



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 12.12.2016. Заказ 635.
Тираж 300 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

З.С. Гельманова, М.К. Ибатов, К.А. Ногаев Значение работы ремонтных подразделений для функционирования промышленного предприятия.....	3
Л.С. Белевский, И.В. Белевская, О.С. Коптелова Проектирование крупногабаритных составных изделий металлургического оборудования ..	11
Э.И. Фахретдинова, Р.Ф. Галлямова, Г.И. Рааб Исследование деформационных параметров и особенностей микроструктуры алюминиевого сплава при реализации процесса Мульти-РКУП-Конформ.....	18
А.А. Герасимова, А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов Металлографические и фазовые исследования газотермических покрытий на меди для кристаллизаторов МНЛЗ	23
А.В. Анцупов, А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский Кинетическая теория прогнозирования долговечности подшипников качения.....	29
А.В. Выдрин, В.И. Кузнецов, К.Ю. Яковлева Интенсификация процесса волочения за счет расширения диапазона применимости смазочного материала.....	34
А.В. Алифанов, А.М. Милюкова, В.В. Цуран, Н.В. Бурносков Рекомендации по эффективному использованию легированных сталей для производства дереворежущего инструмента	41
Н.В. Телин, А.А. Збродов, А.С. Фомин Диагностика температурных условий службы полых роликов машин непрерывного литья заготовок	46
В.С. Славин, Е.А. Пузик, Е.К. Чумичев Влияние карбонитрирования на характер взаимодействия поверхностей трения зубьев в зубчатых передачах.....	52
Е.А. Максимов, Е.П. Устиновский Дооснащение роликовой правильной машины с целью повышения качества листового проката	58



УДК 621.771

З.С. Гельманова, М.К. Ибатов, К.А. Ногаев
Карагандинский государственный
индустриальный университет
г. Темиртау, Республика Казахстан
E-mail: zoyakgiu@mail.ru
Дата поступления 20.04.2016

ЗНАЧЕНИЕ РАБОТЫ РЕМОНТНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Аннотация

В статье рассматривается взаимодействие вспомогательного производства в структуре непрофильных подразделений предприятия. Выделены специфические признаки вспомогательного производства промышленного предприятия. Рассмотрен опыт преуспевающих компаний, которые в своей деятельности используют комплексный подход к организации работы по ремонту, основанный на развитии технических навыков персонала, формировании работниками правильного отношения к труду и применении эффективных методов управления. Предложена схема поэтапного повышения эффективности, проводимые на предприятии ремонты.

Ключевые слова: вспомогательное производство, специфические признаки, комплексный подход, сферы деятельности.

Управление процессами реорганизации, реструктуризации, реконструкции и модернизации оборудования, проводимыми на уровне предприятия, приобретает все большее значение. В практике реструктуризации промышленных предприятий уже не новы такие инструменты, как выделение отдельных подразделений в качестве независимых производственных единиц и передача им функций самостоятельного управления, слияние с другими предприятиями, ликвидация и передача функций внешнему подрядчику.

Важную роль в стабильной работе предприятия играет хорошо развитая сфера вспомогательного производства. Вспомогательное производство является составной и важнейшей частью системы обслуживания производственного процесса в целом (рисунок 1).

Обслуживание производства включает функции по обеспечению технического состояния (готовности) средств производства, движения предметов труда в процессе производства (изготовления продукции) и достижения эффективного труда (социально-бытовое обслуживание). Для технического обслуживания основного

производства предприятия могут иметь целый комплекс вспомогательных структур: ремонтное, энергетическое, транспортное, снабженческо-складское. Для обеспечения высокой производительности труда предприятие располагает службами обеспечения производства и социальной сферы: детские сады, жилищно-коммунальные хозяйства, поликлиники, базы отдыха и другие.

Состав и масштабы этих хозяйств определяются особенностями основного производства, типом и размерами предприятия, и его производственными связями. Все подразделения непрофильных производств можно разделить на две группы: производственного и непромышленного значения. Последняя группа, в свою очередь, состоит из подразделений, предназначенных для обеспечения производства и социальной сферы.

Службы и подразделения вспомогательного производства производственного назначения необходимы для обеспечения непрерывности технологического процесса основного производства. От эффективности работы этих подразделений зависят качество и объем производимой продукции, безопасность производства.

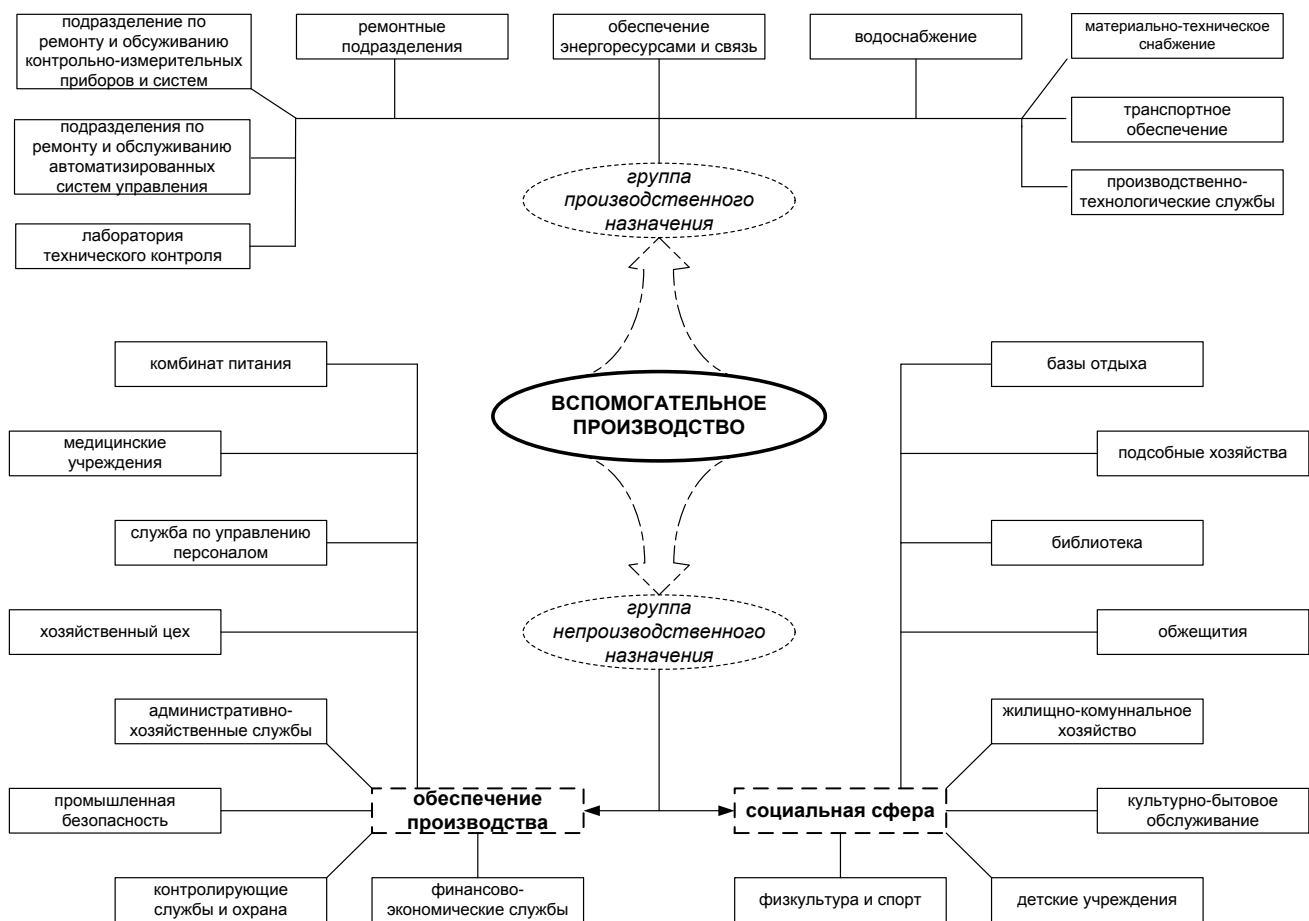


Рисунок 1. Взаимодействие вспомогательного производства в структуре непрофильных подразделений предприятия

Службы и подразделения вспомогательного производства непромышленного значения необходимы для обеспечения производства как с технической, так и социально-экономической стороны. Эти службы и подразделения предприятия в первую очередь ориентированы на труд и на субъект труда – работника. Выполняют функции поддержания работоспособности персонала предприятия (медицинское обслуживание, физкультура и спорт), повышения квалификации (инструктаж и производственное обучение), предупреждения и устранения последствий чрезвычайных ситуаций и несчастных случаев на производстве (техника безопасности и охрана труда), повышения корпоративной культуры (обеспечение информацией и документацией, экономическая безопасность, служба охраны) и социальный рост (культурно-бытовое обслуживание).

В качестве специфических признаков вспомогательного производства промышленного предприятия можно выделить следующие.

Техническая оснащенность объектов вспомогательного производства отлична от технической оснащенности основного производства. Объем основных фондов основного и вспомогательного производств отличается в пользу первого, а потому и сроки оборачиваемости основных фондов вспомогательного производства меньше, чем для основного. Уровень автоматизации и эффективности технологического процесса основного производства гораздо выше, чем вспомогательного.

Технология вспомогательного производства напрямую зависит от технологического процесса основного производства. Поэтому совершенствование технологии вспомогательного производства ограничивается развитием основного производства. Также к технологичности вспомогательного производства как специфическому

признаку, можно отнести его тройственность, то есть технология вспомогательного производства обеспечивает взаимодействие трех видов деятельности:

1. производство изделий, необходимых для обеспечения технологии основного производства;
2. ремонт основных фондов предприятия;
3. обслуживание оборудования основного процесса производства.

Вспомогательное производство не изготавливает продукцию для продажи и служит только лишь для обеспечения непрерывности технологического процесса основного производства.

Вспомогательное производство имеет широкую сферу деятельности. Вспомогательное производство для обеспечения и обслуживания основного производства, повышения качества изготавливаемой продукции, улучшения условий производства и социальной защищенности работников предприятия осуществляет разноплановую деятельность: строительство жилья, ремонт оборудования, обеспечение питанием, медицинское обслуживание, финансовые операции и ряд других [1,2].

Непрерывность технологического процесса основного производства предполагает непрерывность работы вспомогательного производства. Поскольку технология производства предприятий различных отраслей промышленности, как правило, имеет непрерывный характер, то и многие службы и подразделения вспомогательного производства находятся в режиме постоянного функционирования.

В целом вспомогательное производство обеспечивает ритмичность, бесперебойность, безаварийность и стабильность работы промышленного предприятия, а также направлено на повышение экономичности производства – максимальное сокращение длительности производственного цикла с минимальными затратами на выполнение работ по техническому обслуживанию.

В этой связи можно с уверенностью сказать, что совершенствование техобслу-

живания и ремонтов — один из самых действенных способов снижения производственных издержек и повышения производительности в отраслях с непрерывным технологическим циклом. Сокращение количества незапланированных простоев и перевод основной части ремонтов в планово-предупредительный режим увеличивают коэффициент технической готовности, то есть долю времени, когда оборудование полноценно работает, и способствует росту производительности.

Как показывает опыт предприятий стран СНГ, стабилизируя коэффициент технической готовности на разных переделах, можно увеличить производительность всей производственной цепочки на 10—15%.

Передовые компании достигают высоких показателей технической готовности оборудования, одновременного действуя на трех направлениях: развивая технические навыки рабочих, оптимизируя организационную структуру и системы управления эффективностью компании и прививая персоналу хозяйское отношение к оборудованию.

Что мы имеем в виду, говоря о высочайшей надежности или технической готовности оборудования? Способность без ущерба для здоровья сотрудников и окружающей среды производить товары, удовлетворяющие техническим требованиям, и при этом повышать эффективность производства. Надежность оборудования — залог стабильного производства и основной фактор, определяющий величину затрат на техобслуживание и ремонты.

Однако обычно компании с непрерывным технологическим циклом до конца не понимают, что их успех в конкурентной борьбе во многом зависит от надежности оборудования. Но даже из тех, кто осознает серьезность проблемы, лишь единицы добиваются цели. Эти компании комплексно подходят к организации работы, благодаря чему развивают технические навыки своих рабочих, применяют упорядоченные методики управления, воспитывают сознательность у всего персонала — от топ-менеджеров до рабочих цехов (рисунок 2), причем решают эти три задачи взаимосвязано.

- Состояние оборудования и его технические характеристики
- Ремонт и техобслуживание
- Производство нацеленное на надежную работу оборудования



Рисунок 2. Комплексный подход к организации работы по ремонту

Компании, добившиеся высочайшей надежности оборудования, максимально полно используют свои технические ресурсы и выходят на оптимальный уровень производства. Производственные затраты заметно сокращаются, поскольку поломки происходят реже, а производительность труда рабочих растет. Качество продукции также улучшается, ведь стабильное производство исключает частые остановки и перезапуск оборудования, из-за которых и случаются отклонения от стандарта. Более стабильная работа оборудования способствует и решению проблем окружающей среды, связанных с загрязнением атмосферы и сточных вод. Кроме того, на предприятиях повышается безопасность труда, так как совершенствуются планирование, координация и качество ремонтных работ, что позволяет постепенно отказаться от небезопасных и устаревших методов.

По мере того как эти компании достигают мирового уровня надежности оборудования, они становятся более гибкими и поэтому могут лучше организовывать производство, использовать новые возможности, получать большие доходы и укреплять свою репутацию. Например, одна известная сырьевая компания, базирующаяся в Европе, выявила на своих предприятиях скрытые ресурсы производительности, равные

производительности целого завода. А прибыльность глобального нефтехимического концерна выросла после того, как ему удалось наладить поставки товара потребителям со своего самого низкокзатратного предприятия. Особую роль в этом сыграли также надежность его собственной сети трубопроводов и неповоротливость конкурентов. Концерн сумел точно в срок поставлять продукцию клиентам конкурентов, чем подтвердил свою репутацию одного из лучших поставщиков в отрасли.

Однако, несмотря на кажущуюся простоту таких мероприятий, на отечественных производствах прослеживается достаточно мало положительных примеров. Судя по нашему опыту и данным исследований McKinsey, это объясняется несколькими причинами. Например, в своей стратегии технического обслуживания и ремонтов некоторые предприятия полагаются на принцип «чинить, когда ломается». Они отлично умеют «тушить пожары», но даже не стараются устранять дефекты, порожденные глубинными причинами. К примеру, крупный североамериканский целлюлозно-бумажный комбинат заметно сократил продолжительность незапланированных простоев, но так и не попытался уменьшить количество поломок, приводящих к

простоям. Поэтому его издержки на техобслуживание по-прежнему выше, чем у передовых предприятий.

Есть и другая причина: многие компании воспринимают техобслуживание и ремонты как неизбежное зло. Именно это стало одним из факторов снижения производственной эффективности европейского металлургического комбината. Всего за несколько лет его коэффициент эффективности использования оборудования (КЭИО) упал более чем на пять процентных пунктов — со среднеотраслевого уровня до уровня самых отсталых компаний. Падение КЭИО сопровождалось сокращением объемов производства, а техобслуживание велось только к устранению поломок и мелких неисправностей. В итоге образовался порочный круг: из-за снижающейся стабильности производственного процесса удвоилось время незапланированных простоев, что негативно сказывается на доходах, издержках и качестве.

Еще один пример пагубности подобной точки зрения - ситуация с морской платформой глобальной нефтяной компании. Вслед за падением цен на сырую нефть уменьшилась прибыль, и компания значительно урезала затраты на техобслуживание платформы. Уже через год объем планово-профилактических работ сократился, а незапланированных ремонтов — увеличился. Непредвиденные сбои внесли неразбериху в производственные планы, из-за чего срывались поставки нефти по трубопроводам. Через три года уровень надежности оборудования заметно упал, а расходы на ремонтные работы даже превысили первоначальные. Но самый сильный удар по репутации компании как поставщика нанесло несоблюдение графиков поставок.

Как компаниям избежать рисков, добиться высочайшей надежности и повысить свою конкурентоспособность? Здесь все зависит от исходной позиции компаний. Те из них, кому необходимо остановить падение производственной эффективности, зачастую слишком полагаются на быстрые и простые технические улучшения. При этом они лишь незначительно корректируют управленческие процессы и не пытаются

изменить поведенческие установки персонала. Те же компании, которые стремятся достичь лучших результатов и закрепить их, в первую очередь совершенствуют методы управления, прививают людям хозяйское отношение к делу и в то же время продолжают работать над техническими улучшениями.

Вне зависимости от исходной позиции преуспевающие компании используют все три рычага повышения эффективности: развивают технические навыки персонала, применяют более эффективные методы управления, прививают работникам правильное отношение к труду. Такой комплексный подход приносит компаниям максимальную отдачу — они добиваются высочайшей надежности работы оборудования.

Компании-лидеры первым делом добиваются более высокого качества ремонта и техобслуживания. Благодаря этому они, не меняя основных подходов и стратегий, обеспечивают максимально экономное выполнение работ, что, в свою очередь, позволяет им коренным образом реорганизовать всю эту сферу и высвободить необходимые людские и денежные ресурсы для дальнейшего повышения эффективности техобслуживания и ремонтов (рисунок 3). Прежде всего, компании соблюдают несколько правил, которые приведены ниже.

Совершенствуют планирование и составление графиков ремонтов, чтобы нужные люди в нужное время правильно выполняли нужные работы. Специалисты по планированию составляют подробные планы работ, указывая конкретные действия, перечисляя ресурсы и запчасти, необходимые для каждого вида работ.

Затем на основе этих планов специалисты по составлению графиков планово-профилактических работ определяют последовательность их выполнения и согласовывают необходимые ресурсы. Итоги работ еженедельно обсуждаются на специальных встречах, поэтому участники заранее знают, что может понадобиться им в ближайшее время и какие навыки им необходимо освоить для повышения эффективности. По мере повышения качества выполнения работ графики можно составлять не на

два–три дня, а на две–три недели вперед, тем самым способствуя дальнейшему совершенствованию механизма работ. Так, расположенный в Канаде крупный алюминиевый завод составляет график для 95% планово–профилактических работ и добивается его 90–процентного соблюдения. В

компании, кроме того, люди редко работают сверхурочно - на сверхурочную работу уходит всего 2% от общего времени, затраченного на техобслуживание и ремонты.

