется процесс комплектования.

Производительность сборки увеличится, если разброс значений размеров сопрягаемых поверхностей окажется минимальным. Это может быть достигнуто применением нового способа стабилизации геометрических параметров кольцевых деталей [3]. Сущность данного способа заключается в последовательном циклическом нагружении детали, что приводит к перераспределению и релаксации остаточных напряжений, сопровождаемому исправлением исходной геометрической формы.

Основная часть

На схеме рисунка 1 кольцевая деталь 1 находится в контакте с тремя

вращающимися валками 2, расположенными под углом 120° . Под действием нормально направленных со стороны валков сил в зонах контакта детали возникает деформация ϵ , такой величины, что возникшие напряжения достигают предела текучести. При равномерном вращении нагруженной детали, передаваемом ведущим валком, пластической деформации подвергается вся поверхность, что приводит к исправлению погрешности геометрической формы. После нескольких оборотов детали, вследствие перераспределения остаточных напряжений, пластическая деформация постепенно переходит в упругую. Последующее вращение в течение некоторого времени, определяемого экспериментально, деталь подвергается циклической упругой деформации, способствующей стабилизации остаточных напряжений [2, 4].

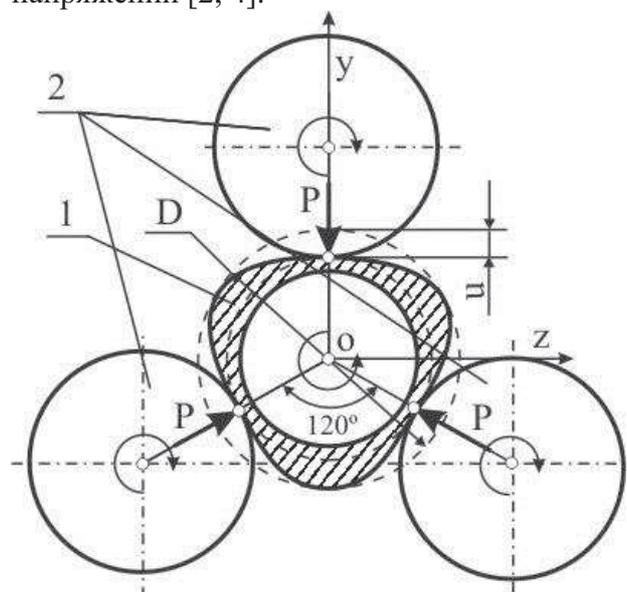


Рисунок 1. Схема стабилизации кольцевых деталей: 1 - деталь, 2 - вращающиеся валки

Так как силу прижима инструмента к детали выбирают из условия возникновения исключительно упругой деформации детали, то при обработке не возникают новые напряжения, не изменяется ее форма и размеры. Из-за наличия внутреннего трения за счет многоциклового обкатки в материале детали накапливается внутренняя энергия, которая концентрируется в зоне остаточных напряжений, вызывает в этой зоне микроскопические пластические сдвиги и релаксацию напряжений без су-

ществленного изменения ее формы и размеров. Время, необходимое для полной релаксации напряжений, или необходимое число циклов нагружения определяется аналитически или экспериментально, и зависит от величины остаточных напряжений, степени упругой деформации детали,

$$u = \frac{P \cdot D^3}{16EJ_o \sin^2(0.5\alpha)} \left(\frac{\alpha}{4} + \frac{\sin \alpha}{4} - \frac{2 \sin^2(0.5\alpha)}{\alpha} \right) + \frac{PD}{4EF \sin^2(0.5\alpha)} \left(\frac{\alpha}{4} + \frac{\sin \alpha}{4} \right), \quad (1)$$

где D - диаметр наружной поверхности заготовки; E - модуль упругости материала детали; J_o - осевой момент инерции сечения детали; F - площадь сечения детали; P - сила в точке контакта детали с валком; α - угол нормали в точке контакта к оси ОУ.

Введём обозначения:

$$K_{u2} = \frac{1}{8 \sin^2(0.5\alpha)} (\alpha + \sin \alpha),$$

$$K_{u1} = K_{u2} - \left(\frac{1}{\alpha} \right)$$

Тогда выражение (1) примет вид:

$$u = \frac{P \cdot D^3}{8EJ} K_{u1} + \frac{PD}{2EF} K_{u2}. \quad (2)$$

Величина силы, приложенной к детали, не вызывающей остаточной деформации при этом, должна удовлетворять условию:

$$P \leq (\sigma_u \cdot W) / (K_\sigma \cdot d), \quad (3)$$

где σ_u - предел упругости материала детали; $K_\sigma = 0.094$; d - внутренний диаметр детали; W - момент сопротивления изгибу.

$$J_x = \int_{0.5D_b}^{0.5D_d} y^2 (B - 2\sqrt{2r(0.5D_{\text{лб}} - y)} - (0.5D_{\text{лб}} - y)) dy + B \int_{0.5D_b}^{0.5D_d} y^2 dy, \quad (5)$$

где D_o - диаметр по дну рабочей поверхности; r - радиус профиля рабочей поверхности заготовки; D_o - диаметр отверстия заготовки.

Осевой момент сечения заготовки найдем с использованием выражения (5):

частоты нагружения и величины внутреннего трения материала детали.

В вышеприведенном способе стабилизации кольцевых деталей, подробнее описанном в работе [3], величина требуемой деформации находится по формуле И.А. Биргера:

Момент сопротивления изгибу для кольцевой детали находится из выражения:

$$W = \frac{J_o}{Y_{\max}}, \quad (4)$$

где J_o - осевой момент инерции сечения; Y_{\max} - расстояние от центральной оси до места расположения максимальных напряжений.

Для определения осевого момента инерции J_o используем упрощенное изображение осевого сечения кольцевой детали рисунок 2, полученного путем вычитания кругового сегмента из прямоугольника. Расположим систему координат таким образом, чтобы ось ОХ совпала с осью заготовки, а центр системы координат с центром симметрии поперечного сечения заготовки. Тогда осевой момент инерции сечения детали относительно оси ОХ можно найти из выражения:

$$J_o = J_x + \frac{S_x^2}{F}, \quad (6)$$

где F - площадь сечения кольца;

S_x - статический момент площади относительно оси ОХ.

Величины F и S_y найдем из выражений, аналогичных выражению (5):

$$F = \int_{0.5D_b}^{0.5D_d} (B - 2\sqrt{2r(0.5D_d - y) - (0.5D_d - y)})dy + \frac{1}{2}B(D_b - D_d), \quad (7)$$

$$S_x = \int_{0.5D_b}^{0.5D_d} y(B - 2\sqrt{2r(0.5D_d - y) - (0.5D_d - y)})dy + B \int_{0.5D_b}^{0.5D_d} ydy. \quad (8)$$

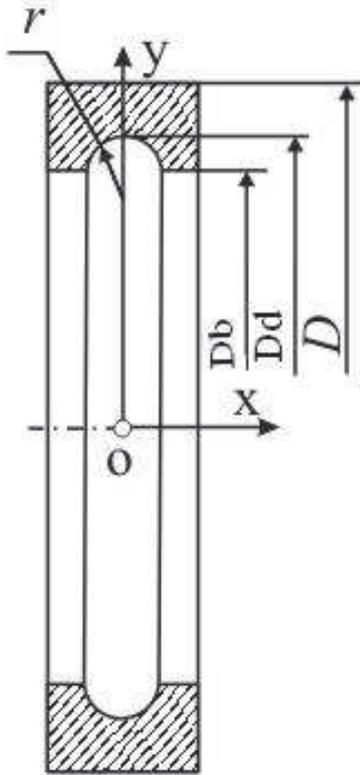


Рисунок 2. Продольное сечение кольцевой детали

Заключение¹

Возможности применения рассмотренного способа выходят за рамки области подшипникового производства, открывая перспективы повышения качества готовой продукции в других областях машино- и приборостроения.

Библиографический список

1. Королев А.А. Разработка и исследование технологии комплектования подшипников индивидуальным подбором деталей. Дисс. на соиск. уч. ст. кандидата техн. наук. – Саратов, 1996.