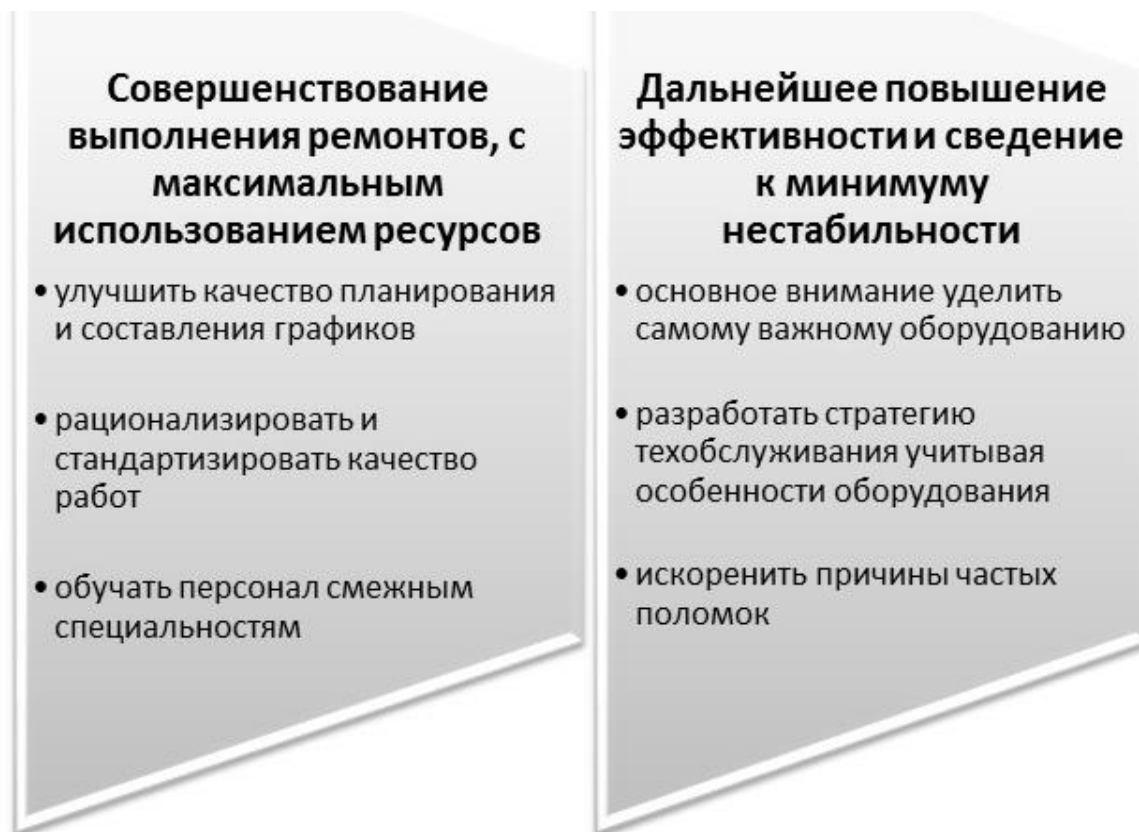


Рисунок 3. Схема поэтапного повышения эффективности, проводимых на предприятии ремонтов

Стандартизируют и постоянно совершенствуют процедуры ремонтов и техобслуживания, систематизируя и документально фиксируя передовой опыт. Компании проводят внутренний аудит работ (например, с помощью видеозаписи), а его результаты обсуждают во время «мозговых штурмов», что помогает довести до высокого уровня выполнение часто повторяющихся операций, таких как техобслуживание насосов (на химических предприятиях) или кранов (на металлургических комбинатах и алюминиевых заводах). Качественное планирование не только совершенствует механизм работ, но и предлагает мощный инструмент для обучения и повышения квалификации персонала. Изменив процесс

выполнения работ и создав новую должность координатора по техобслуживанию, глобальная металлургическая компания сократила время еженедельного техобслуживания на 15% и при этом не снизила уровень надежности оборудования.

Затем компании добиваются дальнейшего повышения эффективности техобслуживания и ремонтов и надежности оборудования.

Учитывают требования надежности на стадии проектирования производства, чтобы оптимизировать эффективность оборудования. Европейский производитель упаковки при проектировании завода учел необходимость обеспечить надежную работу оборудования, специфику ремонтов и

техобслуживания и тщательно проанализировал общую стоимость затрат на ремонтную деятельность (издержки на протяжении всего срока эксплуатации оборудования, включая затраты на ремонт и потери из-за простоев). Это позволило предприятию снизить затраты на обслуживание и ремонты основной производственной линии на 20% по сравнению с предыдущими затратами на аналогичное оборудование.

Разрабатывают стратегию обслуживания и ремонтов, нацеленную на сокращение поломок важнейшего оборудования, безопасность, охрану окружающей среды и снижение издержек. Проводя правильные планово-предупредительные ремонты важнейшего оборудования, компании могут сократить объем внеплановых работ и существенно повысить производственную эффективность. Обычно предприятия уделяют недостаточно внимания обслуживанию важнейшего оборудования, которое, как правило, составляет 10—15% всего парка, но при этом тратят излишне много усилий на обслуживание менее значимой техники.

Правильно выстроенные организационные структуры способствуют большей согласованности действий, повышению эффективности и развитию организационных навыков. Передовые компании также широко применяют упорядоченные методики управления эффективностью, измеряя надежность работы завода по нескольким ключевым показателям и стимулируя сотрудников и подрядчиков к их улучшению [3].

За счет организационной структуры оптимизируют ресурсы и развивают доверительные отношения в коллективе. Например, расположенный в США крупный обогатительный комбинат получил немало выгод, когда объединил ремонтников в один отдел и централизовал процедуры управления и распределения заданий. Небольшое количество ремонтников, работу которых координировали диспетчеры, своевременно устраняли возникающие поломки и обслуживали разные подразделения, удовлетворяя их индивидуальные потребности. В итоге издержки на персонал, занятый

в сфере техобслуживания и ремонтов, сократились на 2 млн. долл. — до 3 млн. долл. в год. Компании также удалось добиться более быстрого реагирования на сообщения о неполадках и сформировать стандартизированный принцип техобслуживания. Более тесно взаимодействуя, ремонтники обменивались друг с другом опытом, быстрее осваивали новые навыки. По мере роста производственной эффективности укреплялось доверие между сотрудниками производственных подразделений и службой ремонтов.

Применяют системы управления эффективностью, чтобы повысить надежность работы оборудования. Успех применения систем управления эффективностью зависит от способности и, конечно, желания сотрудников реализовывать поставленные цели в своей повседневной деятельности. Компании следует согласовать набор ключевых показателей эффективности, чтобы поощрять и вознаграждать за хорошую работу. Например, плавильный цех крупного европейского металлургического комбината определил ключевые показатели эффективности для деятельности в сфере планирования и составления графиков работ, стал тщательно отслеживать их соблюдение, благодаря чему удалось оптимизировать графики техобслуживания и повысить производительность ремонтников. Всего за восемь недель произошли значительные улучшения: если раньше выполнялось 70% предусмотренных работ, то к концу этого срока — уже 90%. Графики работ соблюдались в 85% случаев против прежних 75%. Есть и другие примеры. Так, североамериканский производитель автомобильной стали творчески подошел к составлению контрактов с подрядчиками, обеспечивающими техобслуживание, и ввел дифференцированный принцип оплаты, чтобы увязать цели подрядчиков и приоритеты завода. Подрядчики могут получить 30-процентную надбавку, если они достигают целевых показателей или превосходят их, в противном случае они платят 5-процентный штраф. В результате подрядчики стали быстрее устранять неполадки,

улучшилось качество ремонта и увеличились сроки бесперебойной эксплуатации оборудования [4].

Поощряют профессиональный рост работников, создавая тем самым в компании атмосферу доверия и сотрудничества. Североамериканский алюминиевый завод, нанимая сотрудников, оценивает, соответствуют ли их ценности ценностям компании. Новым сотрудникам предстоит освоить множество навыков, поэтому, придя в организацию, они проведут на тренингах до 900 часов. Чтобы люди внесли максимальный вклад в развитие компании, за время работы на предприятии им дают возможность попробовать себя в разных областях - в производстве, сфере техобслуживания и ремонтов и т.д., что выгодно и сотрудникам, и всей компании.

Немалое значение имеет и воспитание сознательности ремонтных рабочих. Необходимо прививать рабочим хозяйское отношение к оборудованию, но на это нужно время. Более того, компании следует неустанно формировать культуру высочайшей надежности - это достигается обучением, соответствующим поведением руководителей, которые должны служить подчиненным примером для подражания, поддержкой рабочих. Только тогда можно будет говорить о долговременных улучшениях, а барьер, разделяющий производителей и ремонтников, исчезнет сам собой.

Как бы ни различались отдельные методы, в целом передовые компании, воспитывая сознательное отношение персонала к работе, руководствуются общими принципами:

– Ценности важнее технических возможностей. Глобальная металлургическая компания при приеме на работу сотрудников учитывает не столько их профессиональный опыт, сколько мировоззрение, полагая, что отношение людей к работе и их поведенческие установки куда важнее технических навыков. Процесс подбора кадров в компании доведен до совершенства. Здесь оценивается соответствие людей шести ключевым факторам: болеют ли они за свое

дело, ответственны ли они, умеют ли работать в команде, насколько они самостоятельны, общительны, гибки.

– Хозяева оборудования - рабочие. В лучших компаниях рабочие ухаживают за своим оборудованием, чистят и красят станки (иногда даже вешают на них фотографии близких). Ценнее всего тут не снижение издержек, хотя и это немаловажно. Главное, что никто не знает оборудование так, как сами рабочие, поэтому, когда они отвечают за его состояние, то вовремя выявляют и устраняют малейшие неполадки.

– «Производственники» и «ремонтники» - партнеры. В компаниях с неэффективной операционной деятельностью «производственники» и «ремонтники» часто враждуют друг с другом. В компаниях-среднячках их отношения строятся по принципу заказчик — потребитель. В передовых компаниях все иначе: они взаимодействуют как партнеры, что достигается благодаря прозрачным процедурам техобслуживания, общей ответственности за состояние оборудования и грамотным принципам поощрения. Здесь считается, что и те, и другие вносят равнозначный вклад в повышение эффективности. «Одни производят прокат, другие обеспечивают им бесперебойную работу» - так сформулировал суть этих взаимоотношений руководитель одного металлургического завода.

Компании, последовательные в своем стремлении добиться высочайшей надежности работы оборудования, могут значительно повысить свою производственную эффективность, увеличив время бесперебойной работы и обеспечив быстрое устранение неполадок, и сократить затраты на техобслуживание и производство.

Но какой бы ни была исходная позиция компании, для наведения порядка в сфере техобслуживания и ремонтов нужно время - время для осваивания передовых технических навыков, внедрения надежных управленческих методик, формирования «культуры собственников». Это значит, что для существенного повышения эффективности компании из отраслей с непрерывным технологическим циклом должны взять правильный темп для работы над

улучшениями во всех трех взаимосвязанных областях.

Библиографический список

1. Воронин Ю.Н. Методы профилактики и ремонта промышленного оборудования / Ю.Н. Воронин, Н.В. Поздняков – М.: Машиностроение, 2005 – 240 с.
2. Карташова В.Н. Экономика организации: Учебник для средних специальных заведений/ В.Н. Карташова, А.В.

Приходько – М.: Приориздат, 2006 – 160 с.

3. Скляренко В.К. Экономика предприятия: Учебное пособие/ Под редакцией В.К. Скляренко, В.М. Прудников – М.: Инфрам, 2004 – 256 с.
4. Сергеев И.В. Экономика предприятия: Учебное пособие / И.В. Сергеев – М.: Финансы и статистика, 1999 – 304 с.



УДК 621.81

Л.С. Белевский, И.В. Белевская, О.С. Коптелова
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: l.belevskiy@mail.ru
Дата поступления: 12.10.2016

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СОСТАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация

Приведены результаты исследований по повышению несущей способности посадок с натягом, используемых в крупногабаритных составных изделиях металлургического оборудования. Для модификации сопрягаемых поверхностей предложено использовать лазерную обработку с последующим нанесением функционального покрытия гибким инструментом. После обработки лазером на стальной поверхности возникает мартенситная структура с микротвердостью 6500 МПа. Нанесение покрытий позволяет увеличить коэффициент трения и теплопроводность контакта.

Ключевые слова: крупногабаритные составные изделия, валки, лазерная обработка, фрикционное плакирование, гибкий инструмент.

Введение

Крупногабаритные составные изделия (КГСИ) находят достаточно широкое применение в металлургическом и прокатном оборудовании и других областях техники. Это бандажированные прокатные валки, ролики МНЛЗ [1-4], зубчатые колеса приводов и универсальные шпиндели прокатных станов [5, 6], сборные роторы газовых турбин и турбогенераторов, сборные рамные конструкции мощных гидропрессов и металлургических машин [7]. В ряде случаев изготовление КГСИ, их деталей и элементов конструкций в монолитном исполнении вообще невозможно или экономически нецелесообразно. В первую очередь это относится к металлоемким изделиям, таким

как, например, прокатные валки, масса которых на толстолистовых станах достигает 230 т. При износе поверхностного рабочего слоя бочки, толщина которого составляет всего 5-7 % от первоначального диаметра, валки отправляются в скрап. Эти цифры относятся к списанию по естественному износу. Однако немало валков списывается из-за выкрошек, отслоений, сколов и других дефектов. При переплавке валков происходит невозвратная потеря легирующих элементов. Зубчатые колеса после обработки номинального ресурса имеют объемный износ по рабочим поверхностям всего около 0,5 % общей массы.

Одним из методов повторного использования прокатных валков, роликов, центров колес и других цилиндрических изде-

лий, отработавших ресурс по рабочим поверхностям, является бандажирование. При наличии остаточного ресурса по циклам нагружения изделия этот процесс может повторяться несколько раз. Следует отметить, что для большинства составных цилиндрических изделий для крепления бандажа на оси применяется посадка с натягом.

В данной работе кратко рассмотрены основные принципы проектирования КГСИ, собранных по посадке с натягом и приведены результаты исследований по повышению их несущей способности путем модификации сопрягаемых посадочных поверхностей.

Основная часть

Главные достоинства составных прокатных валков, роликов МНЛЗ, зубчатых колес следующие:

– возможность изготавливать бандаж в кованном или литом исполнении из материалов, обладающих высокой износостойкостью, усталостной и контактной прочностью и другими необходимыми функциональными свойствами;

– ось валка или центр колеса могут изготавливаться из достаточно дешевых среднеуглеродистых сталей, способных выдерживать более длительные циклические нагрузки, чем высокоуглеродистые легированные стали;

– посадочная поверхность оси и бандажа перед сборкой может подвергаться дополнительной обработке с целью ее модификации для повышения несущей способности соединения с натягом.

В основу элементарных расчетов бандажированных опорных валков обычно используются формулы Ламе, если для соединения бандажа с осью применяется посадка с натягом. Контактное давление на посадочной поверхности препятствует проворачиванию и сползанию бандажа в осевом направлении. Слишком толстостенные бандажи невозможно изготовить конструктивно из-за ограничения по диаметру шеек и нецелесообразно по экономическим сооб-

ражениям. В тонкостенных бандажах возникают большие напряжения, кроме того, они имеют склонность к раскатыванию. Конструктивно обычно принимают отношение d/D около 0,7 (d – диаметр посадочной поверхности, D – диаметр бочки).

Исследование причин сползания бандажей* показало, что при работе валка возникает специфическое явление взаимного проскальзывания между посадочными поверхностями бандажа и оси, которое объясняется прогибом опорного валка под действием давления металла на валки. При работе валок ведет себя как составной вал при вращении, установленный на двух опорах. При изгибе возникает разность длин волокон посадочных поверхностей оси и бандажа. С каждым оборотом валка происходит периодическое изменение напряжений сдвига от нуля до максимума и наоборот. Величина перемещений края бандажа относительно оси небольшая, порядка десятых долей мм, но из-за большого количества циклов появляются усталостные повреждения от фреттинга, приводящие к ослаблению посадки. В результате по краям бандажа может образоваться кольцевая щель, длина которой постепенно увеличивается по направлению к середине бочки валка. Натяг по длине посадочной поверхности уменьшается, что может привести к сползанию бандажа под действием осевых усилий.

При прогибе валка во время прокатки на посадочной поверхности действуют удельные давления от посадки p , сдвигающие напряжения τ_p и остаточные термические напряжения τ_s . Удельные давления от посадки p создают силы трения τ_f , которые стремятся удержать бандаж от осевого и кругового перемещения относительно оси валка.

Если соблюдается условие $\tau_p < \tau_f$, то скольжение бандажа относительно бочки не произойдет, и валок будет работать без сползания бандажа. В действительности в валках, собранных по посадке с натягом следует учитывать остаточные термические напряжения τ_s , возникающие в результате остывания бандажа. После заведения

* В этом разделе частично использованы материалы отчета К.О. ВНИИМЕТМАШ по бандажированным валкам (рук. К.А. Панин, 1973 г.)

холодной оси в нагретый бандаж происходит медленное охлаждение бандажа совместно с осью. Бандаж при остывании уменьшается в размерах, как по диаметру, так и по длине. Так как длина бочки валка больше диаметра, то абсолютная величина уменьшения размеров бандажа по длине больше, чем по диаметру. Края бандажа остывают быстрее, чем середина. Поэтому бандаж, сначала схватывает ось по краям бочки и продолжает сокращаться вместе с осью. После окончания процесса остывания бандаж находится в растянутом состоянии, ось – в сжатом. С целью снижения термических растягивающих напряжений в бандаже и обеспечения возможности свободного перемещения краев бочки по оси при посадке валка величина натяга по длине посадочной поверхности может выполняться переменной, например, в средней части в центре – $1/1000$, по краям – $0,5/1000$.

На станах горячей и холодной прокатки ОАО «ММК» нашла применение конструкция валка с «обратным конусом» [3, 8, 9] с бандажными из литой заэвтектоидной стали 150ХНМ.

Известны конструкции опорных валков толстолистовых станов с бандажом и осью, состоящей из двух частей [10].

Например, для стана 5000 горячей прокатки итальянской компанией SDF изготовлен составной опорный валок, в котором две конусообразные части оси, сопрягаются с внутренними поверхностями бандажа и стягиваются в осевом направлении винтом (рисунок 1). Опыт эксплуатации валка такой конструкции свидетельствует о его недостаточной надежности. Вскоре после начала эксплуатации произошло самопроизвольное развинчивание резьбового соединения, что привело к внеплановой перевалке, и потребовалась повторная затяжка винта. Валок был вновь завален в клеть и вскоре был списан из-за разрушения бандажа. По этой же причине был списан и второй составной валок этой фирмы.

На стане 5000 усилия, воспринимаемые опорными валками, достигают 10-12 тыс. тонн. При изгибе валка части оси с коническими посадочными поверхностями удерживаются силами трения, возникающими при затяжке и самим винтом. Сопрягаемые конусные поверхности осей бандажных направлены таким образом, что части оси при нагрузке стремятся сместиться относительно друг друга в противоположные стороны, что неизбежно приводит к уменьшению натяга.

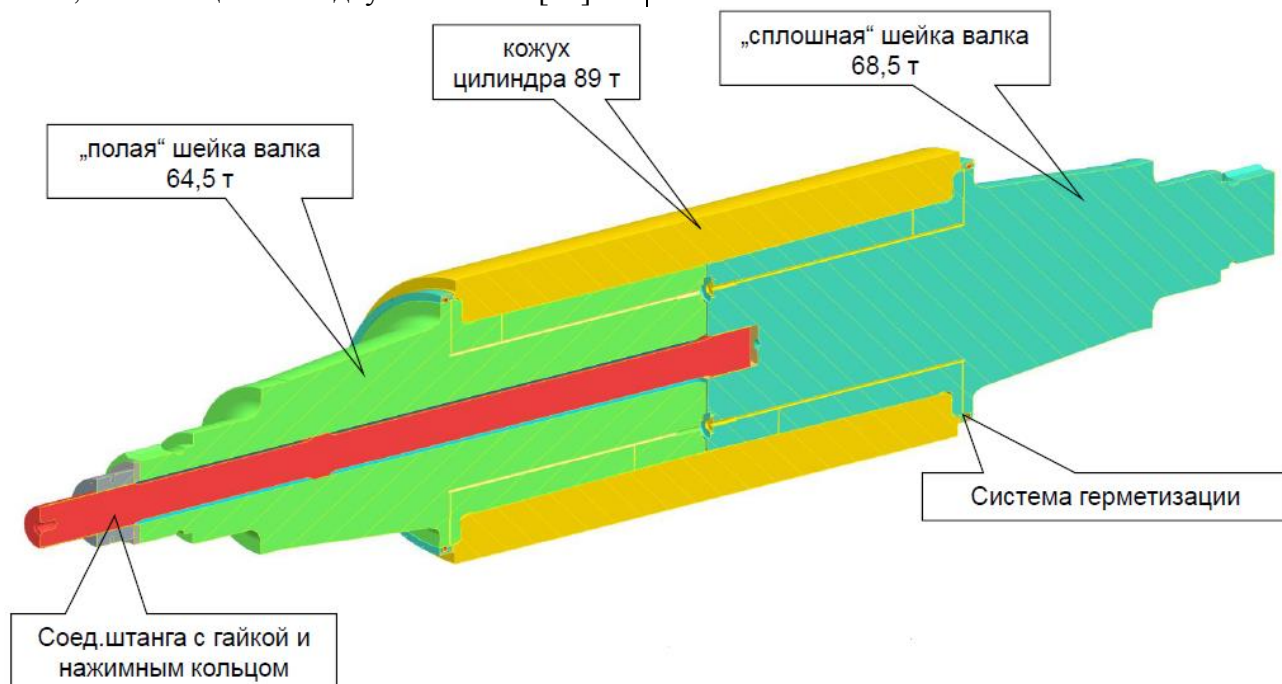


Рисунок 1. Составной опорный валок

Нами разработана конструкция составного валка, в котором в значительной мере удалось избежать перечисленных выше недостатков. На рисунке 2 представлена конструкция модели бандажированного валка с составной осью [11].

Участки оси, сопряженные с бандажом, выполнены эквидистантными в виде двух усеченных конусов, направленных большими основаниями навстречу друг

другу. Направления конусов здесь противоположные, чем у конусов в конструкции валка компании SDF. Перед сборкой бандаж нагревается до температуры 300-400°C и в него заводятся составные части оси. После остывания мы получаем соединение с натягом. Отличительной особенностью этой конструкции является то, что при увеличении усилий изгиба валка величина натяга не уменьшается, а наоборот, увеличивается.

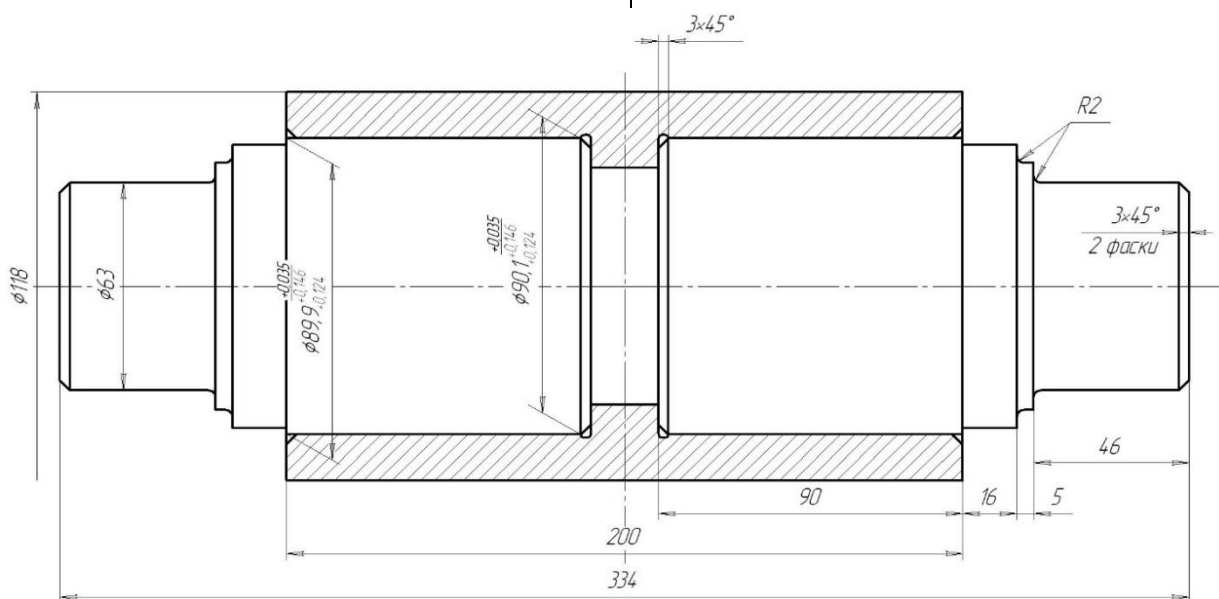


Рисунок 2. Прокатный валок с составной осью

несущую способность (прочность) в окружном и осевом направлении соединений с натягом ориентировочно можно оценить по формулам:

$$T = \pi d^2 l p f_{кр} / 2, \quad (1)$$

$$F_{ос} = \pi d l p \cdot f_{ос}, \quad (2)$$

где p – давление в соединении,

$f_{ос}, f_{кр}$ – коэффициенты трения при осевом сдвиге от силы $F_{ос}$ и кручении от момента T .

В эти формулы входит коэффициент трения и, следовательно, при прочих равных условиях несущая способность соединения определяется величиной коэффициента трения. Как известно, величина f зависит от многих факторов и колеблется в очень широких пределах. По сути дела выбор величины f определяет коэффициент запаса. Увеличение какими-либо путями коэффициента трения позволяет уменьшить натяг и, как следствие, вероятность разрушения бандажа от растягивающих напряжений.

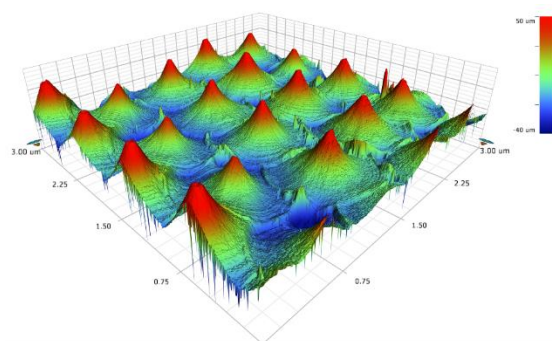
Увеличение сил трения на контакте может быть достигнуто модифицированием посадочных поверхностей, например, упрочнением или нанесением покрытий. Для упрочнения и создания сжимающих напряжений могут использоваться различные способы поверхностного пластического деформирования (ППД). Нанесение различных металлических покрытий на сопрягаемые поверхности может существенно изменить коэффициент трения. Следует заметить, что в работах, где рассматривается влияние покрытий на несущую способность соединений с натягом, покрытия наносились электролитическим или горячим способом на небольшие образцы или модели прокатных валков. Использование таких способов для крупногабаритных валков потребует создания специальных отделений или цехов. При нанесении покрытий возникает целый комплекс вопросов: материал покрытия, метод его нанесения,

возможность реализации на машиностроительном или металлургическом предприятии, влияние покрытия на работоспособность вала в целом и др.

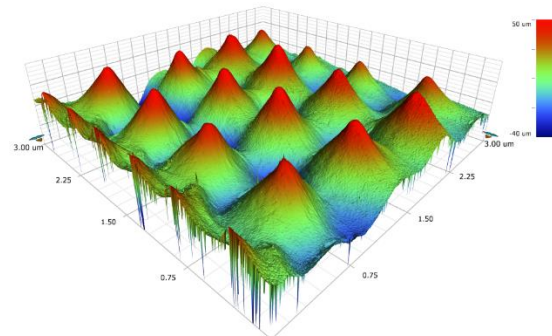
При расчете составных прокатных валков и зубчатых колес обычно принимают $f=0,12...0,14$ [2, 5]. Известно, что при обработке сопрягаемых плоских поверхностей фрикционных болтовых соединений вращающимися проволочными щетками (ВПЩ) $f=0,35$, при пескоструйной или дробеструйной обработке $f=0,58$, примерно такие же величины f достигаются при лазерной очистке [12]. Повышение нагрузочной способности соединений с натягом возможно также электроэрозионным легированием и лазерной закалкой [13].

Для модификации поверхности можно использовать различные технологии, но лазерная обработка является, вероятно, наиболее передовым способом. Лазерная обработка приводит к образованию очень большого количества микроямок на поверхности. Каждое из этих микроуглублений может служить как резервуар для смазочного материала или как микроловушка для частиц износа при сухом трении, что позволяет уменьшить повреждение при фреттинге и повысить усталостную долговечность. Само наличие ямок после лазерной обработки увеличивает коэффициент трения во фрикционных соединениях. Кроме того, эти микроямки можно заполнить каким-либо функциональным покрытием.

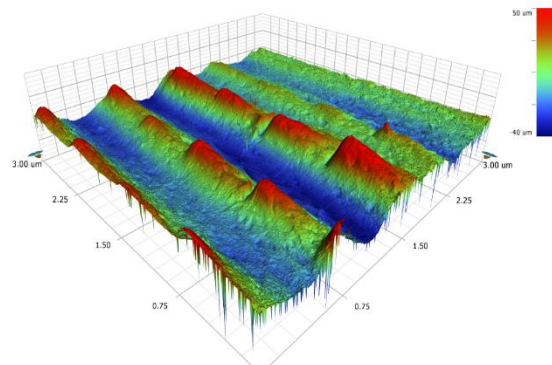
Нами проведены эксперименты по нанесению покрытия на поверхность, обработанную лазером. На рисунке 3 показан вид поверхности ролика* из стали 20 обработанного лазером (нагрев на глубину 50 мкм с оплавлением) (рисунок 3, а) и нанесенным методом фрикционного плакирования ВПЩ латунным покрытием (рисунок 3, б, в). Более толстое покрытие (рисунок 3, в) почти полностью заполняет впадины между выступами, кроме того, вследствие фрикционного действия ВПЩ сглаживаются вершины выступов.



а)



б)



в)

Рисунок 3. Вид поверхности
а) после лазерной обработки;
б) после нанесения латунного покрытия
толщиной 5-7 мкм;
в) после нанесения латунного покрытия
толщиной 20-25 мкм

В таблице представлены характеристики поверхности образца до и после нанесения покрытия, а на рисунке 4 диаграмма соотношения значений параметров микро топографии.

* Исследование микро топографии поверхности проводилось в лаборатории Научно-исследовательского центра «Микро топография» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на установке Contour GT K1 Губаревым Е.В.

Таблица Характеристики поверхности образца до и после нанесения покрытия

Характеристика	Sa	Sku	Ssk	Sdq	Sdr	Sds	Sal	Vvc
Ед. измерения	мкм			Град	%	1/мм ²	мкм	мкм ³ /мм ²
Без покрытия	6,7	4,52	0,917	21,4	7,2	253	213	11,8
Покрытие 5-7 мкм	10,2	3,42	0,213	20,2	6,3	270	237	16,8
Покрытие 15-20 мкм	5,32	3,33	0,519	18,1	5,1	312	173	9,0

Вследствие заполнения неровностей и пустот латунию поверхность образца становится более «гладкой» и менее «развитой». Это хорошо видно по уменьшению параметров Sa, Vvc, Sdq, Sdr, а также по увеличению Ssk. Об увеличении количества пиков говорит возрастание параметра Sds и одновременное уменьшение Sal. С увеличением толщины покрытия следы лазерной обработки, представляющие собой отдельно стоящие вершины, объединяются в «хребты», т.е.

происходит переход из детерминированного профиля в периодический. Антифрикционное покрытие может быть использовано для повышения износостойкости пар трения. Покрытия из алюминия или меди, обработанной лазером поверхности, могут применяться для увеличения площади фактического контакта, его теплопроводности и несущей способности соединений с натягом [10].

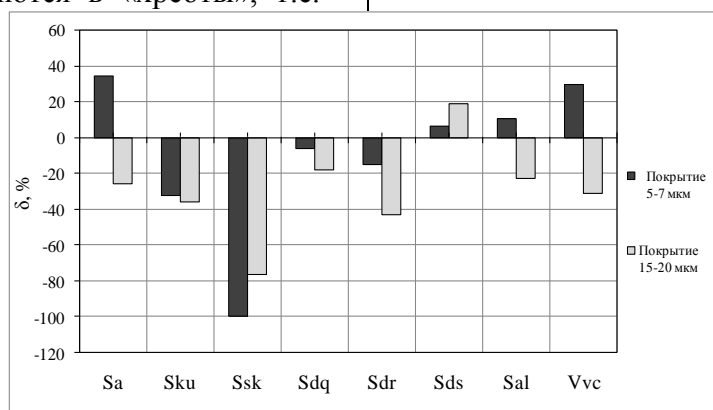


Рисунок 4. Диаграмма процентного соотношения значений параметров микротопографии поверхности образца до и после нанесения покрытия различной толщины

На рисунке 5 представлена поверхность ролика, обработанного лазером, которая покрыта окружностями, возникшими при оплавлении стальной поверхности ролика под воздействием лазера (рисунок 5, а), что подтверждается наличием литой дендритной структуры (рисунок 5, б)*

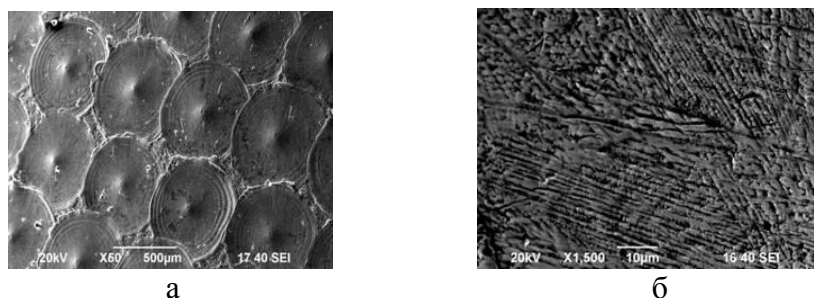


Рисунок 5 – Поверхность ролика, обработанного лазером

* Металлографические исследования выполнены в ЦКП НИИ «Наносталь» ФГБУ к.т.н. Ю.Ю.Ефимовой.

На рисунке 6 представлена микроструктура поверхности ролика после обработки лазером (рисунок 6, а) и нанесенного ВПЩ латунного покрытия толщиной 10-30 мкм (рисунок 6, б). По ней можно определить протяженность зоны термического влияния, возникшую при лазерной обработке, которая составляет около 250 мкм.

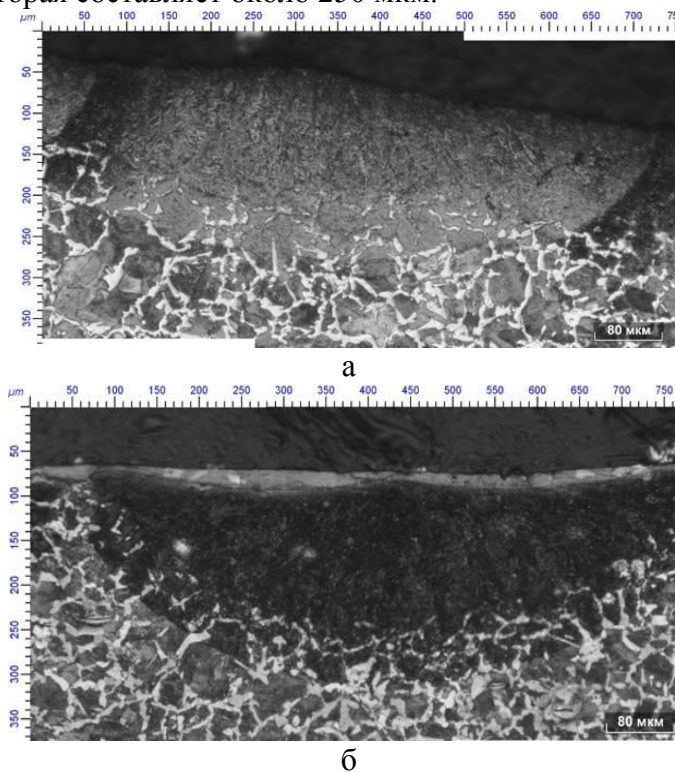


Рисунок 6. Микроструктура поверхности ролика после обработки лазером (а) и нанесенного гибким инструментом покрытия (б)

Зона термического влияния после обработки поверхности стального ролика лазером состоит из мартенситной структуры с микротвердостью порядка 6500 МПа и по мере удаления от поверхности переходит в феррито-перлитную структуру с микротвердостью 2500 МПа.

Заключение

В КГСИ используются, в основном, посадки с натягом. Повышение их несущей способности может быть осуществлено путем модификации сопрягаемых поверхностей. Предложено использовать обработку лазером с последующим нанесением функциональных покрытий методом фрикционного плакирования гибким инструментом. Это позволяет увеличить коэффициент трения, теплопроводность контакта и уменьшить повреждения от фреттинга.

Библиографический список

1. Прочность прокатных валков / П.И. Полухин, В.А. Николаев, В.П. Полухин и др. Алма-Ата: Наука, 1984. 295 с.