2. Korolev, A.V., Filomonov, E.V., Bolkunov, V.V., Korolev, A.A. Waste-free manufacture of shaped rollers (2009) Russian Engineering Research, 29 (12), pp. 1258-1260.
3. Патент RU 2478031 Способ релаксации остаточных напряжений. / Королев А.А., Королев А.В. Бюл.№9, 27.03.2013.
4. Korolev, A.V., Korolev, A.A., Vasin, A.N. High-efficiency automated line for precise cold rolling of bearing rings (2010) Russian Engineering Research, 30 (7), pp. 751-752

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России -УИН ФЦП RFMEFI57414X0015, и Госзадания Минобрнауки России № 9.896.2014/К



МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ И СОЗДАНИЕ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША МНЛЗ

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы, связанные с оценкой работоспособности металлоприёмников модернизируемых промежуточных ковшей МНЛЗ. Разработанная методика расчета работоспособности металлоприёмников ПК МНЛЗ, позволяет определить размеры металлоприёмника (М) с точки зрения выполнения им заданной функции – рафинирования стали. В качестве критериев работоспособности были приняты: устойчивость, прочность, отсутствие кавитации и условие, по которому скорость на границе раздела металл-шлак должна быть меньше допустимой.

Ключевые слова: МНЛЗ, промежуточный ковш, металлоприёмник.

Введение

Промежуточный ковш (ПК) представляет собой металлургический агрегат, расположенный между сталеразливочным ковшом (СРК) и кристаллизаторами машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). ПК обеспечивает дозирование и рафинирование стали. Модернизация [1] отдельных элементов ПК, оказывает большое влияние на повышение качества разливаемой стали на МНЛЗ. В настоящий момент перспективным для РФ направлением является модернизация существующих, типовых ПК МНЛЗ с учетом имеющихся у предприятий ресурсов [2, 3].

Основная часть

В металле, поступающем в ПК, содержатся неметаллические включения (НВ), которые с течением времени всплывают. Для удаления крупных НВ размером >20 мкм, применяют металлоприёмники (М), перегородки и пороги специальной конструкции. Указанные устройства имеют различную форму, размеры, различное место положения в ПК [3, 4]. Как правило, при установке таких устройств объем ПК разделяется на две и более камеры – приемную и разливочные [4]. В приемную камеру поступает металл из СРК через погружную трубу [5, 6], в разливочных каме-

рах происходит его истечение из ПК. Металлоприёмник устанавливают в приемной камере ПК, он принимает поступающий металл из СРК.

Не смотря на то, что М начинают широко применять в ПК МНЛЗ при разливке стали, методики их расчета и конструирования на сегодняшний день не совершенны. В работах [3, 7, 8, 9] указываются некоторые положения по оценке работоспособности отдельных устройств ПК. В работе [10] отмечены основы методики расчета работоспособности перегородок и порогов ПК.

В статье приводятся основные критерии работоспособности металлоприёмника ПК МНЛЗ, а также расчетные зависимости необходимые для выбора и расчета элементов конструкции М.

Компоновка М в приемной камере ПК представлена на рисунок 1. Расчет работоспособности М включает расчет на устойчивость, прочность, отсутствие кавитации и условие, по которому скорость, на границе раздела металл-шлак в ПК, должна быть меньше допустимой.

Стойкость к воздействию агрессивной среды определяется эрозионной стойкостью и прочностью, т.е. способностью выдерживать приложенные нагрузки без разрушения. Эрозионная стойкость эле-

ментов металлоприёмника определяются расчетом устройств на кавитацию [3].

Для расчета нагрузок действующих на металлоприёмника проанализируем процесс наполнения металлом ПК, оснащенного данным устройством. В начальный момент времени, подаваемый из СРК металл, открытой струей ударяет в дно металлоприёмника, при этом в полости создается некоторое давление p . Постепенно, с наполнением ковша металлом, давление в полости М частично компенсируется давлением окружающего металла и при установлении рабочего периода суммарное давление будет минимальным. В качестве расчетного принято давление создаваемое струей стали из СРК в начальный момент времени при заполнении ПК металлом.

Неизвестное давление p можно определить, предположив, что скорость металла (ρ – плотность жидкого металла) из СРК V_+ полностью гасится встречным потоком V_{3M} и во внутренней полости скорость равна нулю. В этом случае давление находится как:

$$p = \frac{\rho V_+^2}{2}. \quad (1)$$

В действительности, скорости металла во внутренней полости М не равны нулю, но в таком случае действующее давление жидкости ниже расчетного, и принятое допущение направлено на увеличение запаса прочности устройства.

Зная нагрузку, действующую на М, можно рассчитать неизвестные геометрические характеристик, например толщину элементов М.

Если устройство не крепится к дну ПК, а свободно устанавливается в рабочее положение, необходимым условием работоспособности будет его устойчивость во время работы. Металлоприёмник не должен всплывать и перемещаться по дну ковша в процессе цикла работы ПК.

Условия равновесия имеют вид (рисунок 1):

$$\begin{cases} P_3 + G_M > F_A \\ F_{mp} > P_1 \end{cases}, \quad (2)$$

где P_3 – сила, создаваемая струей металла; G_M – вес М; F_{mp} – сила трения между

М и дном ПК; F_A – сила Архимеда (появление силы Архимеда зависит от надёжности фиксации опорной поверхности М на дне приёмной камеры ПК); P_1 – сила, стремящаяся сдвинуть М.

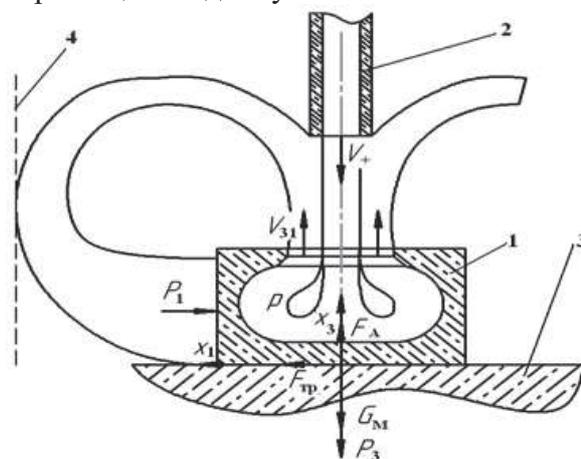


Рисунок 1. Компоновка металлоприёмника в промежуточном ковше и схема нагрузок: 1 – металлоприёмник; 2 – приемная труба; 3 – дно ПК; 4 – торец боковой перегородки ПК

Сила трения:

$$F_{mp} = \mu_{mp} (P_3 + G_M - F_A). \quad (3)$$

Сила, сдвигающая М связана с неравномерностью течения металла. В процессе работы сталь течет в разливочные камеры ПК с различными расходами, что связано с неравномерным перекрытием сталеразливочных стаканов, неточной установкой М, и колебаниями жидкости. Для расчета P_1 считаем, что в некоторый момент времени возникает условие (например, при открытии механизмов сталеразливочных стаканов с одной стороны ПК) при котором действие силы P_1 максимально. Сама сила возникает в результате набегания на боковую поверхность М отраженного от препятствия потока (см. рисунок 1). Таким препятствием может быть перегородка или стенка ковша. Скорость этого потока равна:

$$V = \frac{Q_+}{2\tau_m}, \quad (4)$$

где τ_m – площадь миделева сечения М; Q_+ – расход металла из СРК.

В дальнейшем точнее было бы производить расчет силы P_1 , как силы давления возникающей при обтекании потоком

цилиндрического тела (при использовании М с наружной боковой цилиндрической поверхностью), однако в соответствии с принятыми допущениями находим силу P_1 как силу давления потока на плоскую поверхность с сечением τ_M [4]:

$$P_1 = \tau_M \frac{\rho V^2}{2}. \quad (5)$$

Подставляя формулу (4) в выражение (5) получим:

$$P_1 = \frac{\rho Q_+^2}{8}. \quad (6)$$

Сила Архимеда [4] в условии (2) находится как:

$$F_A = G = \rho g \sigma_M, \quad (7)$$

где G – вектор силы тяжести жидкости в объеме погруженного в нее тела; σ_M – объем металлоприёмника.

Вес М находится по зависимости (m_M – масса металлоприёмника)

$$G_M = m_M g. \quad (8)$$

Сила P_3 может быть найдена по зависимостям [3]:

$$P_3 = 2\rho\tau_S V_+^2, \quad (9)$$

где τ_S – сечение струи, поступающей из приёмной трубы с внутренним диаметром d_+ .

С учетом того, что сечение струи равно $\tau_S = \frac{\pi d_+^2}{4}$, получим:

$$P_3 = \frac{1}{2} \pi \rho (d_+ V_+)^2. \quad (10)$$

С учетом зависимостей (3, 6, 7, 8 и 10) условие устойчивого положения металлоприёмника (2) запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \pi \rho (d_+ V_+)^2 + m_M g > \rho g \sigma_M \\ \mu_{mp} \left(\frac{1}{2} \pi \rho (d_+ V_+)^2 + m_M g - \rho g \sigma_M \right) > \frac{\rho Q_+^2}{8} \end{cases} \quad (11)$$

Если условия (11) выполняются, то незакрепленный М во время работы будет сохранять свое первоначальное положение.

Для определения скоростей жидкости на расчетной поверхности (рисунок 2) металлоприёмника сделаем два допущения. Во первых - расход жидкости через выделенное кольцо равен расходу жидкости на

входе ПК. Во вторых - при движении металла от дна М к поверхности происходит равномерная смена направления векторов скорости, если в сечении I скорость $V_{3cp} = \text{const}$, а $V_1 = 0$, $V_2 = 0$; то в сечении III (на выходе из М) скорость $V_{3cp} = 0$, а скорости V_1 и V_2 принимают некоторые значения. Скорости металла через поверхность кольца I:

$$V_{3I} = \frac{Q_+}{\tau_I}, \quad (12)$$

где τ_I – площадь кольца.

Площадь кольца определяется выбранной расчетной поверхностью и диаметром входящего потока (приёмной трубы):

$$\tau_I = \pi \left(R^2 - \frac{d_+^2}{4} \right), \quad (13)$$

где R – радиус цилиндрической поверхности.

Изменение скорости V_{3cp} по высоте определим функцией:

$$V_3 = V_{3I} \cdot \cos \frac{\pi x_3}{2(H - h_m)}, \quad (14)$$

где H – высота столба металла; h_m – высота М.

При $x_3 = 0$ скорость $V_3 = V_{3I}$, постепенно, по мере увеличения значения x_3 , происходит уменьшение скорости V_3 и при $x_3 = H - h_m$ скорость $V_3 = 0$.

Выражение (12) с учетом (13) и (14) запишется в виде:

$$V_3 = \frac{4Q_+}{\pi(4R^2 - d_+^2)} \cdot \cos \frac{\pi x_3}{2(H - h_m)}.$$

Скорость течения стали в поверхностном слое можно определить по (12).

Вектор скорости движения стали V меняет свое направления от сечения к сечению, при этом сохраняет свое значение $|V|$. В этом случае скорость металла на границе раздела фаз сталь-шлак определяется по скорости металла в I сечении с площадью τ_I :

$$|V_{nc}| = \frac{Q_+}{\tau_I}.$$

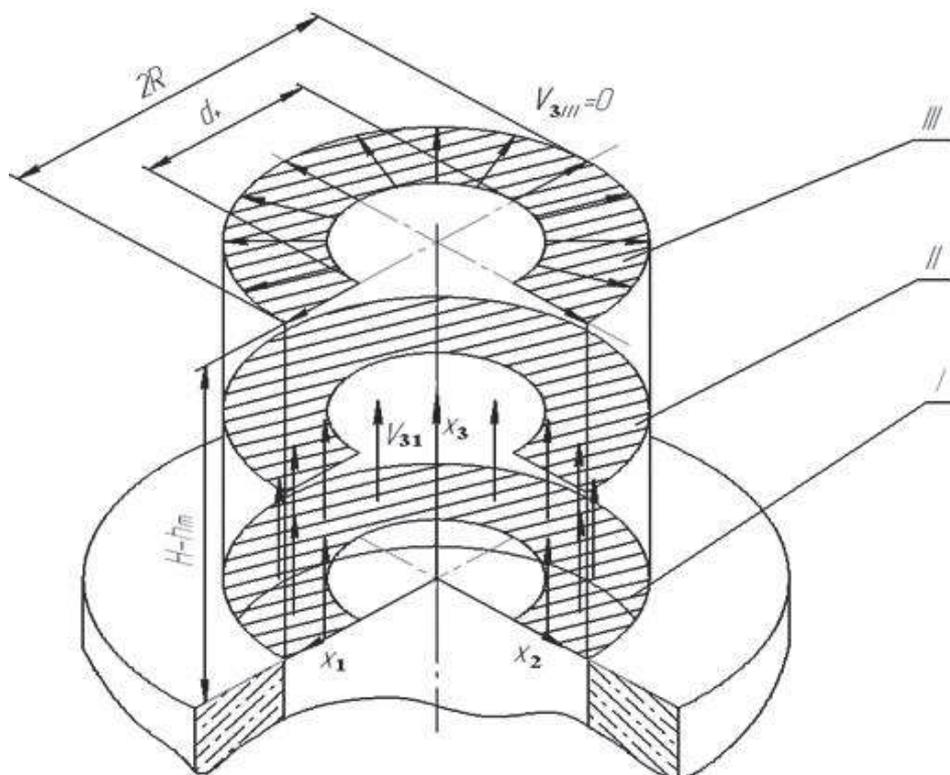


Рисунок 2. Расчетная схема металлоприёмника

Второе условие работоспособности М: скорость $|V_{nc}|$ не должна быть больше допустимой скорости течения металла на границе раздела фаз металл-шлак $[V_{nc}]$ в ПК МНЛЗ.

Создана конструкция М с разгрузочными отверстиями для промежуточного ковша слябовой МНЛЗ (рисунок 3). Компоновка металлоприёмника, относительно перегородки, представлена на рисунке 4.

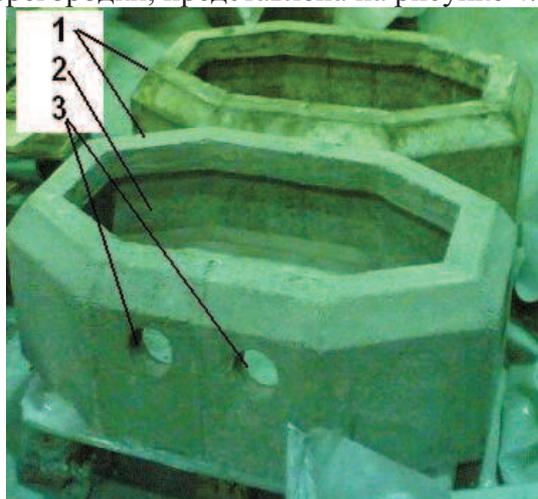


Рисунок 3. Металлоприёмник с пространственно ориентированными отверстиями: 1 - металлоприёмники; 2 – центральное приёмное отверстие; 3 – ряд переливных отверстий

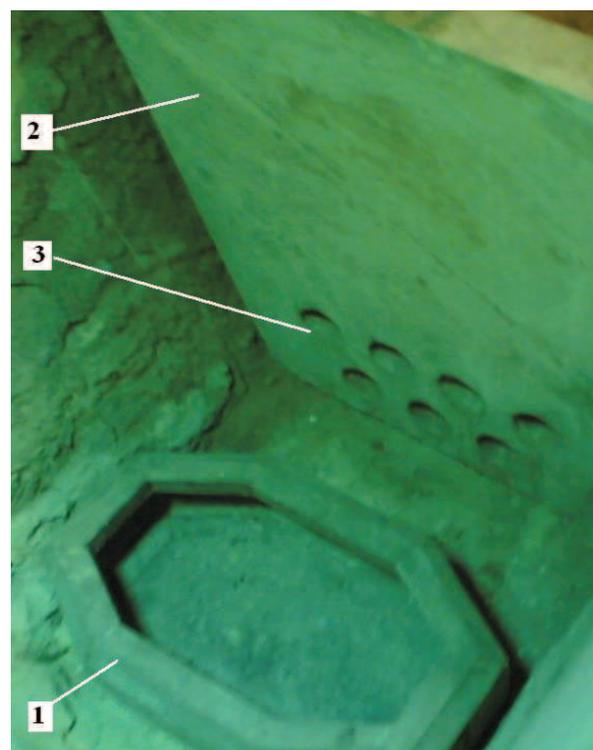


Рисунок 4. Установка М в приёмной камере ковша: 1 - металлоприёмники; 2 – перегородка; 3 – ряд переливных отверстий перегородки

Применение созданных металлоприёмников позволяет уменьшить скорость движения потоков стали на поверхности приёмной камеры, что позволяет снизить

количество неметаллических включений в реакционную камеру промежуточного ковша слябовой МНЛЗ.