2. Белевский Л.С., Фиркович А.Ю., Сударгин И.В. и др. Составные прокатные валки: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 206 с.
3. Белевский Л.С., Кадошников В.И., Белевская Е.Л., Москвин В.М., Исмаилов Р.Р., Фиркович А.Ю., Клочков О.С. Бандажированные прокатные валки и ролики МНЛЗ: монография / Магнитогорск: МГТУ, 2009. 234 с.
4. Технология восстановления крупногабаритных составных прокатных валков / Лебедь В.Т. // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. К.: НТУУ "КПИ". 2007. № 52. С. 70.
5. Ворovich И.И., Сафронов Ю.В., Устинов Ю.А. Прочность колес сложной конструкции. М.: Машиностроение. 1967. 193 с.
6. Лебедь В.Т. Повышение качества соединения крупногабаритных составных изделий: Изд-во Вестник нац. техн.

- ун-та «ХПИ». Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2015. С. 181-184.
7. Кудрявцев И.В., Наумченков Н.Е., Саввина Н.М. Усталость крупных деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
 8. Фиркович А.Ю., Полухин В.П., Николаев В.А. и др. // Бюл. ин-та «Черметинформация». 1974. № 23 (739). С. 44.
 9. Фиркович А.Ю. Повышение долговечности составных опорных валков // Сталь. 1981. № 10. С. 53-54.
 10. Белевский Л.С., Исмагилов Р.Р., Белевская И.В., Клочков О.С., Фиркович А.Ю. Совершенствование технологии изготовления, методики расчета, кон-

струкций и условий эксплуатации прокатных валков: монография / Магнитогорск: МГТУ, 2015. 225 с.

11. Пат. на полезную модель №100436 РФ, МПК В21В 27/03. Бандажированный прокатный валок / Белевский Л.С., Исмагилов Р.Р., Клочков О.С. и др. (РФ). Опубл.: 20.12.2010. Бюл. № 35.
12. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении/ Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М. СПб.: НИУ ИТМО. 2013. 103 с.
13. Алехин А.Г. Повышение нагрузочной способности соединений с натягом на основе лазерной закалки: Автореф. дис. к-та техн. наук, Волгоград. 2004. 18 с.



УДК 621.771

Э.И. Фахретдинова, Р.Ф. Галлямова, Г.И. Рааб
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»
г. Уфа, Россия

E-mail: yelka89@mail.ru

Дата поступления: 06.10.2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МУЛЬТИ-РКУП-КОНФОРМ

Аннотация

Показаны особенности деформированного состояния алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si при практической реализации процесса Мульти-РКУП-Конформ. Данный способ обработки за один цикл обеспечивает уровень суммарной деформации сдвига, превышающий три единицы, что позволяет исключить многоцикловую обработку. Представлен расчет деформации сдвига, исследована трансформация микроструктуры алюминиевого сплава Al6101 и проанализирован характер течения материала. Выявлены участки затрудненного течения (застойные зоны) металла и определены причины их появления. Проведены оценки структурных состояний застойных зон и механического поведения полученных в этих условиях образцов.

Ключевые слова: методы интенсивной пластической деформации, алюминиевые сплавы, метод сеток, деформация сдвига.

Введение

Деформированное состояние металлов во многом отвечает за структурное состояние и уровень механических свойств деформируемых металлов. Поэтому исследование этого фактора в процессах ОМД является важным и значимым для адекватного анализа результатов обработки. Наиболее перспективными методами интенсивной пластической деформации (ИПД) для практического использования

являются РКУП-Конформ и Мульти-РКУП-Конформ, использующие разовые большие немонотонные деформации. В силу того, что этими методами можно получать длинномерные ультрамелкозернистые заготовки в виде прутков, катанки и проволоки с повышенными физико-механическими свойствами, тщательные исследования этих процессов весьма актуальны. Целью данной работы является оценка деформированного состояния методом сеток

с анализом характера течения материала, структурных особенностей и механического поведения, деформированных образцов из электротехнического алюминиевого сплава марки 6101 методом Мульти-РКУП-Конформ.

Методика исследований

В качестве материала исследования использовали термически упрочняемый сплав марки Al6101 системы Al-Mg-Si типа АВЕ [1] следующего химического состава: Al - основа; Mg - 0.58; Si - 0.54; Cu - 0.003; Fe - 0.2; Zn - 0.1 (масс. %). Данный сплав имеет электротехническое назначение и используется для производства токопроводящих жил и кабелей.

Исходные заготовки диаметром 12 мм и длиной 2700 мм подвергали термомеханической обработке, включающей отжиг при температуре 550°C в течение двух часов с последующим охлаждением в воду, и один цикл обработки в опытно-промышленной установке Мульти-РКУП-Конформ[2] с углами сопряжения каналов $\Phi_1=90^\circ$, $\Phi_2=120^\circ$, $\Phi_3=120^\circ$ (рисунок 1) при температуре 20°C. Данная геометрия оснастки была выбрана исходя из проведенных ранее исследований, представленных в работах [3-4].

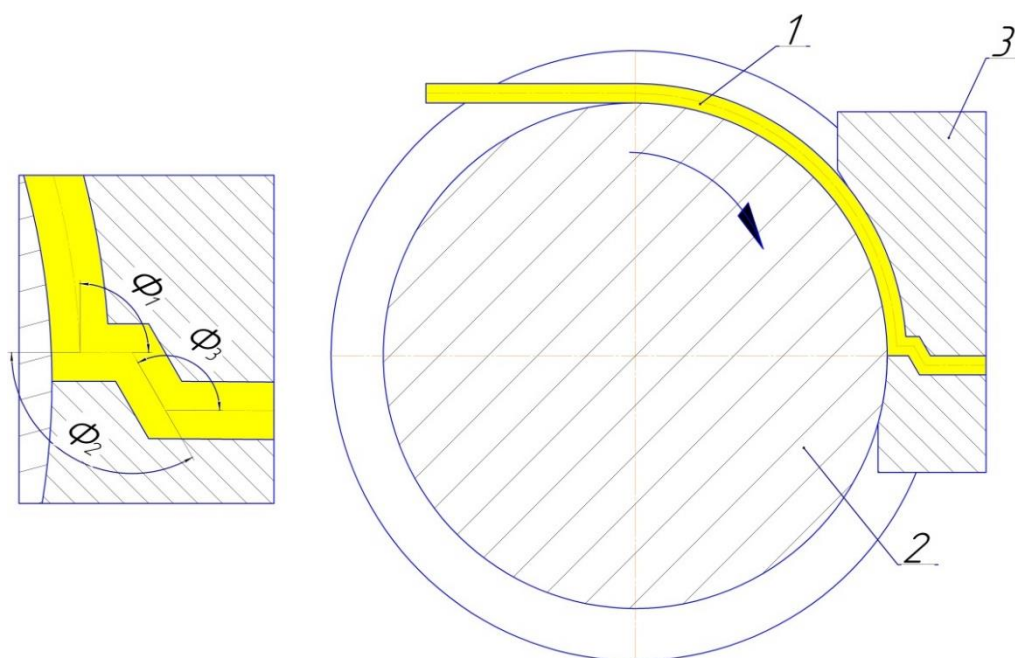


Рисунок 1. Схема процесса Мульти-РКУП-Конформ:

1- заготовка; 2 – рабочее колесо; 3 - матрица

После проведения Мульти-РКУП-Конформ структуру сплава исследовали на световом микроскопе «Olympus GX51». Для выявления структуры сплав предварительно подвергли химическому травлению в растворе Келлера.

Статические испытания на растяжение цилиндрических образцов с рабочей частью $\varnothing 3 \times 15$ мм проводили на универсальном динамометре Instron 8862 в соответствии с ГОСТ 1497-84. Характеристики прочности и пластичности материала опре-

деляли при растяжении образцов при комнатной температуре со скоростью деформации 1мм/с.

Экспериментальное изучение распределения деформаций проводили с помощью метода координатных (делительных) сеток, который широко используется при оценке процессов обработки металлов давлением [5-6]. Исследование проводили на составном образце длиной 150 мм, с размерами поперечного сечения 11x11мм. На одну из симметричных половинок внутреннего продольного (вертикального) сечения

алюминиевого образца наносили сетку с размером ячейки 2x2 мм (рисунок 2) Способ нанесения – механический, с использованием точного станочного оборудования; точность нанесения - $\pm 0,02$ мм; глубина и

ширина рисок – 0,25 мм. После деформации измеряли координаты сетки на инструментальном микроскопе; погрешность измерений – $\pm 0,01$ мм.

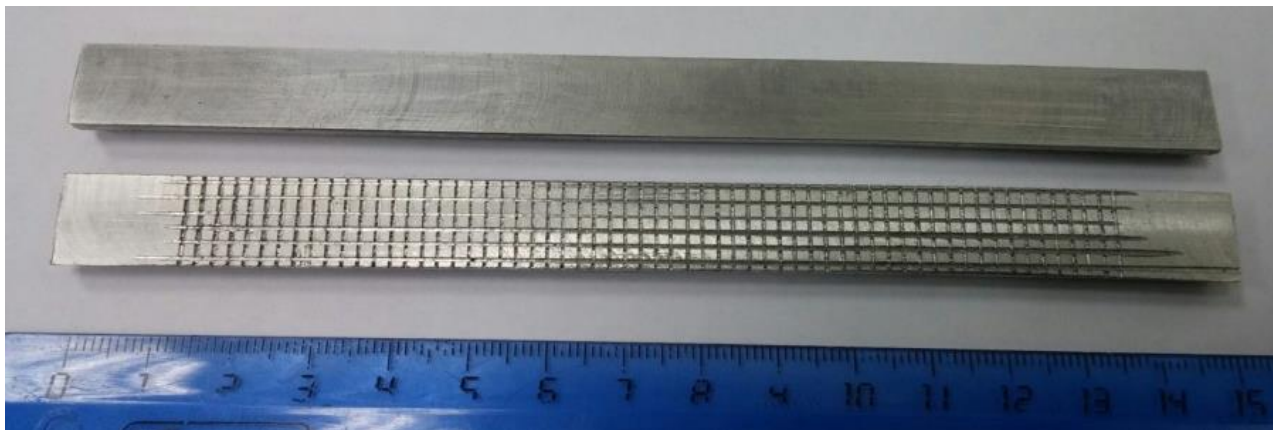


Рисунок 2. Параметры ячейки исходного образца

Сравнение двух любых соседствующих ячеек показывает деформацию ячейки за некоторый интервал времени. При этом предполагается, что в пределах ячейки она однородна и равна среднему значению по объему, ограниченному ячейкой.

Результаты исследований

Общий вид образца после деформации методом Мульти-РКУП-Конформ и характер искажения координатной сетки в диаметральной продольном сечении образца после трех актов сдвига показаны на рисунке 3. Видно, что ячейки сетки меняют свои геометрические размеры после каждого очага деформации. Анализ деформированного состояния проводили для областей, отмеченных черной сеткой. После первого очага деформации искажение геометрии ячеек при Мульти-РКУП-Конформ имеет такой же характер, как для традиционных процессов РКУП [7-10]. Застойная зона и контактное трение влияют на характер течения, так в приконтактной области ячейки более вытянутые и имеют больший угол наклона, чем в центральной части образца, что приводит, как правило, к лучшей проработке структуры [11].



Рисунок 3. Параметры ячеек после Мульти-РКУП-Конформ

На рисунке 4 представлена диаграмма, полученная после проведенных вычислений параметров ячейки сетки, на которой показаны величины накопленной степени деформации сдвига при прохождении трех очагов деформации.



Рисунок 4. Диаграмма величины накопленной степени деформации сдвига при прохождении трех очагов деформации

Видно, что после деформации методом Мульти-РКУП-Конформ накопленная степень деформации составляет 4,8 единиц, что, как правило, приводит к формированию ультрамелкозернистой структуры, и, следовательно, к повышению механических свойств [8,12]. Эти данные коррелируют с известными теоретическими оценками степени деформации, представленными в работах [6-7].

Микроструктурные исследования

Кинетика изменения микроструктуры алюминиевой заготовки в процессе деформации методом Мульти-РКУП-Конформ представлена на рис. 5.

Видно из рисунка 5 (снимок 1), до ИПД структура образца однородная, видны

границы зёрен, зёрна преимущественно вытянутые, средний размер составляет 108 ± 55 мкм. После первого очага деформации (снимок 2) наблюдается тип структуры с сильно вытянутыми зёрнами и развитой субструктурой внутри зёрен.

Дальнейшая трансформация структуры происходит следующим образом: после второго очага деформации при сохранении полосчатости наблюдается активное дробление полос, а после третьего очага деформации формируются более равноосные зёрна, хотя некоторая полосчатость структуры сохраняется. Размер зёрен после обработки находится в микронном диапазоне и составляет порядка 48 ± 16 мкм с ультрамелкой внутренней субструктурой.

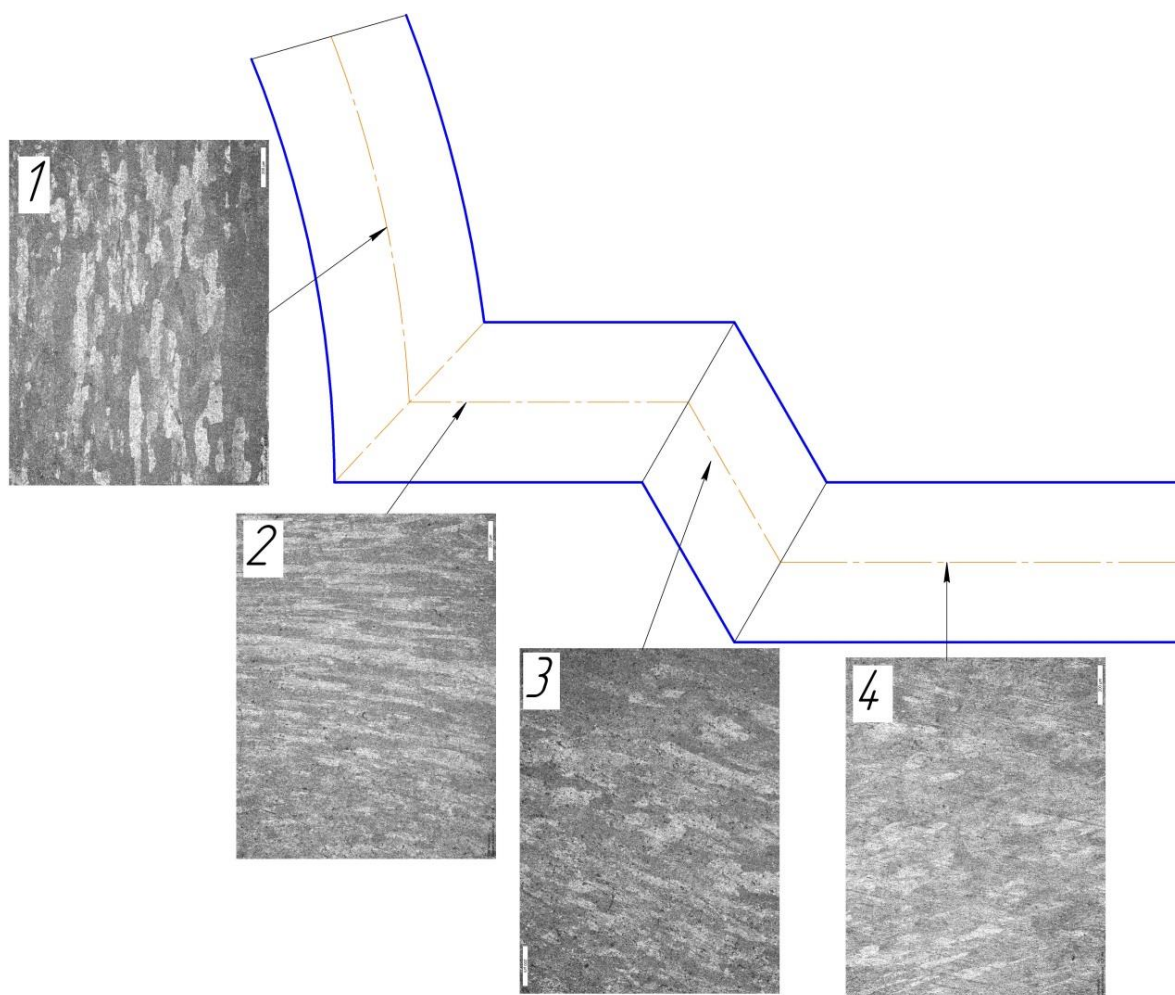


Рисунок 5.Изменение микроструктуры образца в процессе деформации методом Мульти-РКУП-Конформ

Таким образом, в процессе Мульти-РКУП-Конформ структура трансформируется из крупнозернистой в смешанную ультрамелкую, что приводит к повышению прочностных свойств (таблица 1).

Механические свойства алюминиевого сплава после обработки методом Мульти-РКУП-Конформ

Режим обработки	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
Исходное состояние	140±4	120±3	15.0±1.0
Мульти РКУП-Конформ	210 ± 11	160±34	11.5±1,0

Как видно из табл.1, прочность возросла со 140 до 210 МПа, то есть на 66% по сравнению с состоянием поставки, пластичность при этом снизилась до 11.5%. Такое механическое поведение наиболее характерно после обработки методами ИПД. Таким образом, можно констатировать, что ИПД методом Мульти-РКУП-Конформ приводит к существенному измельчению структуры и повышению прочности.

Заключение

1. С помощью метода делительных сеток оценен характер течения материала в процессе обработки методом Мульти-РКУП-Конформ и проведен расчет накопленной деформации. Установлено, что в процессе пластической обработки наблюдается некоторая неоднородность пластического течения в первом очаге деформации, а также происходит интенсивное накопление деформации, причем расчетная суммарная степень деформации сдвига после одного цикла обработки для средней области образца составляет 4,3 единицы.

2. После обработки методом Мульти-РКУП-Конформ в алюминиевой заготовке марки Al6101 формируется зеренно-субзеренная структура с размером зерен порядка 48 ± 16 мкм, которая приводит к повышению прочности материала со 140 до 210 МПа по сравнению с исходным состоянием.

Благодарность

Проведение деформации методом Мульти-РКУП-Конформ и анализ методом сеток были выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01062) в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет». Исследование микроструктуры

было проведено в рамках гранта Президента Российской Федерации № НШ-7996.2016.8 для поддержки ведущих научных школ.

Библиографический список

1. Воронцова Л.А., Маслов В.В., Пешков И.Б. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях. - М.: Энергия, 1971. - 224с.
2. Патент РФ № 2013156136/02 17.12.2013 Рааб Г.И., Фахретдинова Э.И., Капитонов В.М., Валиев Р.З. Способ непрерывного равноканального углового прессования металлических заготовок в виде прутка // Патент России № 2560474. 2013. Бюл. №23.
3. Фахретдинова Э.И., Рааб Г.И., Валиев Р.З. Исследование течения металла в процессе Мульти-РКУП-Конформ // *Advanced Engineering Materials*. - 2015. - Т.17. - С. 1723–1727.
4. Рааб Г.И., Фахретдинова Э.И., Валиев Р.З., Трифоненков Л.П., Фролов В.Ф. Компьютерное исследование влияния геометрии оснастки на деформационные параметры пластической обработки алюминиевой катанки методом Мульти-РКУП-Конформ // *Металлург*. - 2015. - № 11.
5. Ренне И.П. Теоретические исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением. - Тула: ТПИ, 1979. - 97с.
6. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. — Минск: Наука и техника, 1994. - 232с.
7. Segal V.M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion // *Materials Science and Engineering A*. - 2003. - Vol. 345. - P. 36–46.

8. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. - М.: Академкнига, 2007. - - 398с.
9. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. – Уфа: Гилем, 2013. – 376с.
10. Г.И. Рааб, К.Н. Макарычев, Р.З. Валиев. Особенности НДС при РКУП с противодавлением // Физика и техника высоких давлений. – 2005. - № 1. - С.72-79.
11. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Гилян В.Г. Трение и смазки при обработке металлов давлением: Справоч. изд. - М.: Metallurgy, 1982. - 431с.
12. Э.И. Фахретдинова, Е.В. Бобрук, Г.Ю. Сагитова, Г.И. Рааб. Структура и свойства алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si после обработки методом Мульти-РКУП-Конформ // Письма о материалах. – 2015. - №2. – С.202-206.
13. Fakhretdinova E., Raab G., Ryzhikov O., Valiev R. Processing ultrafine-grained Aluminum alloy using Multi-ECAP-Conform technique // 2014 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 63 012037.



УДК 621.793

А.А. Герасимова, А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов
 ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
 технологический университет «МИСиС»
 г. Москва, Россия
 E-mail: allochka@rambler.ru
 Дата поступления: 03.10.2016

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ И ФАЗОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА МЕДИ ДЛЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

Аннотация

В работе для повышения срока службы кристаллизаторов МНЛЗ исследовали структуру алюминиевого и хромоникелевого покрытий, состав фаз, твердость и микротвердость поверхностных слоев на меди М1.

Нанесение хромоникелевого покрытия с алюминиевым подслоем для повышения стойкости узких стенок кристаллизаторов МНЛЗ возможно при условии достижения связи пористого слоя с α -фазой или уменьшения пористости слоя.

Ключевые слова: кристаллизатор МНЛЗ, алюминиевое и хромоникелевое газотермическое покрытие, структура, фазовый состав, твердость, микротвердость.

Введение

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, 2]. В то же время медь имеет низкие жаростойкость и износостойкость [3]. 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 [4]. 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 [5]. Износостойкость алитированных образцов из меди увеличивается в 1,3 раза [6]. Однако метод диффузионного насыщения в порошковых смесях является сравнительно трудоемким и обладает низкой производительностью.

Наиболее перспективным направлением снижения интенсивности износа ра-

бочих поверхностей стенок кристаллизатора МНЛЗ в настоящее время считается нанесение различных покрытий на стенки кристаллизатора [7–9]. ООО "Корад" организовало работы по нанесению гальванического покрытия на бывшие в эксплуатации стенки кристаллизатора и провело испытания в условиях ОАО "Северсталь" [10]. В ходе испытаний наносили покрытия двух видов фирмы "КМЕ Europa Metal AG" (Германия): из никеля твердостью 220 HV, и из сплава никеля с кобальтом твердостью 400 HV. В результате получено увеличение стойкости стенок кристаллизатора по износу для обоих видов покрытия. Однако гальванические покрытия используются только на тонкостенных щелевых кристаллизаторах МНЛЗ и не применяются для толстостенных кристаллизаторов. Решить проблему повышения стойкости стенок толстостенных кристаллизаторов, может применение газотермических покрытий [11, 12]. Технологический процесс напыления позволяет получать требуемую производительность нанесения покрытия и характеризуется относительно небольшой трудоемкостью [13].

В результате напыления алюминиевого газотермического покрытия на медь и последующей термообработки образуется диффузионный слой [14] с жаростойкостью и износостойкостью, не уступающими свойствам, полученными с использованием метода диффузионного насыщения из порошков.

Как показали эксперименты, термообработка стенок с алюминиевым газотермическим покрытием в защитной среде при температуре 900 °С и времени выдержки

10 ч, необходимых для создания требуемой толщины диффузионного слоя, приводит к их короблению в результате данного процесса, которое не устраняется механическим способом [15]. Поэтому необходимо было корректировать режимы термообработки или наносить на стенки материал, не уступающий по свойствам Cu–Al диффузионному слою и не требующий термообработки. Так покрытие из никелевого сплава было нанесено на всю рабочую поверхность двух узких стенок. Требуемый класс чистоты рабочей поверхности стенок был обеспечен с помощью механической обработки. При осмотре кристаллизатора с опытными стенками после разливки 11 плавок высокомарганцовистой стали S355JR было установлено, что износ покрытия в углах нижней части стенок составил 0,6 – 0,75 мм [11].

Основная часть

В данной работе для повышения стойкости узких стенок использовали покрытие из хромоникелевого сплава. Сначала покрытие напыляли на образцы из меди М1.

Исследовали структуру покрытия, состав фаз, твердость и микротвердость поверхностных слоев.

Структура Cr-Ni слоя на образцах 1 и 2 идентична (рис. 1, 2)¹. На границе раздела «покрытие – медная основа» участков несплошного прилегания Cr-Ni слоя не наблюдается. Глубина диффузии никеля в медную основу составляет 30 мкм, глубина диффузии хрома – до 5 мкм (микронзондовое исследование).

Толщины нанесенных слоев приведены в таблице 1.

Таблица 1

Толщины нанесенных слоев исследуемых образцов

№ образца	Общая толщина нанесенных слоев, мкм			Средняя толщина Cr-Ni слоя, мкм
	средняя	min	max	
1	150	100	210	150
2	140	80	230	140

¹ В работе принимала участие С.А. Ковалева

Элементный состав фаз на образцах идентичен и представлен в таблице 2.

Таблица 2

Локальный химический состав фаз, %

Химические элементы	Cr-Ni слой		
	светлая фаза	темная фаза	серая фаза
Si	0,5		0,3-0,5
Ni	83,9-89,0	3,2-9,1	63,9-73,5
Cr	9,2-14,4	59,5-63,4	10,5-12,4
Fe	1,2-1,3		1,0-3,4
O		31,4-33,4	21,9-24,9

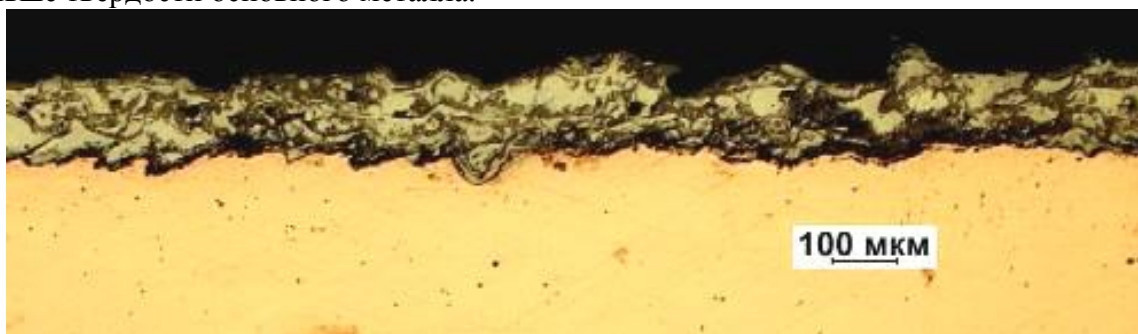
Средние значения микротвердости фаз исследуемых образцов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Средние значения микротвердости, МПа

№ образца	основа	Cr-Ni слой		
		светлая фаза	темная фаза	серая фаза
1	580	2440	9970	3900
2	580	3000	9900	4100

При твердости медной основы равной 53,2 HR15T твердость поверхностных слоев на исследованных образцах примерно одинаковая и составляет 68,9-70,0 HR15T, т.е. в 1,3 раза больше твердости основного металла.



образец 1



образец 2

Рисунок 1. Образцы медного листа с Cr-Ni напылением

В связи с тем, что для получения требуемого класса чистоты поверхности стенок необходима их механическая обработка шлифованием, необходимо увеличение толщины хромоникелевого покрытия. При толщине хромоникелевого покрытия более 0,8 мм возможно его отслоение. Поэтому для повышения прочности сцепления хромоникелевого покрытия с медной основой рассмотрели возможность использования алюминиевого подслоя. Повышение адгезии покрытия обеспечивается за счет взаимной диффузии алюминия и меди, а также диффузии никеля и хрома в медно-алюминиевые слои. Как и ранее, покрытие напыляли на образцы из меди М1 (образцы 3, 4).

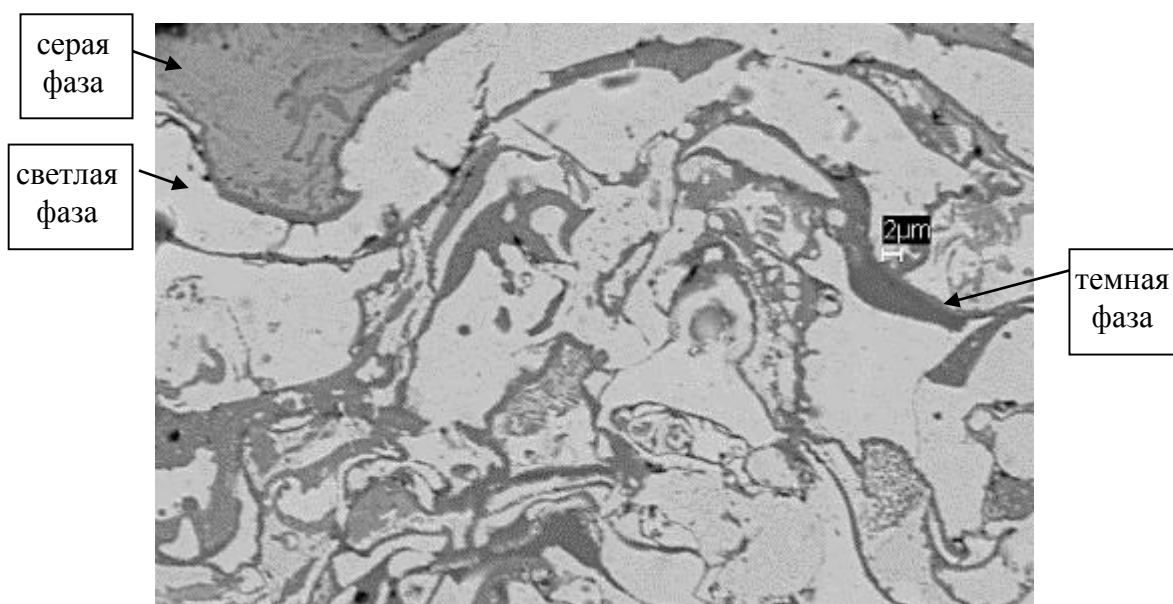
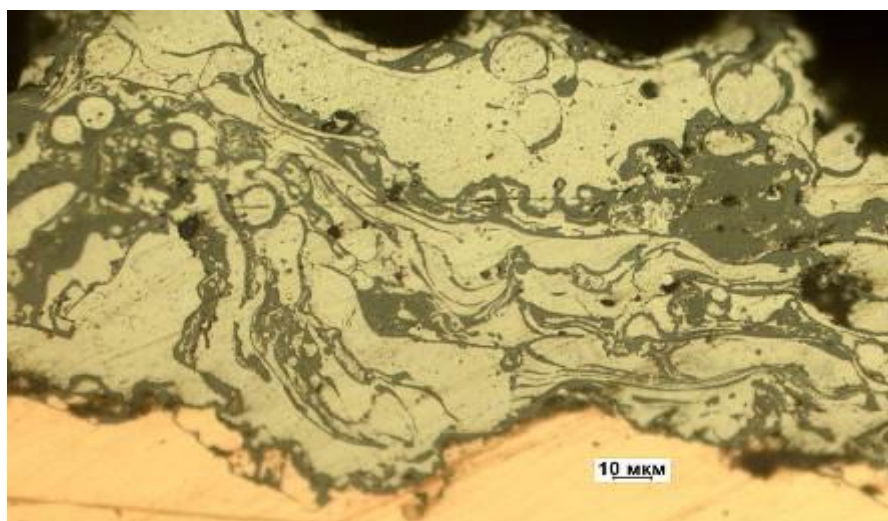


Рисунок 2. Структура Cr-Ni слоя

В поверхностном слое покрытия образцов наблюдается Cr-Ni слой идентичный слою на образцах 1 и 2. Под хромоникелевым слоем обнаружен двухфазный пористый слой и зона α -раствора алюминия и никеля в меди (рисунок 3). В пористой зоне отмечается наличие несплошностей и пор. На обоих образцах наблюдается отслоение пористого слоя от α -фазы. Кроме того, в этих участках обнаружены продукты окисления: [Cu]=80%, [O]=20% (микронзондовое исследование). На границе раздела «Cr-Ni слой – пористый слой» наблюдается плотное прилегание слоев (рисунок 4).

Толщины слоев приведены в таблице 4.

Таблица 4

Толщины нанесенных слоев исследуемых образцов*

№ образца	Общая толщина нанесенных слоев, мкм			Средняя толщина зоны α -фазы, мкм	Средняя толщина пористого слоя, мкм	Средняя толщина Cr-Ni слоя, мкм
	средняя	min	max			
3	600	550	650	340	95	130
4	600	550	650	320	95	150

* Толщины слоев указаны без учета участков несплошностей.

Элементный состав фаз Cr-Ni слоя на образцах 3, 4 полностью идентичен составу на образцах 1, 2.

Средние значения микротвердости фаз, кроме Cr-Ni слоя и медной основы, приведены в таблице 6.

Таблица 6

Средние значения микротвердости, МПа

№ образца	α-фаза	пористый слой	
		светлая фаза	серая фаза
3	940	1900	4300
4	960	1980	3800

Средние значения микротвердости фаз Cr-Ni слоя и медной основы на образцах 3, 4 соответствует значениям на образцах 1, 2.

Заключение

Результаты металлографических и фазовых исследований газотермических покрытий на меди позволяют заключить следующие:

- нанесение хромоникелевого покрытия толщиной до 0,21–0,23мм обеспечивает плотное прилегание к медной основе за счет диффузии никеля в медь на глубину 30мкм и хрома на глубину до 5 мкм, обладает достаточно высокой твердостью за счет содержания хрома около 60% в темной фазе; однако такой толщины покрытия недостаточно для нанесения на стенки кристаллизатора, а с увеличением толщины покрытия прочность его сцепления с медной основой уменьшается;

- нанесение хромоникелевого покрытия с алюминиевым подслоем приводит к образованию промежуточных α- раствора алюминия и никеля в меди и двухфазного пористого слоя, между которыми практически отсутствует сцепление, обеспечивающееся только за счет содержания никеля в α - фазе 1,5%;

- нанесение хромоникелевого покрытия с алюминиевым подслоем возможно при условии достижения связи пористого слоя с α - фазой или уменьшения пористости слоя.

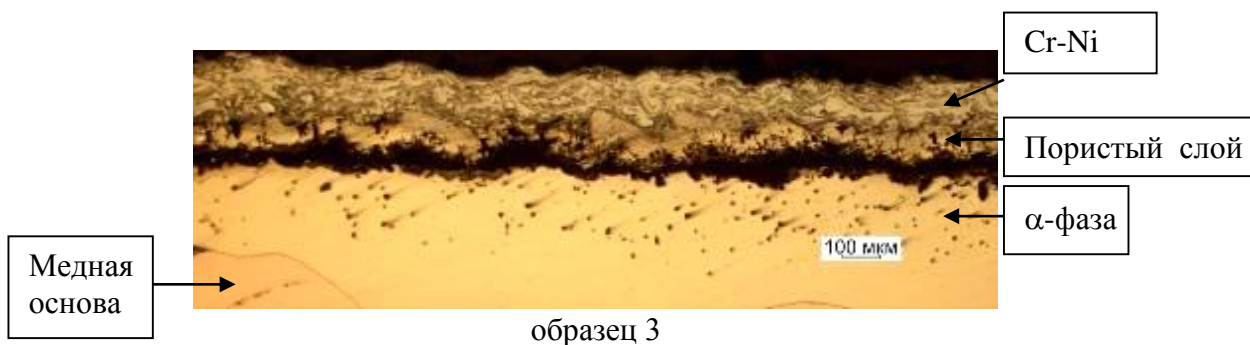


Рисунок 3. Образец с алюминиевым подслоем и Cr-Ni напылением

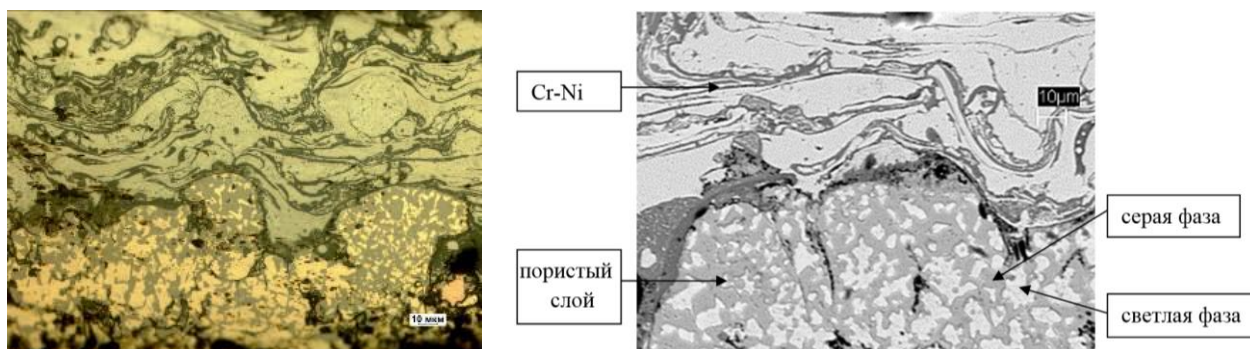


Рисунок 4. Структура покрытия

Библиографический список

1. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Metallurgy, 1986. – 480 С.
2. Николаев А.К. Применение жаропрочных медных сплавов в кристаллизаторах непрерывного литья слитков / А.К. Николаев, Г.В. Ашихмин // – Цветная металлургия. – 2003. – №11. – С.28–36.
3. 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.
4. Зайт В. Диффузия в металлах / В. Зайт. – М.: Metallurgy, 1966. – 654 С.
5. Минкевич А.Н. Химико–термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 С.
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. Ушаков С.Н. Результаты применения кристаллизаторов с упрочняющим покрытием в слябовой МНЛЗ с вертикальным участком в электросталеплавильном цехе ОАО «ММК» / С.Н. Ушаков, Ю.М. Желнин, А.Г. Алексеев и др. // Горный журнал. Черные металлы. Специальный выпуск. – 2012. – С 49-50.
8. Лейрих И.В. Особенности разрушения покрытий гильз кристаллизаторов высокоскоростных сортовых МНЛЗ / И.В. Лейрих, А.Н. Смирнов, Е.Ю. Жибедов, Е.Н. Любименко // –Электрoметаллургия. –2007. – №4. –С.29–32.
9. Зайцев А.А. Совершенствование тепловой работы кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок с защитными покрытиями рабочих стенок: дисс. к-та техн. наук: 05.14.04: Череповец, 2005. –104 с.
10. Куклев А.В. Российский опыт применения покрытий на медных стенках слябовых кристаллизаторов / А.В. Куклев, Ю.М. Айзин, А.А. Макрушин и др. // Сталь. – 2007. – №3. – С. 17-18.
11. 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.
12. Эффективный метод плазменного нанесения жароизносостойкого покрытия на медную основу / М.В. Ильичев, Э.Х. Исакаев, Г. А. Желобцова и др. // Metallurg. –2002. –№ 2. –С.55–57.
13. Поляк М.С. Технология упрочнения: в 2-х т. / М. С. Поляк. - М.: Машиностроение, 1995. – 832 С. ISBN 5-217-02810-6, Т.1.
14. 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.
15. Герасимова А.А. Создание диффузионного слоя на узких стенках кристаллизаторов МНЛЗ с использованием алюминиевого газотермического покрытия / А.А. Герасимова, А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов // Изв. ВУЗов. Чёрная металлургия. – 2015. Т.58. –№3. – С.174–176.