Заключение

Разработанная методология выбора и расчета параметров металлоприёмника ПК МНЛЗ, позволяет определить размеры элементов М при создании ПК МНЛЗ, необходимые для выполнения заданной функции – рафинирования стали. В качестве критериев работоспособности были приняты: устойчивость, прочность, отсутствие кавитации и условие, по которому скорость на границе раздела металл-шлак должна быть меньше допустимой. Для обеспечения устойчивости и надежной фиксации М в его конструкции необходимо предусматривать:

1. Элементы, обеспечивающие надежную фиксацию металлоприёмника от смещений (продольного и бокового) относительно дна (бойного места) ПК. При этом должно обеспечиваться отсутствие прослойки металла между дном М и дном ПК.
2. Определенную конфигурацию наружной поверхности торкретмассы, прилегающей к металлоприёмника. Поверхность необходимо выполнять с учетом действия свободных струй металла на боковую поверхность металлоприёмника.
3. Созданы конструкции металлоприёмников для слябовой МНЛЗ.

Библиографический список

1. Точилкин В.В. Модернизация промежуточного ковша МНЛЗ для обеспечения повышения качества разливаемой стали / Ремонт, восстановление, модернизация. 2007. №2. С. 5-7.
2. Вдовин К.Н., Мельничук Е.А., Точилкин В.В. Разработка компоновки и элементов приёмной камеры промежуточного ковша слябовой МНЛЗ // Технология металлов. 2011. №11. С. 39–41.
3. Вдовин К.Н., Семенов М.В., Точилкин В.В. Рафинирование стали в промежуточном ковше МНЛЗ: Монография.

Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 118 с.

4. Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок: монография / К.Н.Вдовин, В.В. Точилкин В.В., И.М. Ячиков. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. 348 с.
5. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Марочкин О.А. Совершенствование процесса разливки стали на сортовых МНЛЗ // Металлург. 2014, № 4. С. 80-82.
6. Точилкин В.В., Филатов А.М. Пневмопривод металлургических манипуляторов: Монография.- Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2005. - 211 с.
7. Разработка элементов приёмной камеры промежуточного ковша слябовой МНЛЗ / К.Н. Вдовин, Е.А. Мельничук, А.В. Нефедов, В.В. Точилкин // Известия вузов. Черная металлургия. 2014, № 3. С. 23-27.
8. Точилкин В.В. Методика расчета металлоприёмника промежуточного ковша МНЛЗ // Ремонт, восстановление и модернизация. 2008, № 6. С. 44–47.
9. Семенов М.В., Точилкин В.В. Методика расчета работоспособности элементов промежуточного ковша МНЛЗ // Вестник машиностроения. 2007, № 6. С. 41–43.
10. Разработка оборудования системы распределения потоков стали для промежуточного ковша / С.Н. Ушаков, А.А. Хоменко, К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин // Сталь. 2009, № 3. С. 13–17.



УДК 621.771.07

Ю.В. Жиркин, Е.А. Пузик
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, РФ,
E-mail: girkin@ya.ru, ekshalimova@mail.ru
Дата поступления 12.04.2015

АЛГОРИТМ ПОДБОРА СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СМАЗЫВАНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ ОПОР РАБОЧИХ ВАЛКОВ КЛЕТЕЙ КВАРТО

Аннотация

На основе проведенных исследований условий эксплуатации подшипников качения опор рабочих и опорных валков клетей кварто ОАО «ММК», авторами статьи предлагается новый подход к выбору вязкости смазочных материалов, применяемых в системе «масло-воздух». Материалы исследований положены в основу алгоритма и программы ЭВМ. Данная программа позволяет осуществить выбор класса вязкости минерального масла для смазывания подшипников качения опор рабочих и опорных валков клетей кварто, учитывая особенности процесса их эксплуатации. Основной целью такого выбора является увеличение ресурса работы подшипников качения, путём создания условий для реализации эластогидродинамического режима смазывания, который характеризуется полным разделением трущихся поверхностей слоем смазочного материала.

Ключевые слова: подшипники качения, рабочие валки, смазочный материал, система «масло-воздух».

Введение

За последние годы на широкополосных станах горячей и холодной прокатки широко используется система смазывания «масло-воздух». Фирмы, поставляющие данные системы, рекомендуют несколько классов вязкости минеральных масел – 100, 220, 320, 460. Предполагается, что конкретный класс вязкости (КВ) будет установлен в процессе эксплуатации.

Выполненные исследования [1-6] показали, что в процессе эксплуатации необходимо не только обеспечить смазывание подшипниковых опор рабочих и опорных валков, но и использовать смазочный материал (СМ) такого КВ, при котором будет достигнут максимальный ресурс подшипников качения. А это во многом определяется поведением СМ непосредственно в зоне контакта тел качения с дорожками качения в подшипнике. На стане – тандем 2000 холодной прокатки (ХП) задача по выбору КВ минерального масла осложняется тем, что конструктивно подача СМ осуществляется во все подшипниковые опоры стана из одного резервуара. В то же

время подшипниковые опоры находятся в различных условиях кинематического и силового нагружения и, соответственно, вязкость СМ на контакте будет различная. Это ведёт к формированию на контакте смазочной плёнки различной толщины, и соответственно, к различному ресурсу подшипников качения (ПК), установленных в той или иной клетке. Поэтому необходим СМ такого класса вязкости, при котором будет обеспечен максимальный ресурс подшипников качения рабочих и опорных валков во всех пяти клетях. Этой цели и служит разработанный алгоритм, который явился основой соответствующей программы для ЭВМ.

Основная часть

В настоящее время для смазывания подшипниковых опор рабочих и опорных валков 1-5 клетей стана 2000 ХП применяются минеральное масло Mobilgear 320 класса вязкости 320.

Данные, полученные с производства, говорят о том, что основной причиной выхода из строя подшипников качения является их перегрев и износ (таблица 1)

Ресурс ПК опор рабочих валков стана 2000 ХП за 2011-2014 гг.

Номер подушки	Маркировка подшипника	Дата установки	Наработка, час.	Причина выхода
1	МВ-15	18.03.11	5438	Перегрев
1	НК-15	16.05.12	2486	Перегрев
1	NY-7	12.02.13	2386	Перегрев
2	КС-30	18.03.11	5450	Перегрев
2	NL-7	28.05.12	5692	Перегрев
5	KF-2	20.03.11	4960	Перегрев
6	NY-5	07.04.12	1347	Перегрев
11	VD-312E	29.12.11	3870	Перегрев
13	KF-14	31.03.11	4960	Перегрев
13	KF-3	14.05.12	2150	Перегрев
13	NY-9	09.01.13	104	Перегрев
17	КС-25	30.03.11	460	Перегрев
21	KG-9	03.04.11	4520	Перегрев
36	КС-4	16.02.12	7120	Износ
50	МВ-11	26.11.11	7304	Износ
13	NY-16	11.06.11	7500	Износ
43	КС-12	24.11.11	7780	Износ
53	KG-6	10.11.12	7960	Износ
54	НК-18	30.12.12	8032	Износ
46	NL-2	05.10.12	8160	Износ
39	КС-18	06.12.11	9680	Износ

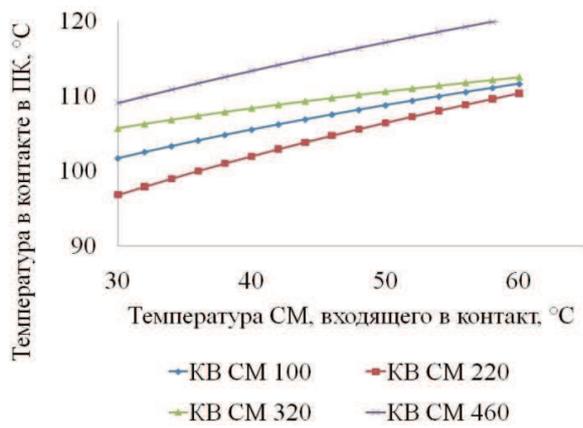
Необходимо было установить, является ли данное минеральное масло оптимальным с точки зрения ресурса подшипников качения опор рабочих и опорных валков.

В результате исследований, выполненных на экспериментальной установке кафедры «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования» было выявлено, что существенное влияние на температуру масла на контакте оказывает температура масла, подаваемого в подшипник качения и скорость качения на контакте [2]. Исследования проводились с использованием минеральных масел марки ИР 100 КВ 100, марки ТНК 522 КВ 220, марки Mobilgear 320 КВ 320, марки 460ПВ КВ 460 при суммарных скоростях качения в контакте 2,9 м/с и 7,92 м/с. Экспериментальные данные были аппроксимированы зависимостями, отражающими влияние температуры минерально-

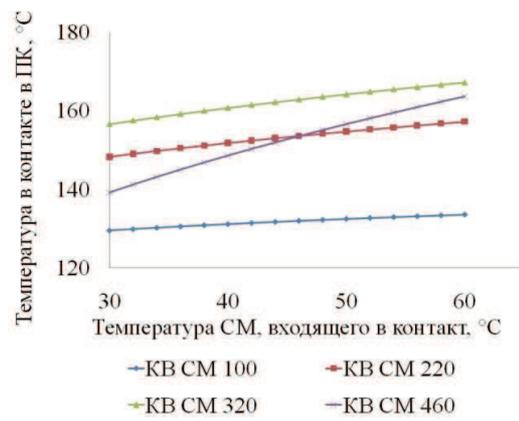
го масла, подаваемого в ПК на температуру минерального масла непосредственно в контакте тел качения с дорожками качения внутреннего и наружного колец (рисунок 1). Это позволило установить изменение величины коэффициента толщины масляной плёнки – λ в зависимости от температуры минерального масла, подаваемого в ПК (рисунок 2).

Параметр λ служит критерием для оценки долговечности подшипниковых опор. При $\lambda > 1$ фактическая долговечность ПК превышает расчётную. При $\lambda > 3$ реализуется режим ЭГД-смазки. Создание этого режима позволит в несколько раз повысить расчётную долговечность [7].

Учёт полученных зависимостей интенсивности разогрева минерального масла (рисунок 3), позволяет принимать меры по предотвращению перегрева ПК в подшипниковых опорах валков.

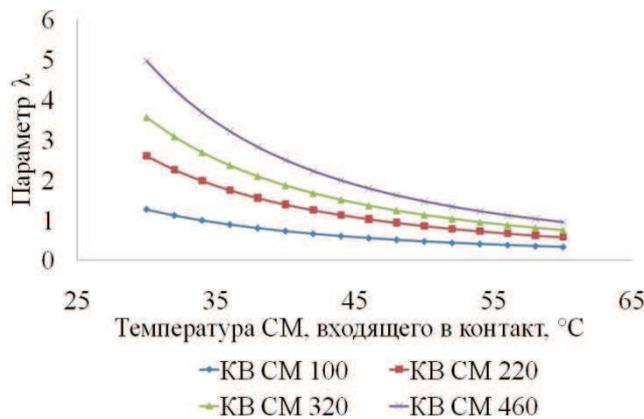


а)

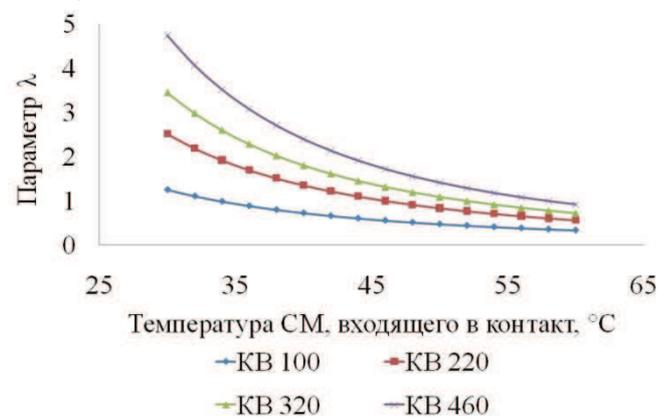


б)

Рисунок 1. Изменение температуры на контакте в ПК для четырёх классов вязкости смазочного материал а) суммарная скорость качения в контакте 2,9м/с, б) суммарная скорость качения в контакте 7,92 м/с.

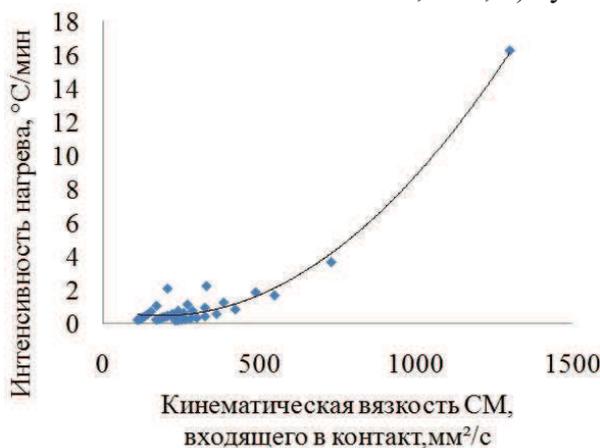


а)

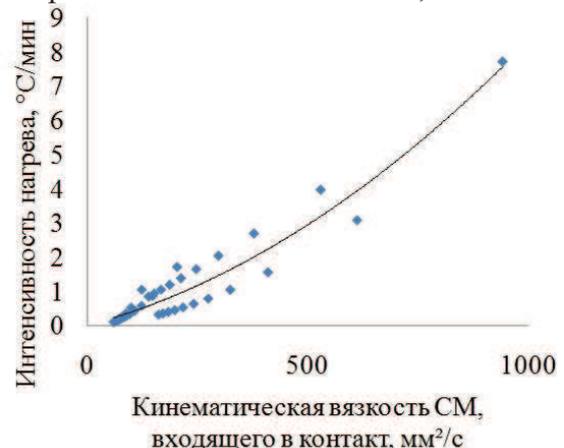


б)

Рисунок 2. Зависимость параметра λ от температуры смазочного материала, поступающего в зону контакта для четырёх классов вязкости смазочного материала а) суммарная скорость качения в контакте 2,9м/с, б) суммарная скорость качения в контакте 7,92 м/с



а)



б)

Рисунок 3. Интенсивность роста температуры в зависимости от KV SM а) суммарная скорость качения в контакте 2,9м/с, б) суммарная скорость качения в контакте 7,92 м/с

Высокая интенсивность роста температуры ведёт к тепловому разогреву под-

шипникового узла до температур, превышающих допустимые значения.

Вопрос компенсации теплового разогрева ПК решается в работе [8] при рассмотрении теплового состояния подшипниковых опор рабочих валков клетей кварто.