УДК 621.793

**А.В. Анцупов (мл), А.В. Анцупов,
В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский**
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: momz-magtu@yandex.ru
Дата поступления: 05.11.2016

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Аннотация

На основе кинетической концепции разрушения конструкционных материалов разработаны базовые принципы теории прогнозирования долговечности подшипниковых опор качения в виде общей постановки и решения стационарных краевых задач физической теории надежности. С этой целью минимизирована система определяющих уравнений и сформулирована структура условий однозначности для исследуемых типов подшипников качения. В качестве примера решения таких задач рассмотрен блочный алгоритм оценки проектного ресурса шариковых однорядных подшипников по критерию контактной выносливости материала одного из колец.

Ключевые слова: подшипники качения, долговечность, ресурс, прогнозирование, кинетическая модель отказов, критерий, контактная прочность.

Описание проблемы

В настоящее время подшипники качения (ПК) являются основным видом опор вращающихся деталей, валов и осей разнообразных машин и механизмов металлургического производства. Они стандартизованы в широком диапазоне типоразмеров согласно ГОСТ 3395-89 [1]. Поскольку основным дефектом ПК в нормальных условиях эксплуатации является выкрашивание рабочих поверхностей из-за переменных контактных напряжений, для его предупреждения производят расчет на долговечность по динамической грузоподъемности, ГОСТ 18855-2013 [2].

Однако номинальный 90-процентный ресурс L_{10} в часах рассчитывают не по напряжениям, а по эмпирической зависимости в функции эквивалентной нагрузки $P_{экв}$ на подшипник:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P_{экв}} \right)^p \cdot \left(\frac{10^6}{60 \cdot n} \right), \quad (1)$$

где C - базовая динамическая грузоподъемность, величина которой для каждого подшипника определена на основе статистической обработки результатов многочисленных испытаний и приводится в каталогах с

коэффициентом надежности $P = 0,9$; n - постоянная частота вращения кольца подшипника в об/мин.

Эта формула получена при испытаниях ПК в крайне неоднозначных и неконкретных условиях: "...из широко используемых материалов *хорошего* качества, при *хорошем* качестве исполнения, эксплуатируемых в *нормальных* условиях работы..." [2], и поэтому не учитывает целый ряд параметров, например, изменение свойств материала элементов, рассеяние геометрических и микрогеометрических характеристик, температурные условия, условия смазывания, распределение контактных напряжений, характер их изменения во времени и др.

По сути эмпирический расчет долговечности ПК по выражению (1) выполняется по величине постоянной нагрузки (грузоподъемности), то есть *по критерию несущей способности*, и поэтому не описывает физику процессов повреждаемости и разрушения их материалов, не позволяет оценить изменение их состояния во времени и предсказать остаточный ресурс на требуемый момент времени будущей эксплуатации. При изменении условий эксплуатации, согласно [2], необходимы дополнительные

эксперименты для определения соответствующих эмпирических коэффициентов и введения их в условие (1), что снижает точность предсказания и увеличивает затраты на этапах разработки подшипниковых опор.

Таким образом, методика не является универсальной, не применима в специфических условиях эксплуатации и, на наш взгляд, может быть улучшена на основе современных достижений физической теории надежности и кинетического подхода к описанию процесса повреждаемости и разрушения конструкционных материалов. Поэтому целью исследований в данной работе является разработка нового теоретического подхода к построению математических моделей процесса формирования отказов ПК без проведения экспериментов.

Разработка кинетических моделей отказов ПК (общая постановка краевых задач)

Проектный ресурс ПК при конструировании подшипниковых опор может быть определен на основе общего методологического подхода к прогнозированию надежности технических объектов [3], структурно-энергетической теории прочности и износостойкости твердых тел [4-8], сформулированной в рамках кинетической концепции разрушения материалов [9-11], с использованием известных справочных зависимостей [12-13] для оценки необходимых геометрических, кинематических и силовых параметров ПК.

1. Уравнение для оценки проектного ресурса ПК :

$$t_* = (u_{e*} - u_{e0}) / \dot{u}_e;$$

2. Кинетическое уравнение повреждаемости элементов ПК [10,11]:

$$\dot{u}_e = k_{cmp} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot T}{h} \cdot U(\sigma_0, T) \cdot \exp\left(-\frac{U(\sigma_0, T) \cdot V_{am}}{k \cdot T}\right) \cdot sh\left(\frac{A_f^0 \cdot V_{am}}{2 \cdot k \cdot T}\right).$$

Величины скорости повреждаемости \dot{u}_e определяются отдельно для тел и дорожек качения, а минимально возможный ресурс t_* ПК в целом рассчитывается по максимальной из них. Параметры, входящие в

В соответствии с базовыми положениями указанных теорий сформулируем общую постановку краевой задачи (модель отказов) исследуемого типа подшипников качения в заданных условиях стационарного нагружения, принимая следующие допущения:

- для математического описания процесса деградации ПК в качестве параметра его текущего состояния примем плотность энергии u_{et} дефектов структуры материала наиболее нагруженных объемов поверхностных слоев тел и дорожек качения;

- в процессе эксплуатации в стационарных условиях нагружения величина u_{et} в каждом элементе будет возрастать от начального u_{e0} до критического u_{e*} значения с некоторой постоянной скоростью \dot{u}_e по закону: $u_{et} = u_{e0} + \dot{u}_e \cdot t$;

- условием работоспособности ПК в любой момент t будущей эксплуатации будет являться неравенство: $u_{et} = u_{e0} + \dot{u}_e \cdot t < u_{e*}$, а момент появления выкрашивания материала одного из элементов $t = t_*$ определится решением уравнения перехода ПК в предельное состояние: $u_{et} = u_{e0} + \dot{u}_e \cdot t_* = u_{e*}$.

В этом случае для прогнозирования среднего проектного ресурса ПК, из общей системы уравнений краевой задачи [3] в модель отказов достаточно включить две основных зависимости:

базовые уравнения системы (2), определяются по выражениям [10, 11], которые подробно описаны ниже.

Для того, чтобы система (2) оказалась статически определимой, необходимо сформулировать условия однозначности (отличительные признаки, начальные и гра-

нические условия), выделяющие исследуемый тип подшипников из класса ему подобных.

К *отличительным признакам* исследуемого ПК следует отнести тип, номер, конструктивные особенности и расчетную схему нагружения подшипника.

Начальные условия, характеризующие состояние ПК в момент времени $t = 0$, должны включать следующие группы задаваемых и рассчитываемых параметров.

Первая группа. Геометрические, кинематические и силовые характеристики ПК.

Вторая группа. Физико-механические характеристики материалов элементов.

Третья группа. Теплофизические характеристики материалов.

Четвертая группа. Основные физические константы:

Граничные условия, должны включать следующие уравнения:

- зависимости для расчета вспомогательных геометрических и кинематических параметров ПК;

- зависимости для расчета нагрузок во всех j -тых контактах тел качения с кольцами;

- зависимости для расчета основных характеристик напряженного состояния наиболее нагруженных объемов элементов ПК в каждом j -том контакте тел качения с кольцами.

В этом случае совокупность:

- системы основных уравнений (2);

- отличительных признаков и начальных условий;

- зависимостей, включенных в граничные условия,

представляет постановку краевой задачи теории надежности (физико-математическую модель параметрических отказов) исследуемого типа ПК для проектной оценки их ресурса по критериям контактной усталости материалов его элементов в общем виде.

В качестве примера ниже излагается алгоритм решения краевой задачи для краевых условий радиальных однорядных шариковых подшипников качения (ШПК) по критерию выносливости внешнего неподвижного кольца.

Стратегия проектного расчета ресурса радиальных однорядных ШПК

Алгоритм проектного расчета ожидаемого ресурса исследуемого типа ПК по критерию контактной усталости материалов дорожек качения включает следующие блоки. (Для сокращения объема статьи широко известные по учебникам или справочникам зависимости не приводятся, а указаны номерами формул или страниц источника).

Блок 1. Исходные данные.

Отличительные признаки. Подшипник шариковый, однорядный, типа 0000 с вращающимся внутренним кольцом, нагруженный постоянной радиальной силой.

Начальные условия (группы параметров исходного состояния ШПК).

Первая группа. Геометрические, кинематические и силовые характеристики ПК:

d , D , B - внутренний и наружный диаметр и ширина ПК; D_w , α - диаметр тел качения и угол контакта в ШПК; n_g , n_n - частота вращения внутреннего или наружного колец; F_r - радиальная нагрузка.

Вторая группа. Физико-механические характеристики материала элементов ПК:

E - модуль упругости; G - модуль сдвига; μ - коэффициент Пуассона; ρ - плотность материала, V_{am} - атомный объем материала; HV - твердость материала по Виккерсу; HB - твердость материала по Бринеллю; σ_B - предел прочности; σ_T - предел текучести и др.

Третья группа. Теплофизические характеристики материалов:

T_0 - исходная температура; ΔH_{TB} - энтальпия плавления материала в твердом состоянии; c - удельная теплоемкость материала (при температуре $T = 20 - 100^\circ C$); α_0 - коэффициент линейного теплового расширения; $\nu_0 = T_0 / 870$ - коэффициент неравномерности распределения плотности внутренней энергии материала элементов ПК в исходном состоянии [11];

$u_{e0} = ((0,067 \cdot HV)^{1,2} \cdot k_\sigma)^2 / (6 \cdot G)$ - начальное

значение плотности скрытой энергии дефектов; $k_\sigma = (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-2})^{-1}$ – комплексный структурный параметр [10].

Четвертая группа. Физические константы: постоянная Больцмана - $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; постоянная Планка - $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Блок 2. Расчет вспомогательных геометрических, кинематических и силовых характеристик ШПК (граничные условия):

- среднего диаметра D_0 , диаметров d_g , и d_n дорожек качения внутреннего и наружного колец ПК согласно [12, с.310-311];

- угловой ω_g и окружной v_g скорости вращения внутреннего кольца, угловой ω_0 , и окружной v_0 скорости сепаратора, угловой скорости $\omega_{ш}$ шарика вокруг своей оси согласно [12, с.310-311];

- максимальной нагрузки F_0 в наиболее нагруженном нулевом контакте шариков с внешним кольцом согласно [13, п.16.7].

Блок 3. Расчет параметров напряженного состояния деформируемого объема наружного кольца:

- размеров полуосей эллиптической площадки контакта шариков с наружным a_{n0} , и b_{n0} кольцом согласно [12, с.314-321];

- изменяющихся по отнулевому циклу максимального σ_{max} , главных $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, среднего гидростатического σ_0 , а также и интенсивности напряжений σ_i в нулевом контакте согласно [12, с.321], [14, с. 69] и [15, с. 116-118].

Блок 4. Расчет температур и физико-механических характеристик материала:

- температура разогрева локальных объемов [11]:

$$T_* = T_0 \cdot (3 \cdot \sigma_T)^2 / ((3 \cdot \sigma_T)^2 - \sigma_{maxj}^2);$$

- средняя температура деформируемого объема поверхностного слоя [11]:

$$T_f = T_0 + (T_* - T_0) / (44 \cdot v_0).$$

- если средняя температура $T_f > 100^\circ C$, то значения физико-механических характеристик $\mu(T_f), E(T_f), G(T),$

$K(T_f), \sigma_B(T), HB(T_f), HV(T_f), HRC(T_f), \sigma_r(T_f)$ определяются в функции температуры по известным для различных марок стали зависимостям согласно [16-19].

Блок 5. Расчет составляющих удельной энергии деформации объема материала наружного кольца ШПК при $T = T_f$ [10-11].

Коэффициент перенапряжения на межатомных связях:

$$\varphi_\sigma = k_\sigma \cdot v_0^{0,5}.$$

Удельная энергия изменения объема:

$$A_V(T) = \frac{\varphi_\sigma^2 \cdot \sigma_0^2}{2 \cdot K(T)}.$$

Удельная энергия формоизменения:

$$A_f(T) = \frac{\varphi_\sigma^2 \cdot \sigma_i^2}{6 \cdot G(T)}.$$

Коэффициент эквивалентности циклического и статического напряженного состояния:

$$M_r^2 = \sigma_T(T) \cdot (65 + 0,46 \cdot HV(T)) / \sigma_r^2(T).$$

Удельная энергия изменения объема в условиях эквивалентного статического растяжения при $\sigma = \sigma_p^{экв} = \varphi_\sigma \cdot M_r \cdot \sigma_{max}$:

$$A_V^0 = M_r^2 \cdot A_V.$$

Удельная энергия формоизменения в условиях эквивалентного статического растяжения:

$$A_f^0 = M_r^2 \cdot A_f.$$

Блок 6. Расчет энергии активации процесса повреждаемости структуры материала деформируемого объема материала наружного кольца [10-11].

Начальная энергия активации разрушения структуры при T_0 и $\sigma_p^{экв} = 0$:

$$U(p_{T_0}) = (-2,415 \cdot 10^{-28} \cdot T_0^3 + 5,955 \cdot 10^{-25} \cdot T_0^2 + 0,0121 \cdot 10^{-20} \cdot T_0 + 12,286 \cdot 10^{-20}) / V_{am}$$

Изменение энергии активации от температуры саморазогрева от $T = 0^\circ C$ до $T = T_f^\circ C$:

$$\Delta U_T = 1,5 \cdot \alpha_0 \cdot K(T) \cdot T.$$

Энергия активации процесса с учетом удельной работы изменения объема:

$$U(\sigma_0, T) = U(p_{T,0}) - \Delta U_T - A_V^0.$$

Блок 7. Расчет скорости процесса повреждаемости материала наружного кольца и ресурса ШПК (решение системы уравнений 2).

Критическая плотность скрытой энергии при $T = T_f$ [11]:

$$u_{e*} = \Delta H_{TB} - c \cdot \rho \cdot T.$$

Средний за время деформирования изделия до разрушения коэффициент сопротивления структуры материала Ле-Шателье [20]:

$$k_{cmp} = \frac{2 \cdot (u_{e*} - u_{e0})}{3 \cdot u_{e*} - u_{e0}}.$$

Средняя удельная скорость процесса повреждаемости материала с учетом сопротивления структуры по Ле-Шателье при $T = T_f$:

$$\dot{u}_e = k_{cmp} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot T}{h} \cdot U(\sigma_0, T) \times \exp\left(-\frac{U(\sigma_0, T)}{k \cdot T}\right) \cdot sh\left(\frac{A_f^0}{2 \cdot k \cdot T}\right).$$

Средний проектный ресурс ШПК по критерию контактной прочности наружного кольца:

$$t_* = \frac{u_{e*} - u_{e0}}{\dot{u}_e}.$$

Предложенный алгоритм позволяет исследовать влияние различных параметров, перечисленных в исходных данных, на величину проектного ресурса, исследуемого ПК без проведения дополнительных экспериментов, что выгодно отличает предложенный кинетический подход от однозначной экспериментальной зависимости для оценки ресурса по динамической грузоподъемности.

Заключение

1. На основе современных достижений физики и механики повреждаемости и разрушения твердых тел сформулированы основные теоретические принципы построения физико-математических моделей отказов подшипниковых опор качения на стадии их конструирования по критериям выносливости элементов.

2. В качестве примера решения краевой задачи предложенный подход реализован в виде подробного блочного алгоритма проектного расчета ресурса однорядных шариковых подшипников качения для заданных условий однозначности.

Библиографический список

- ГОСТ 3395-89 Подшипники качения. Типы и конструктивные исполнения.
- ГОСТ 18855-2013 Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальный ресурс.
- Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 308с.
- Структурно-энергетический подход к оценке фрикционной надежности материалов и деталей машин / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.) и др. // Материалы 66-й науч.-техн. конф.: сб. докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008.- Т.1.- С. 258-262.
- Структурно-энергетическая интерпретация взаимосвязи процессов трения и изнашивания / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов и др. // Процессы и оборудование металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр./ под ред. Платова С.И. Вып.8.- Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009.- С. 233-240.
- Модель процесса изнашивания трибосопряжений на основе термодинамического анализа их состояния / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), М.Г. Слободянский и др. // Материалы 68-й науч.-техн. конф.: сб. докл.– Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010.- С. 264-268.
- Прогнозирование показателей надежности трибосопряжений / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов(мл.), А.С. Губин и др. // Материалы 68-й науч.-техн. конф.: сб. докл.- Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010.- С. 262-264.
- Энерго-механическая концепция прогнозирования ресурса узлов трения по

- критерию износостойкости элементов / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, В.А. Русанов // Трение и износ, 2016. т.37. № 5. С.510-516.
9. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1974. 560с.
 10. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Издательство «Фан» УзССР, 1985. 165с.
 11. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел / В.В. Федоров; под ред. С.В. Федорова. - Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО "КГТУ", 2014.- Ч.III. Основы эргодинамики деформируемых тел.- 222с.
 12. Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник.-М.: Машиностроение, 1983.-543с.
 13. Иванов М.Н. Детали машин: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов.- 12-е изд. испр.- М.: Высш. шк., 2008.- 408 с.
 14. Пинегин С.В. Трение качения в машинах и приборах. М.: Машиностроение.1976. 261с.
 15. Сопротивление материалов, Н.М. Беляев, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука", 1976г., стр.608.
 16. Физика. Большой энциклопедический словарь.- М.: Большая Российская энциклопедия, 1999.- 460 с.
 17. Стали и сплавы. Марочник: справ. изд. / Сорокин В.Г., Герасьев М.А., Палеев В.С. и др. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
 18. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности). Справочник Гребеник В.М., Цапко В.К., "Металлургия", 1980.344с.
 19. Курсовое проектирование деталей машин: Учеб. пособие для учащихся машиностроительных специальностей техникумов / С.А Чернавский, К.Н. Бокков, И.М. Чернин и др.- 2-е изд. перераб. и доп.-М.: Машиностроение, 1988.-416с.
 20. Antsupov A.V.,(jr.), Antsupov A.V. and Antsupov V.P. Estimation and Assurance of Machine Component Design. Procedia Engineering 150 (2016) 726-733.