Представленные зависимости позволяют выполнить расчёты по выбору класса вязкости минерального масла для конкретных условий эксплуатации подшипниковых опор валков клетей кварто в соответствии с предлагаемым алгоритмом:

1. рассчитывается ресурс ПК с учётом действия на него фактической нагрузки:

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^{10/3} \quad (1)$$

где C_r - базовая динамическая радиальная расчётная грузоподъёмность, Н; P_r - эквивалентная динамическая радиальная нагрузка на подшипник, Н.

Величина C_r для роликовых радиальных и радиально-упорных подшипников рассчитывается по формуле:

$$C_r = b_m f_c (iL_{we} \cos a)^{7/9} tgaZ^{3/4} D_{we}^{29/27} \quad (2)$$

где b_m - коэффициент, характеризующий свойства стали с учётом способа её изготовления, значения которого меняется в зависимости от типа и конструкции подшипника, f_c - коэффициент, зависящий от геометрии деталей подшипника, точности их изготовления и материала, L_{we} - длина ролика для вычисления расчётной грузоподъёмности, мм; a - номинальный угол контакта подшипника; Z - число роликов в однорядном подшипнике, число тел качения в одном ряду многорядного подшипника при равном их количестве в каждом ряду; i - число рядов роликов в подшипнике; D_{we} - диаметр ролика, мм. [8];

2. принимается значение коэффициента толщины масляной плёнки режима ЭГД-смазки в пределах 1 до 3 и соответственно, по графику на рисунке 4, находится параметр $A = f(\lambda)$ [9]. Обеспечить максимальный ресурс ПК возможно созданием в них режима ЭГД-смазки;

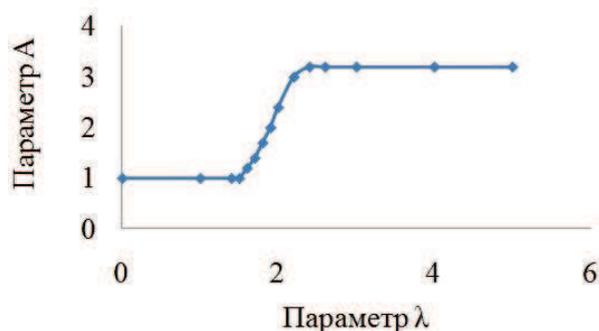


Рисунок 4. Влияние параметра λ на долговечность подшипников качения

3. рассчитывается ресурс с учётом установленного режима трения [9]:

$$L = L_{10} \times A \quad (3)$$

4. определяется необходимая температура смазочного материала, поступающего на контакт, обеспечивающая реализацию заданного режима смазки;
5. осуществляется выбор необходимого класса вязкости, при котором обеспечивается заданный режим смазки

Используя данный алгоритм, была разработана программа для ЭВМ [10], результаты расчётов по которой приведены на рисунке 5-7.

На рисунке 5 приведены результаты расчётов ресурса работы ПК рабочих валков 1-5 клетки стана 2000 ХП ОАО «ММК». Как видно из рисунка, применение СМ КВ 320 (используется на данные момент) приводит к уменьшению ресурса ПК по сравнению с расчётным. Это происходит в результате повышенных температур на контакте тел качения с дорожками качения внутреннего и наружного колец ПК, что приводит к интенсивному разогреву ПК и уменьшению ресурса его работы.

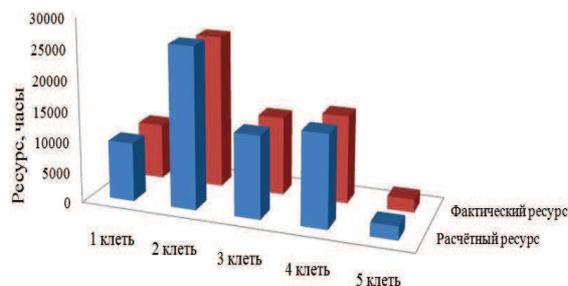


Рисунок 5. Расчётный и фактический ресурс ПК и ресурс при смазывании ПК СМ КВ 320

На рисунках 6-7 приведены диаграммы расчётного ресурса и ресурса ПК при реализации режима ЭГД смазывания.

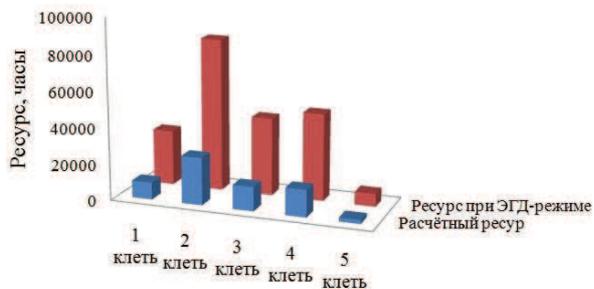


Рисунок 6. Расчётный ресурс и ресурс при реализации ЭГД режима трения для ПК рабочих валков стана 2000ХП

Как видно из рисунков 6-7, реализация ЭГД-режима трения позволит значительно увеличить ресурс работы ПК рабочих и опорных валков стана 2000ХП.

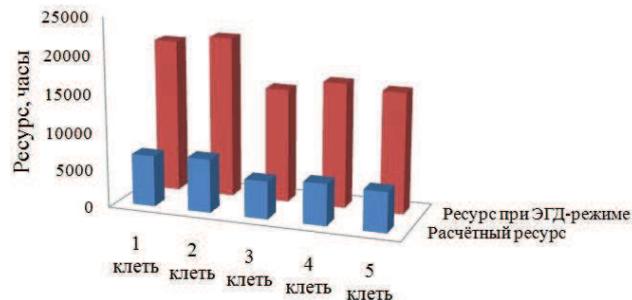


Рисунок 7. Расчётный ресурс и ресурс при реализации ЭГД режима трения для ПК опорных валков стана 2000ХП

С помощью программы по подбору СМ [10], возможно определить какие СМ и при каких параметрах приводят к формированию заданного режим трения.

Параметры СМ для четырёх классов вязкости 100, 220, 320, 460, необходимые для реализации заданного режима трения и полученные посредством программы [10] для удобства приведены в таблице 2

Таблица 2

Параметры СМ, необходимые для создания ЭГД-режима смазывания в ПК подшипниковых опор стана 2000 ХП

Параметры СМ		Подшипники качения	
Параметра	Класс вязкости СМ	Опоры рабочих валков	Опоры опорных валков
Температура подаваемого СМ, °С	100	-	-
	220	не выше 20	не выше 20
	320	не выше 32	не выше 31
	460	не выше 40	не выше 39
Температура на контакте, °С	100	-	-
	220	105-178	102-160
	320	-	-
	460	-	145-177,1
Интенсивность разогрева, °С/мин	100	-	-
	220	9-21,7	10-37,3
	320	-	-
	460	-	6,2-40,6

Таким образом, при исследовании возможности применения минеральных масел различных КВ для смазывания подшипниковых опор рабочих и опорных валков стана 2000 ХП ОАО «ММК» с целью повышения их ресурса можно сделать следующие выводы:

1 реализацию режима ЭГД-смазывания на контакте при смазывании подшипников качения подшипниковых

опор рабочих валков 1-5 клеток стана 2000ХП ОАО «ММК» обеспечивают смазочные материалы класса вязкости 220.

2 реализацию режима ЭГД-смазывания на контакте при смазывании подшипников качения подшипниковых опор опорных валков 1-5 клеток стана 2000ХП ОАО «ММК» обеспечивают смазочные материалы класса

вязкости 220 и 460. Интенсивность разогрева подшипника при смазывании СМ КВ 220 превышает интенсивность разогрева при смазывании СМ КВ 460. Применение СМ КВ 220 является наиболее при обеспечении интенсивное охлаждение подшипникового узла.

Поскольку все подшипниковые опоры стана 2000ХП смазываются одним смазочным материалов, то обобщая выданные рекомендации по смазыванию ПК опор рабочих и опорных валков, можно сделать вывод о том, что наиболее целесообразным для смазывания является СМ КВ 220.

Заключение

Данная методика позволяет определить параметры смазочного материала, такие как класс вязкости, температуру и интенсивность разогрева, необходимые для создания заданного режима трения. В результате анализа полученных параметров становится возможным рациональный выбор СМ, позволяющий в несколько раз повысить ресурс работы подшипников качения.

Данная методика расчёта рекомендуется к использованию в прокатных цехах металлургических предприятий по подбору смазочных материалов для подшипниковых опор клетей кварто, смазываемых системой «масло-воздух».

Библиографический список

1. Жиркин Ю.В., Пузик Е.А. Аналитически-экспериментальное определение параметров ЭГД-смазки в подшипниках качения опор рабочих валков стана 2000 горячей прокатки. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова, 2010. № 4, с. 52-56.
2. Жиркин Ю.В., Дудоров Е.А. Повышение ресурса подшипниковых узлов рабочих валков стана 2000 г.п. ОАО «ММК». // Чёрные металлы, 2012. № 11, С.19-23.
3. Платов С.И., Терентьев Д.В., Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Мезин И.Ю. Исследование и разработка режимов смазывания подшипниковых узлов рабочих валков стана 2000

горячей прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова, 2012. №2. С88-100.

4. Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Дудоров Е.А. Физическое моделирование режима смазки подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станов. // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. 2007 №4. С 54-56.
5. Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Дудоров Е.А. Работоспособность подшипников качения рабочих валков чистой группы клетей стана горячей прокатки при их смазывании системой «масло – воздух» // Тяжёлое машиностроение. 2007 №2. С.19-20.
6. Жиркин Ю.В., Дудоров Е.А., Паршин П.Р. Модернизация подшипникового узла с целью продления его ресурса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И.Носова, 2007 №4. С 94-96
7. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т.2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под общ.ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990.-416с.: ил.
8. Жиркин Ю.В., Султанов Н.Л., Мироненков Е.И. Управление тепловым состоянием подшипниковых опор, смазываемых системой «масло-воздух» на стане-тандем 2000 холодной прокатки ОАО «ММК»// Сталь, № 4. ,2014, С 71-73
9. ГОСТ 19855-94 (ИСО 281-89) Подшипники качения. Динамическая грузоподъёмность и расчётный ресурс (долговечность). М.: Стандартинформ, 2009,20с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014613371 Автоматизированный расчёт температуры смазочного материала, поступающего в подшипниковые опоры рабочих валков клетей кварто / Е.А. Пузик, Ю.В. Жиркин // БПБТ 2014 г. №4



ОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ - КРИСТАЛЛИЗАТОР СОРТОВЫХ МНЛЗ

Аннотация

Рассмотрены технологии управления потоками металла в системе промежуточный ковш (ПК) - кристаллизатор сортовых МНЛЗ. Разработаны конструкции элементов ПК и кристаллизатора сортовой МНЛЗ, которые обеспечивают рациональное прохождение разливаемого металла в системе ПК-кристаллизатор, что создает условия для эффективного отделения неметаллических включений и обеспечивает повышение качества разливаемой углеродистой и низколегированной стали.

Ключевые слова: МНЛЗ, кристаллизатор, промежуточный ковш.

Введение

Промежуточный ковш и его устройства, формирующие потоки течения металла в ковше и истечения и кристаллизатор - важнейшие технологические элементы МНЛЗ. При разливке стали, они в значительной степени определяют стабильность процесса, оказывая большое влияние на повышение качества разливаемого металла. Важным показателем, определяющим качество непрерывно-литой заготовки, является содержание неметаллических включений (НВ) в стали [1].

Основная часть

Существует ряд способов, позволяющих повысить чистоту металла по НВ. Одним из них - рафинирование стали в ПК [1]. Для этого современные ПК снабжаются оборудованием для регулирования потоков металла. В настоящее время в электросталеплавильном цехе (ЭСЦ) ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) функционируют две сортовые пятиручьевые МНЛЗ. Постоянно растущие требования к качеству стали получаемой при разливке на сортовых МНЛЗ приводит к необходимости разработки специальных мероприятий, технологических схем и механизмов. Особое внимание при этом уделяется конструкциям, обеспечивающим хорошую организацию струи

жидкого металла на участке «промежуточный ковш – кристаллизатор»

Основным элементом, обеспечивающим дозирование истечения стали из промежуточного ковша (ПК) в кристаллизатор на сортовых МНЛЗ, является комплект стаканов-дозаторов с сопутствующим оборудованием, который устанавливается в днище ПК [2, 3].

К стаканам-дозаторам предъявляются следующие требования:

- равномерная подача металла в кристаллизатор в течение всего процесса разливки;
- формирование компактной струи без брызг металла;
- исключение дефекта разливки типа «веер».

При разливке открытой струей для сохранения постоянного расхода металла стремятся поддерживать постоянное ферростатическое давление металла в ПК при условии, что внутренний диаметр стакан-дозатора не изменяется. Это относится, главным образом, к разливке на сортовых МНЛЗ.

Характерной особенностью разливки стали открытой струей через стакан-дозатор является малое сечение его внутренней полости, составляющее обычно 10... 18 мм в зависимости от скорости разливки и сечения заготовки. Стабильность

разливки в течение всего цикла работы ПК достигается только при сохранении постоянного сечения стаканов-дозаторов. Внутренняя вставка такого стакана-дозатора выполняется из дорогостоящего диоксида циркония. Следовательно, вопрос выбора конструкции комплектов оборудования и материала стаканов-дозаторов для ПК при разливке на сортовых МНЛЗ длинными сериями представляется важным и актуальным.

В статье рассматриваются варианты конструкций комплектов стаканов-дозаторов с сопутствующим оборудованием устанавливаемые в разливочных камерах ПК [3, 4]. Акцентируется внимание на зависимости качества стали, поступающей

в кристаллизатор, от конструкций комплектов стаканов-дозаторов с сопутствующим оборудованием в ПК.

На рисунке 1 отмечен ПК, оснащенный комплектом стаканов – дозаторов с дополнительным оборудованием.

Компоновка стаканов-дозаторов в разливочном отверстии ПК представлена на рисунке 2.

ПК для непрерывной разливки металла, содержит корпус 1 (рисунок 1, 2) с огнеупорной футеровкой 2. В днище 3 корпуса 1 выполнены разливочные отверстия 4, каждое из которых снабжено шиберным затвором 5 (рисунок 2) с верхним 6 и нижним 7 стаканами – дозаторами и гнездовым блоком 8 с отверстием 9.

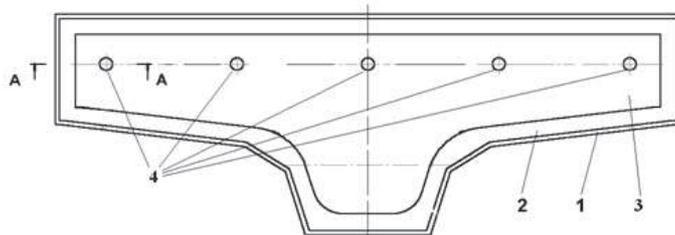


Рисунок 1. Компоновка промежуточного ковша

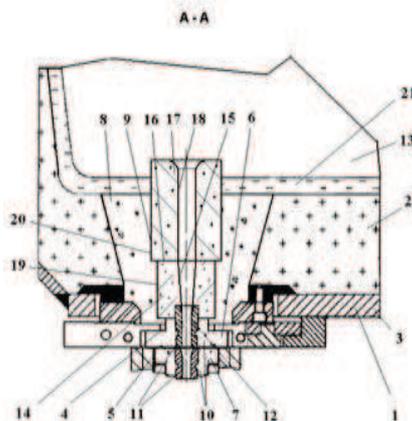


Рисунок 2. Компоновка стаканов-дозаторов в разливочном отверстии ПК

Каждый из стаканов – дозаторов 6 и 7 выполнен в виде опорного блока 10 и вставки 11 с конусообразной полостью 12. На торце каждого опорного блока 10, верхнего стакана-дозатора 6, направленного в полость 13 корпуса 1 ковша, закреплён направляющий элемент 14, с внутренней полостью 15, сопрягаемой с конусообразной полостью 12 вставки 11 стакана – дозатора 6. Направляющий элемент 14 охватывает наружную поверхность вставки 11 верхнего стакана – дозатора 6. На торце 16 направляющего элемента 14, направленного в полость 13 ковша, уста-

новлен цилиндрический блок 17 с полостью 18 сопрягаемой с полостью 15 направляющего элемента 14. Наружная поверхность 19 направляющего элемента 14 и наружная поверхность 20 цилиндрического блока 17 охватывается гнездовым блоком 8. На внутреннюю поверхность ковша нанесен слой огнеупорной футеровки - торкретмассы 21.