УДК 621.774.38

А.В. Выдрин, В.И. Кузнецов, К.Ю. Яковлева
 ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности»,
 г. Челябинск, Россия
 E-mail: secretariat@rosniti
 Дата поступления: 11.10.2016

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ПРИМЕНИМОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация

В статье приведены результаты экспериментального исследования трибологических параметров смазочного материала «Dexlube 498». Изучено влияние скорости волочения на изменение коэффициента трения при использовании смазочного материала «Dexlube 498». Показано, что увеличение скорости волочения до 70 м/мин позволяет уменьшить коэффициент трения в 1,5 раза. Результаты данного исследования использованы для численной оценки эффективности использования ресурса пластичности металла при оправочном волочении котельных труб наружным диаметром от 28 до 80 мм и толщиной стенки от 2 до 10 мм из углеродистой стали марок 10, 20, 12Х1МФ и др. по действующим маршрутам Синарского трубного завода. Показано, что за счет расширения диапазона применимости смазочного материала «Dexlube 498» имеется возможность повышения эффективности действующей технологии изготовления холоднодеформированных труб.

Ключевые слова: холоднодеформированные трубы, волочение труб, трибология, трибометр, смазочный материал, коэффициент трения, скорость волочения.

Введение

Современная технология изготовления холоднодеформированных труб обеспечивает выпуск технологически сложной продукции ответственного назначения, потребность в которой с развитием приоритетных отраслей машиностроения непрерывно увеличивается. Увеличение спроса требует решения задач по повышению производительности процессов холодной деформации. Одним из эффективных способов интенсификации производства является рациональное использование высокоэффективных смазочных материалов. Для процессов оправочного волочения труб выбор высокоэффективных смазочных материалов является актуальной задачей, так как определяет скорость процесса, износ инструмента и качество продукции.

На отечественных предприятиях наибольшее распространение получил способ волочения на удерживаемой цилиндрикоконической оправке, используемый главным образом для изготовления котельных труб. Применение удерживаемых оправок связано с трудностями процесса захвата смазочного материала и обеспечения благоприятных условий трения на контактных поверхностях. Указанные недостатки являются причиной получения задиров на внутренней поверхности труб. Решением указанных проблем является использование современных смазочных материалов в процессе

оправочного волочения, а именно жидких технологических смазок, не требующих нанесения подсмазочного покрытия [1, 2]. Отсутствие в технической литературе информации о коэффициентах трения, обеспечиваемых при их использовании, а также результатов исследований влияния условий волочения на изменение их трибологических свойств, снижает корректность инженерных расчетов силовых параметров волочения с использованием существующих методик. Таким образом, была поставлена задача проведения исследования по определению коэффициента трения скольжения при волочении труб на жидких смазочных материалах.

Основная часть

Коэффициент трения скольжения определяли путем моделирования процесса трения скольжения при волочении на специальном трибометре¹, элементом трибосопряжения в котором является пара «диск-палец» (см. рисунки 1, 2). Принцип работы трибометра заключается в следующем: в начальный момент приложения внешней нагрузки $P_{вн}$ палец 1 начинает контактировать с вращающимся диском 2, изменяя подводимый со стороны привода 3 крутящий момент M_{∂} . На контактной поверхности возникают силы трения $F_{тр}$ и соответственно крутящий момент $M_{тр}$.



Рисунок 1. Трибометр:

1 – палец; 2 – диск; 3 – привод; 4 – датчик

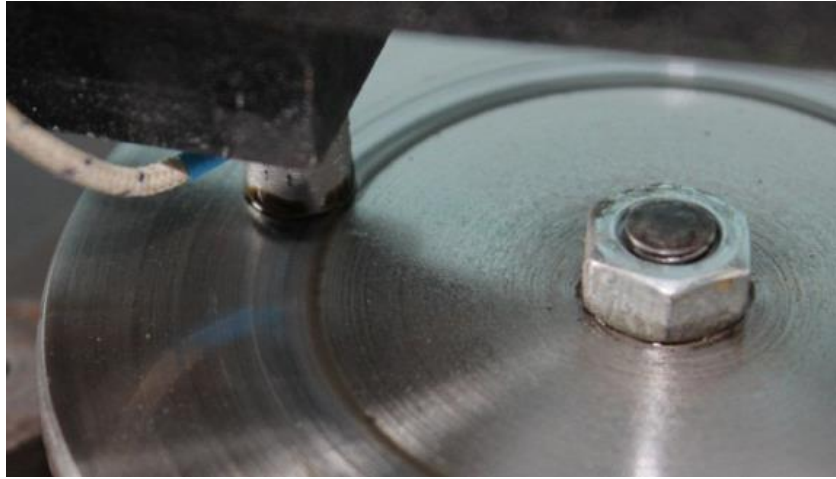


Рисунок 2. Зона контакта пары трения «диск-палец»

Принимая за основу зависимость, где коэффициент трения скольжения f определяется как отношение момента M_{mp} , создаваемого силой трения, к произведению усилия прижатия пальца к диску P_{mp} и радиус вектора r до точки приложения данного усилия:

$$f = \frac{M_{mp}}{P_{mp} \cdot r}, \quad (1)$$

была разработана методика расчета коэффициента трения применительно к рассматриваемой механической системе. Искомые составляющие были определены с использованием условия равновесия моментов сил. Таким образом, формула (1) была приведена к следующему виду:

$$f = \frac{0,3 P_0}{P_{mp}}, \quad (2)$$

где P_0 – усилие отклонения рычага трибометра, определяемое с помощью тензометрического датчика;

P_{mp} – усилие прижатия пальца к диску.

При этом P_{mp} зависит от внешней нагрузки $P_{вн}$ и может быть определено по формуле, полученной в результате тарировки:

$$P_{mp} = 2,53 P_{вн} + 21,2. \quad (3)$$

Особенностью использования трибометра для исследования трения скольжения является необходимость в предваритель-

ном математико-физическом моделировании, позволяющем на малогабаритных образцах лабораторного трибометра воспроизводить силовые и тепловые поля, характерные для различных условий трения, в частности для условий трения при волочении [3]. Данный способ моделирования основан на применении теории подобия, результатом которой являются аналитически полученные масштабные коэффициенты перехода от модели к натуре. Коэффициенты подобия используют для распространения на реальные производственные условия закономерностей и количественных данных, полученных на трибометре [3, 4].

Таким образом, для адаптации результатов, получаемых на трибометре к реальному процессу волочения, в качестве основного принципа подобия принят силовой, определяемый по следующей формуле:

$$\frac{P_{вол}}{P_{mp}} = \frac{F_1}{F_{обр}}, \quad (4)$$

где $P_{вол}$ – реальное усилие волочения;

P_{mp} – усилие прижатия пальца к диску;

F_1 – площадь поперечного сечения трубы на выходе из очага деформации;

$F_{обр}$ – площадь контактной поверхности пальца с диском.

¹ Трибометр – трибометрическое оборудование, используемое в лабораторных условиях для исследования трибологических свойств материалов

Отношение $\frac{P_{\text{вол}}}{F_1}$ представляет собой

напряжение волочения $\sigma_{\text{вол}}$, определяющее напряженное состояние металла трубы в очаге деформации при волочении и зависящее от таких параметров, как сопротивление пластической деформации, степень деформации, профилировка волочильного инструмента, условия трения на контактных поверхностях. Учитывая, что в большей степени из указанных определяющих параметров на $\sigma_{\text{вол}}$ оказывает влияние сопротивление металла пластической деформации, то условно отношение $\frac{P_{\text{вол}}}{F_1}$ можно представить в следующем виде:

$$\frac{P_{\text{вол}}}{F_1} = k_n \sigma_S, \quad (5)$$

где σ_S – сопротивление металла пластической деформации,

k_n – безразмерный коэффициент, зависящий от вида осуществляемого процесса деформации, относительных размеров, формы деформируемого металла и условий контактного трения.

Экспериментальное исследование по определению коэффициента трения было реализовано на примере использования реактивного смазочного материала «Dexlube 498», применяемого в действующем технологическом процессе изготовления холоднодеформированных труб Синарского трубного завода. Его использование позволяет исключить стандартную технологическую стадию процесса подготовки труб к холодной деформации – операцию фосфатирования. Также при степени деформации до 45% и скорости волочения до 40-60 м/мин обеспечивается достаточная стабильность процесса оправочного волочения без ухудшения качества труб ввиду отсутствия явления дрожания и налипания металла труб на волочильный инструмент [5].

Для действующих на Синарском трубном заводе маршрутов оправочного волочения котельных труб коэффициент k_n

принимает значения в интервале от 0,81 до 0,86. Таким образом, величина усилия $P_{\text{тр}}$ согласно равенству (4) должна находиться в интервале значений от 57,0 до 59,0 Н, а величина прилагаемой внешней нагрузки $P_{\text{вн}}$ согласно формуле (3) – в интервале значений от 14,0 и 15,0 Н. Таким образом, экспериментальное исследование проводили при постоянной нагрузке P_2 равной 14,7 Н.

Также, для качественного транспонирования результатов трибометрического эксперимента на реальный процесс волочения обеспечена соизмеримость скоростного режима, величин шероховатости контактных поверхностей и соответствие условий трения.

Соизмеримость скоростей обеспечивали путем задания частоты вращения диска. Согласно технической документации применение смазочного материала «Dexlube 498» ограничено скоростью волочения 40-60 м/мин. Для приближения к линейным скоростям волочения в действующем технологическом процессе Синарского трубного завода частоту вращения диска задавали равной 250 об/мин. Учитывая, что согласно технической характеристике труболоочильного стана максимальная скорость волочения составляет 75 м/мин, задача по определению коэффициента трения скольжения была расширена: дополнительно было реализовано исследование по определению коэффициента трения скольжения при частоте вращения диска 435 и 1 400 об/мин (согласно технической возможности трибометра).

Соизмеримость величин шероховатости поверхностей трубы и волочильного инструмента с шероховатостью инструмента трибометра обеспечивали путем полирования рабочих поверхностей технологического инструмента трибометра до значений шероховатости $R_a = 0,32$ мкм, что коррелирует с качеством подготовки поверхности труболоочильного инструмента – твердосплавных волоки и оправки. Измерение ше-

роховатости рабочих поверхностей инструмента реализовано с использованием профилометра Surftest SJ-201.

Соответствие условий трения между контактными поверхностями реализовывали путём использования, применяемого при оправочном волочении труб на Синарском трубном заводе смазочного материала «Dexlube 498» и воспроизведения технологии его нанесения [5].

Результаты исследования влияния частоты вращения диска на коэффициент трения приведены в таблице 1 в виде средних

значений коэффициентов трения в установленном режиме и на рисунке 3 в виде эмпирических кривых зависимости изменения коэффициента трения скольжения от времени.

Таблица 1. Средние значения коэффициента трения f в зависимости от частоты вращения диска ω

ω , об/мин	250	435	1 400
\bar{f}	0,0845	0,0610	0,0228

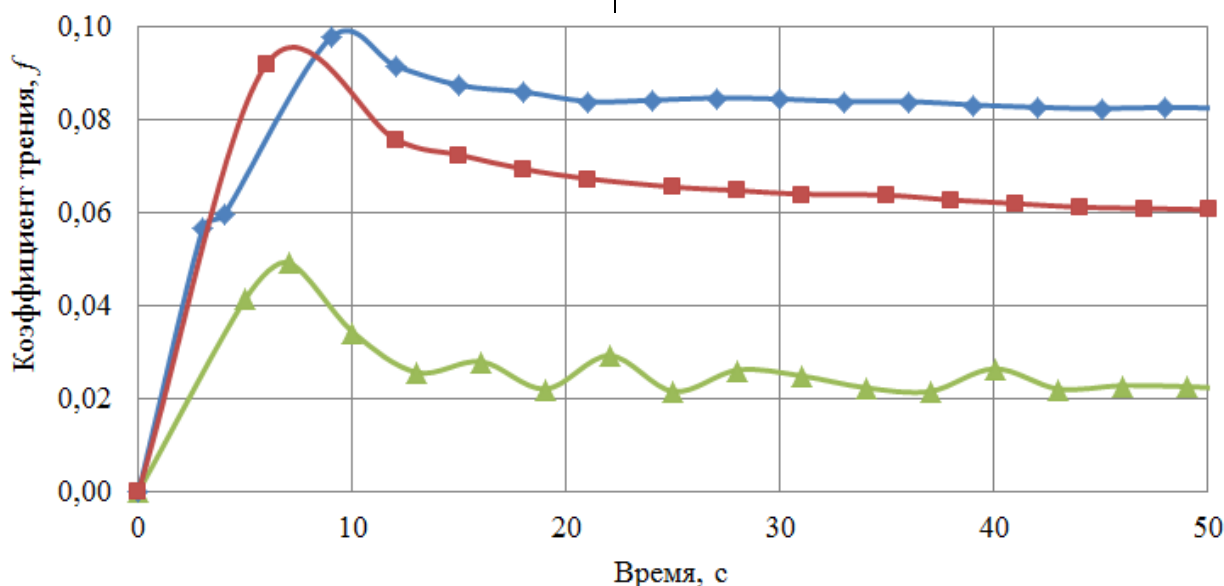


Рисунок 3. Эмпирические кривые зависимости изменения коэффициента трения скольжения f при величине $P_2 = 14,7$ Н и различной частоте вращения диска ω :

— $\omega=250$ об/мин; — $\omega=435$ об/мин; — $\omega=1400$ об/мин

Анализ экспериментальных данных показал, что почти при шестикратном увеличении частоты вращения диска коэффициент трения скольжения при использовании смазочного материала «Dexlube 498» в среднем уменьшается в 3,7 раза: от 0,0845 до 0,0228. При переходе к линейным скоростям получена эмпирическая скоростная зависимость изменения коэффициента трения (см. рисунок 4), характер которой согласуется с имеющейся в литературе информацией [6].

Используя резервы по увеличению скорости волочения на Синарском трубном заводе и полученную скоростную зависимость изменения коэффициента трения для смазочного материала «Dexlube 498» показано, что при скорости волочения 70 м/мин

коэффициент трения составит 0,0507. С использованием оригинальной математической модели определения напряженно-деформированного состояния при волочении [7] была выполнена численная оценка усилия волочения и действующих на волоку и оправку давлений при изменении коэффициента трения с 0,0845 до 0,0507. Согласно результатам численной оценки показано, что для самого напряженного маршрута изготовления труб способом оправочного волочения на Синарском трубном заводе уменьшение контактных давлений на технологический инструмент составит до 40% (см. рисунок 5), а усилия волочения – до 5%.

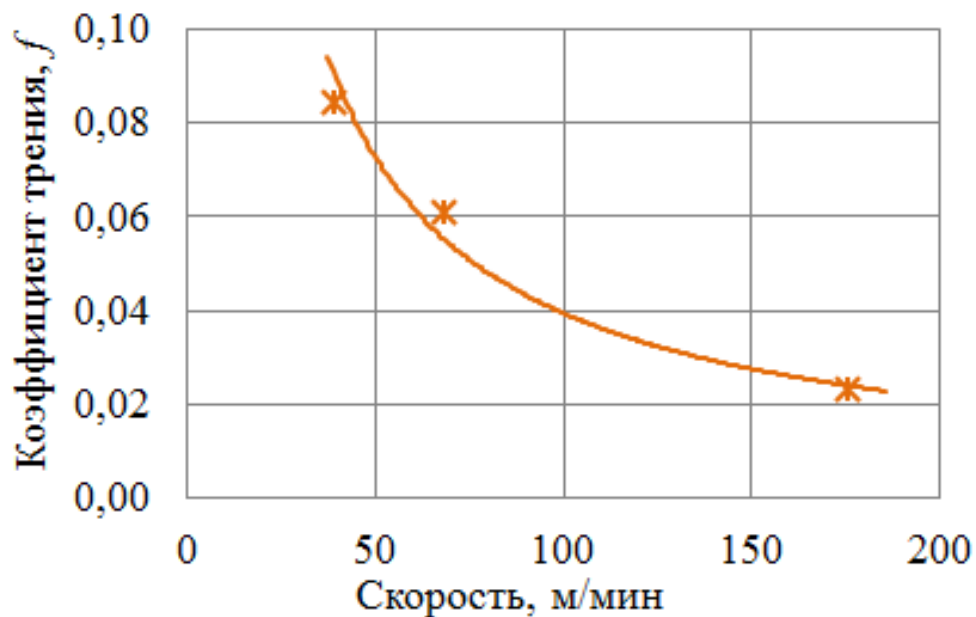


Рисунок 4. Эмпирическая скоростная зависимость изменения коэффициента трения при использовании смазочного материала «Dexlube 498»

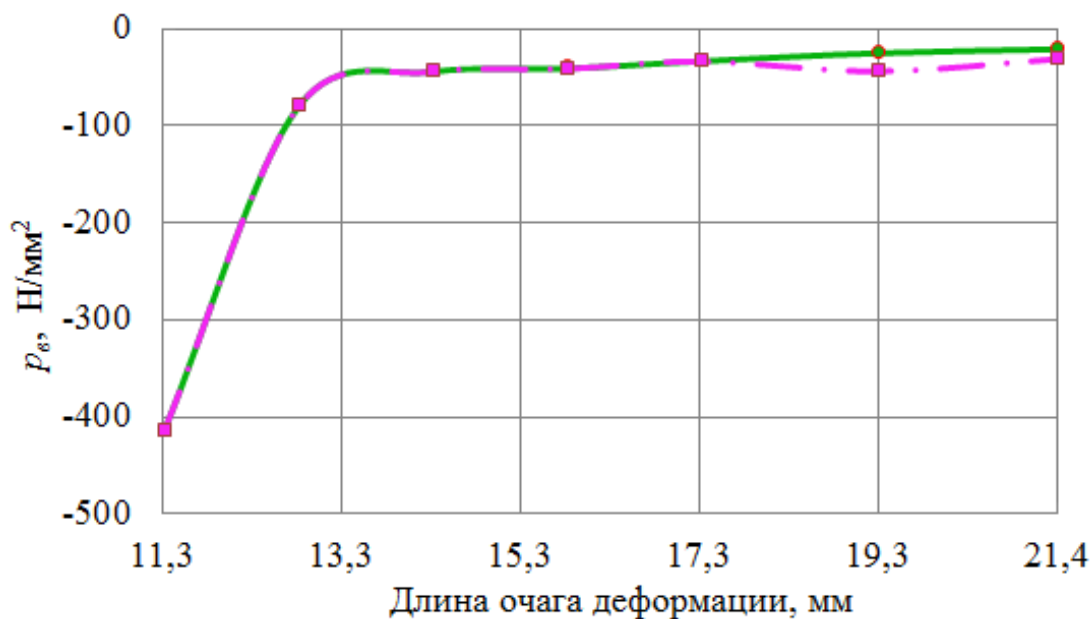


Рисунок 5. Распределение по длине очага деформации расчетных контактных давлений на волоку при увеличении скорости волочения

Результаты данной работы были использованы для численного исследования эффективности технологических маршрутов оправочного волочения котельных труб наружным диаметром от 28 до 80 мм и толщиной стенки от 2 до 10 мм из углеродистой стали марок 10, 20, 12Х1МФ и др. на Синарском трубном заводе. Оценка была выполнена с использованием коэффициента запаса прочности переднего конца

трубы при волочении K_3 . Коэффициент запаса K_3 представляет собой отношение истинного предела текучести стали σ_m к напряжению волочения $\sigma_{вол}$ [8]:

$$K_3 = \frac{\sigma_m}{\sigma_{вол}} \quad (6)$$

Для осуществления процесса волочения K_3 должен быть более 1,0. При этом значения

K_3 , близкие к 1,0 приводят к обрыву, увеличивая простои и уменьшая производительность. Значения K_3 много большие 1,0 свидетельствуют о недостаточном использовании ресурса пластичности и также уменьшении производительности [8].