Работает ПК для непрерывной разливки металла следующим образом. Предварительно готовят комплекты стаканов – дозаторов 6 (рисунок 2) и направляющих элементов 14. На торце каждого опорного

блока 10, верхнего стакана-дозатора 6, устанавливаются посредством приспособления (на рисунке 1 не показано) направляющий элемент 14, с внутренней полостью 15, сопрягаемой с конусообразной полостью 12 вставки 11 стакана – дозатора 6.

При этом форма выполнения сопрягаемых поверхностей и соответствие геометрических размеров конструктивных элементов позволяет не только обеспечить надежную фиксацию направляющего элемента 14 относительно вставки 11 в стаканах-дозаторах 6, но и осуществить осевую центровку их полостей. На торце 16 направляющего элемента 14, направленного в полость 13 ковша, устанавливается посредством оправки цилиндрический блок 17 с полостью 18 сопрягаемой с полостью 15 направляющего элемента 14. Наружная поверхность 19 направляющего элемента 14 и наружная поверхность 20 цилиндрического блока 17 закрепляется гнездовым блоком 8. После установки гнездового блока 8 на внутреннюю поверхность корпуса 1 ковша наносят слой огнеупорной футеровки - торкретмассы 21, которой дополнительно фиксируют цилиндрический блок 17, при этом верхний торец цилиндрического блока 17 направленного в полость 13 корпуса 1 ковша, выступает над поверхностью огнеупорной футеровки.

После окончательной подготовки в ПК подают жидкий металл. Струи металла равномерно распределяются по объему ковша и при открытых шиберных затворах 5 через полость цилиндрического блока 17, полость направляющего элемента 14 и конусообразную полость 12 вставки 11 стакана – дозатора 6 поступают в кристаллизатор установки непрерывной разливки металла (на рис. не показан).

В раздаточной камере протекают два вида гидродинамических процессов [5, 6]. Первый – движение стали из приемной камеры через переливные каналы перегородок. Второй – истечение стали из разливочного отверстия, сопровождаемое вращательным движением в разливочных камерах.

Рассматривая движение стали в разливочной камере ПК, как установившееся безвихревое вращение несжимаемой жид-

кости в цилиндрических координатах r, θ, z с осью z вдоль вектора угловой скорости вращения жидкости (рисунок 3), проходящей через центр сталеразливочного отверстия. Можно отметить, что полный напор по всему полю течения [3]:

$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{v_{\theta}^2}{2g} = const, \quad (1)$$

Дифференцируя это выражение по r , получаем:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho v_{\theta} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial r}. \quad (2)$$

Рассматривая уравнения Навье-Стокса [6, 7] для отмеченного случая движения жидкости, можно отметить, что компоненты скорости v_r и v_z равны нулю, градиент давления в окружном направлении отсутствует, а v_{θ} не зависит от z :

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{v_{\theta}^2}{r}. \quad (3)$$

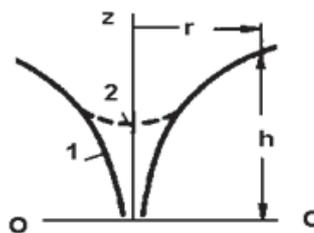


Рисунок 3. Схема вращательного движения жидкого металла в разливочном отверстии: 1 – свободная поверхность при безвихревом вращательном движении; 2 – свободная поверхность при перекрытии разливочного отверстия; О-О плоскость сравнения.

Из уравнений (2) и (3) получаем зависимость:

$$v_{\theta} \cdot r = const. \quad (4)$$

При этом тангенциальная скорость растет с уменьшением r , но практически основная область ограничена радиусом r_m , на котором давление становится равным давлению окружающей среды.

Положение свободной поверхности при безвихревом вращательном движении в разливочной камере будет определяться гиперолоидом вращения:

$$h = h_0 - v_{\theta}^2 / 2g, \quad (5)$$

где h_0 – максимальная высота уровня жидкости в разливочной камере ПК.

При перекрытии отверстия в днище ПК движение жидкости постепенно зату-

хает под действием вязкости (см. кривую 2, рисунок 3). На характер кривой оказывает влияние также нахождение на поверхности покровного шлака.

Анализируя уравнения (4) и (5), можно отметить, что в конструкциях комплектов стаканов-дозаторов с сопутствующим оборудованием устанавливаемые в разливочных камерах ПК определяющую роль имеют:

- конструкция направляющего элемента 14 и его фиксация относительно корпуса верхнего стакана – дозатора;
- конфигурация внутренней полости 15 направляющего элемента 14 и её сохранность в течение всего цикла разливки металла из ПК;
- высота цилиндрического блока 17 с полостью 18 относительно поверхности зеркала разливаемого металла [8].

Надежная фиксация направляющих элементов 14 относительно вставок стаканов - дозаторов, а также осевая центровка их полостей с полостью цилиндрического блока обеспечивает в процессе разливки формирование струй металла технологически заданной конфигурации без нарушения её сплошности, исключая при этом, боковые смещения струй металла в сторону гнездового блока 8, что позволяет повысить качество разливаемого металла за счёт исключения попадания в него частиц футеровки гнездового блока и огнеупорной футеровки [9]. При этом создаются условия для исключения нарушения сплошности струи металла, что обеспечивает стабильную, безаварийную работу ПК и всей МНЛЗ в процессе всего цикла разливки [2, 10].

Заключение

При совершенствовании процессов непрерывной разливки стали нового поколения в конструкции более совершенного оборудования МНЛЗ актуальным является разработка и использование конструкций комплектов стаканов-дозаторов с сопутствующим оборудованием, позволяющих наряду с повышением их стойкости, эффективно гасить возникающие над разливочными стаканами воронки, что обеспечит повышение качества разливаемого металла благодаря хорошей организации

струи. При этом возрастает качество стали при разливке длинными сериями за счет минимизации процессов вторичного окисления на участке «ПК-кристаллизатор».

Библиографический список

1. Вдовин К.Н., Семенов М.В., Точилкин В.В. Рафинирование стали в промежуточном ковше МНЛЗ: Монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 118 с.
2. Разработка оборудования системы распределения потоков стали для промежуточного ковша / С.Н. Ушаков, А.А. Хоменко, К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин // Сталь. 2009, № 3. С. 13–17.
3. Патент РФ 76836 Промежуточный ковш для непрерывной разливки металла МКИ В22D 41/00.
4. Точилкин В.В. Модернизация промежуточного ковша МНЛЗ для обеспечения повышения качества разливаемой стали / Ремонт, восстановление, модернизация. 2007. №2. С. 5-7.
5. Дейли Д., Харлеман Д. Механика жидкости. – М.: Энергия, 1971. – 480 с.
6. Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок: Монография / К.Н.Вдовин, В.В. Точилкин В.В., И.М. Ячиков. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. 348 с.
7. Точилкин В.В., Филатов А.М. Пневмопривод металлургических манипуляторов: Монография.- Магнитогорск: МГТУ, 2005. - 211 с.
8. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Марочкин О.А. Совершенствование процесса разливки стали на сортовых МНЛЗ // Металлург. 2014, № 4. С. 80-82.
9. Точилкин В.В. Методика расчета металлоприёмника промежуточного ковша МНЛЗ // Ремонт, восстановление и модернизация. 2008, № 6. С. 44–47.
10. Семенов М.В., Точилкин В.В. Методика расчета работоспособности элементов промежуточного ковша МНЛЗ // Вестник машиностроения. 2007, № 6. С. 41–43.