Расчет силовых параметров оправочного волочения был выполнен с использованием разработанной математической модели [7], где коэффициенты трения на контактных поверхностях волоки и оправки с металлом трубы заданы согласно результатам проведенного экспериментального исследования.

Заключение

На основе численного анализа технологических маршрутов оправочного волочения котельных труб на Синарском трубном заводе сделаны следующие выводы. Действующие технологические режимы оправочного волочения котельных труб несовершенны – для установившегося процесса волочения тонкостенного сортамента расчетный K_3 составил 1,05. Данный факт свидетельствует о повышенной степени вероятности нарушения стабильности процесса волочения и необходимости уменьшения разовых деформации, что приведет к снижению производительности. При увеличении скорости волочения до 70 м/мин расчетный коэффициент K_3 увеличится до 1,24, что позволит сократить обрывы и связанные с этим простои, а совместно с уменьшением машинного времени стана – позволит увеличить производительность до 4 000 т/год. В свою очередь уменьшение коэффициента трения приведет к увеличению стойкости волочильного инструмента и соответственно уменьшению себестоимости труб. Таким образом за счет расширения диапазона применимости смазочного материала «Dexlube 498» имеется возможность повышения эффективности действующей технологии изготовления холоднодеформированных труб.

Библиографический список

1. Стасовский Ю.Н., Лукаш И.Н. Организационно-технологическая схема производства прецизионных труб целевого назначения в условиях мини-производства / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – №6. – С. 59-65.
2. Аронович А.В., Носарь В.Д., Сокуренок В.П. и др. Эффективные смазки для волочения прецизионных труб для цилиндров амортизаторов автомобилей / *Сталь*. – 1995. – №1. – С. 40-43.
3. Патент 2524298 Российская Федерация, МПК С 23 С 22/05, С 23 С 22/73. Способ химической обработки труб из углеродистых и низколегированных марок стали перед волочением / Грехов А.И., Гончаров В.С., Дегтярев А.В. и др. – №2012124310/02; заявл. 13.06.2012; опубл. 27.07.2014. Бюл. №21.
4. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
5. Чертавских А.К., Белосевич В.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением. – М.: *Металлургия*, 1968. – 364 с.
6. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справочник. – М.: *Металлургия*, 1982. – 312 с.
7. Выдрин А.В., Яковлева К.Ю. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке на основе совместного применения проекционного метода и метода конечных элементов / *Производство проката*. – 2016. – №1. – С. 26–33.
8. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: *Металлургия*, 1971. – 448 с.



УДК 620.171

**А.В. Алифанов^{1,2}, А.М. Милюкова¹,
В.В. Цуран², Н. В. Бурносав¹**

¹Государственное научное учреждение
«Физико-технический институт НАН Беларуси»,
г. Минск, Республика Беларусь

²Учреждение образования «Барановичский
государственный университет»,
г. Барановичи, Республика Беларусь

E-mail: alifanov_aav@mail.ru, annart@mail.ru

Дата поступления: 21.10.2016

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЭФФЕКТИВНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Аннотация

Исследованы свойства основных марок легированных сталей, используемых российскими, немецкими и другими производителями дереворежущего инструмента. Выявлены их структуры, химический состав, механические свойства. К особенностям процесса обработки древесины относится высокая скорость резания и наличие ударных нагрузок. Поэтому должно быть оптимальное сочетание твердости, приводящей к повышению хрупкости инструмента, и ударной вязкости, обеспечивающей отсутствие выкрашивания лезвий и образования трещин. К одним из эффективных методов увеличения стойкости ножей является использование упрочняющих технологий. Разработаны режимы упрочняющей термомеханической и магнитно-импульсной обработки дереворежущих ножей. Результаты исследований рекомендуются к практическому использованию.

Ключевые слова: легированная сталь, структура, химический состав, дереворежущий инструмент, твердость, ударная вязкость, упрочнение.

Введение

В Республике Беларусь практически отсутствует сырьевая база для производства инструментальных сталей, что предопределяет их рациональное использование путем повышения износостойкости и увеличения ресурса использования за счет применения упрочняющих технологий.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси разработана новая технология повышения прочностных свойств стальных изделий, как закаленных, так и не закаленных, путем воздействия сильным импульсным электромагнитным полем, которая обеспечивает повышение стойкости упрочненных стальных изделий до 3 раз.

Преимуществом магнитно-импульсной обработки по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры упрочнённых изделий не меняются; не требуются дополнительная термообработка, вакуумное, гальваническое и другое дорогостоящее оборудование, финишные операции; сам процесс

отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

Основная часть

Зарубежные изготовители ножей для рубительных машин используют легированные стали высокого качества, имеющие гораздо большую стоимость, чем, например, аналогичные стали, выпускаемые в России. При получении таких ответственных изделий, как рубильные ножи, подвергающихся большим ударным нагрузкам, фирмы-изготовители разрабатывают свои специальные методы термо- или термомеханической обработки, благодаря чему добиваются получения в готовых изделиях мелкодисперсной, однородной структуры, необходимого соотношения аустенита, мартенсита и карбидных включений. Все это и позволяет изготавливать дереворежущие (рубильные) ножи с высокими эксплуатационными характеристиками.

На деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь (ОАО «Ивацевичдрев», ОАО «Минскдрев», ЗАО «Холдингвая компания «Пинскдрев», ОАО «Барановичдрев», ОАО «ФанДОК», ОАО «Витебскдрев», ЗАО «Молодечномебель» и др.) подобраны образцы (20 шт.) отработавших рубильных ножей импортного производства (Германия, Чехия, Иран, Россия) для рубительных машин, используемых при получении технологической щепы.

Из полученных ножей методом электроэрозионной резки вырезаны образцы для изготовления шлифов для металлографических и дюраметрических исследований. Проведен химический анализ изготовленных образцов, по которому установлены марки стали, из которых они изготовлены. Исследованы механические свойства образцов (твердость, ударная вязкость) по стандартным методикам [1, 2]. На основании проведенных исследований подобраны российские аналоги сталей для изготовления ножей для рубки щепы, которые представлены в сводной таблице 1.

Твердость в основном зависит от содержания углерода, дисперсионного твердения, количества остаточного аустенита и др. Таким образом, задаваемая твердость может быть достигнута с помощью оптимизации химического состава, термообработки (закалка в зависимости от балла зернистого перлита), правильного выбора температуры и продолжительности отпуска.

При выборе марки стали для производства изделий предполагается наличие определенной связи между ее свойствами и показателями работоспособности инструмента. Важно установить соответствие механических свойств стали основным показателям: работоспособности инструмента, технологическим свойствам, форме и способу изготовления инструмента (штампруемость, обрабатываемость), стоимости и дефицитности материала (стали).

Одной из важных характеристик инструментальных сталей является вязкость, характеризующая сопротивление образованию трещин и разрушению под действием ударных нагрузок (обычно выражается величиной ударной вязкости, МДж/м²).

При высокой вязкости в сочетании с высокой прочностью предупреждается образование сколов (выкрашивание) и трещин. Наряду с определенными внешними факторами на вязкость сталей влияет множество внутренних факторов: химический состав, загрязняющие примесные компоненты, количество и качество включений, степень пластической деформации, величина зерен аустенита, количество, распределение, дисперсность карбидов и других фаз, внутренние напряжения. Авторами установлено, что на вязкость сталей, помимо термообработки, существенно изменяющей структуру, важное влияние оказывает технология их изготовления, а также способ выплавки и горячего деформирования.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси и Барановичском государственном университете разработаны новые импортозамещающие технологии изготовления рубильных ножей различных конфигураций, включающие оптимальные режимы термической обработки, а также термомеханической и магнитно-импульсной упрочняющих обработок [3].

После анализа химического состава и механических свойств сталей, приведенных в таблице 1, а также проведения исследований по определению механических свойств этих сталей [4, 5], для изготовления опытных образцов рубильных ножей была выбрана легированная сталь 6ХВ2С. Одной из целей работы было также получение высококачественных рубильных ножей из относительно дешевых сталей типа У8А с применением некоторых упрочняющих технологий.

При изготовлении ножей использовали оптимальные режимы упрочняющей магнитно-импульсной обработки (МИО) и термомеханической обработки (ТМО). Исследованы механические свойства изготовленных ножей (твердость, ударная вязкость) по методикам в соответствии с ГОСТ 9013, ГОСТ 9454 [1, 2]. Твердость ножей находится в интервале 50-57 HRC, ударная вязкость – 12-20 Дж/см², что соответствует лучшим образцам импортных рубильных ножей.

Химический состав и свойства сталей, из которых изготовлены импортные ножи рубительных машин

№ образца	Страна-производитель, фирма	Марка стали	Аналогичная марка стали	Массовая доля легирующих элементов, %										Твердость, HRC	Ударная вязкость, Дж/см ²
				C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	S	P	Mo	W		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1, 11	Германия	Din, 1.3355	X6BФ	0,48	0,82	0,46	7,96	0,07	0,26	-	0-0,025	1,10	-	52,0–54,0	17
2, 16	Чехия, Pilana	Din 1.3355	7X3 8X3 6XC 75XM 75XCMФ75XMФ	0,65–0,80	1,09	0,47	3,88	-	0,28–0,3	-	-	0,71	-	59,0–60,0	19
3, 17	Россия,	65Г	70, У8А, 70Г 60С2А 9ХС 50ХФА 60С2 55С2 Din66Mn4	0,71	0,28	1,04	0,08	0,07	0,04	-	-	-	-	54,0–56,0	16
4, 18	Иран	Din 1.2344	4X5MФC	0,39	0,84	0,41	7,56	0,07	0,23	-	-	1,20	-	52,0–54,8	18
5, 19	Россия	У8А	Din 1.1525 C80W1	0,75–0,84	0,28	0,17–0,28	0,23	0,17	0,12–0,25	0-0,018	0-0,025	0,02	-	57,0–59,0	19
6	Россия, ГМЗ	65С2ВА	60С2А 60С2ХА PN65S2WA	0,61–0,69	1,7	0,7–1	0,30	0,20	0–0,2	0-0,025	0-0,025	-	0,9	59,0–60,0	15
7	Россия	ХВГ	9ХС, ХГ, 9ХВГ ХВСГ ШХ15СГ Din 1.2419 WNr 105WCr6	0,9–1,05	0,1–0,4	0,8–1,1	0,9–1,2	0,30	0-0,35	0-0,03	0-0,03	0,2	1,33	57,0–59,0	11
8	Россия	9ХС	ХВГ ХВСГ WNr 150Cr14 90CrSi	0,85–0,95	1,2–1,6	0,3–0,6	0,95–1,25	0,20	0-0,35	0-0,03	0-0,03	-	0,1	59,0–60,0	15
9	Россия	X12MФ	X6BФ X12Ф1 X12BM Din 1.2379	1,48	0,40	0,33	11,8	0,26	0,30	-	-	0,53	-	56,0–58,0	13
10, 13	Россия, Станкодеталь	6ХС	Din 60MnSi4	0,6–0,7	0,6–1	0,15–0,45	1–1,3	до 0,3	до 0,4	до 0,03	до 0,03	до 0,2	до 0,2	60,0–61,0	13
12, 15	Россия	5ХНВС	Din55NiCrMoV6	0,5–0,6	0,6–0,9	0,3–0,6	1,3–1,6	до 0,3	0,8–1,2	до 0,03	до 0,03	-	-	52,0–54,0	18
13, 14	Россия	6ХГМНФТ	-	0,5–0,6	0,6–0,9	0,3–0,6	1,3–1,6	до 0,3	0,8–1,2	до 0,03	до 0,03	-	-	59,0–60,0	19
20	Россия	6ХВ2С	6Х3ФC 5ХВ2СФ DIN17350 WNr 60WCrV7 55WCrV8	0,55–0,65	0,5–0,8	0,15–0,45	1–1,3	до 0,3	до 0,4	до 0,03	до 0,03	0,6–0,9	2,2–2,7	60,0–63,0	20

Исследование структурно-фазового состава образцов, вырезанных из ножей, показало, что они имеют структуру нижнего бейнита, что повысило вязкость стали. Материал опытных ножей, упрочненных ТМО, имеет текстурированную мелкодисперсную структуру с выделенными мелкими карбидами (рис. 1, а), а образцы, упрочненные МИО – имеют уплотненный поверхностный слой (рис. 1, б), что обеспечивает высокие прочностные свойства ножей в обоих случаях.

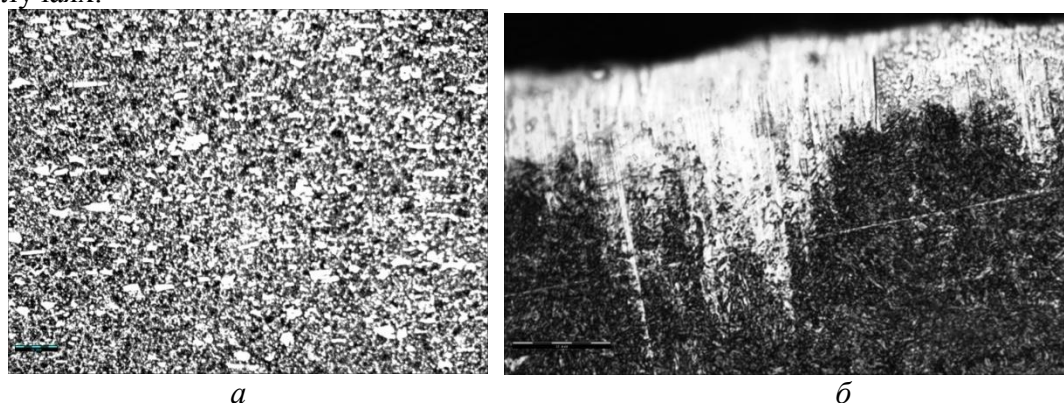


Рисунок 1. Микроструктура стали У8А: а – упрочненной ТМО, б – упрочненной МИО

Повышение прочности стальных ножей после ТМО объясняется тем, что в результате деформации из аустенитного зерна образуются более мелкие пластинки мартенсита. Кроме того, при деформации дробится блочная структура аустенита и углерод выделяется в виде дисперсных карбидов. При ТМО образуется более мелкодисперсная, однородная структура, чем при обычной термообработке.

Испытания опытных партий ножей, изготовленных из сталей марок У8А и 6ХВ2С, проводили в производственных условиях на различных деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь и России. После испытаний ножей исследовали характер их износа и изменения геометрических параметров, проведены замеры радиуса затупления по всей длине в трех сечениях, который находится в интервале 50–60 мкм.

Анализ результатов проведенных исследований износа ножей показал, что изготовление ножей с применением предлагаемых упрочняющих технологий позволяет снизить интенсивность износа и затупления режущих кромок ножей по сравнению с ножами, изготовленными с применением только термообработки, причем при помощи МИО высокие эксплуатационные свойства изделия (стойкость), не уступающие ножам из высоколегированных сталей,

можно получить, используя дешевые углеродистые стали (например, У8А).

На рисунке 2 представлены магнитно-импульсные установки с различными электрофизическими характеристиками, изготовленные в Физико-техническом институте НАН Беларуси (г. Минск). Они имеют различные технические характеристики: максимальная запасаемая энергия 6–12 кДж, максимальное зарядное напряжение 5,5–6 кВ, емкость накопителя 450–750 мкФ, оснащаются плоскими и цилиндрическими индукторами для обработки изделий различной формы. Для обработки плоских деревообрабатывающих ножей использовали плоские индукторы.

Технология упрочнения готовых стальных деревообрабатывающих ножей путем воздействия сильным импульсным электромагнитным полем обеспечила повышение их периода стойкости в зависимости от марки стали в 1,5–3 раза.

Преимуществом магнитно-импульсной обработки по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры упрочнённых изделий не меняются, не требуются дополнительная термообработка, вакуумное, гальваническое и другое дорогостоящее оборудование, финишные операции, сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.



Рисунок 2. Оборудование, изготовленное в Физико-техническом институте НАН Беларуси для упрочняющей магнитно-импульсной обработки

Анализ рынка зарубежных поставщиков сталей показывает, что со стороны западных фирм идет демпинговая война с российскими производителями, в результате чего ножи западного производства продаются дешевле российских, хотя недавно (2012-2014 гг.) было наоборот. Поэтому белорусские потребители все чаще выбирают изделия западных фирм.

Отсюда можно сделать вывод, что российские производители инструментальных сталей, чтобы выиграть навязанную Западом конкурентную борьбу, должны также снизить цены на выпускаемые стали.

Заключение

В результате проведенных исследований механических свойств импортных дереворежущих (рубильных) ножей установлено, что хотя твердость и является важнейшей характеристикой инструментальных сталей, не всегда следует добиваться ее повышения, поскольку при росте твердости зачастую снижаются прочность металла. При определенных соотношениях вязкости и твердости предупреждается образование трещин и сколов (выкрашивание), значительно повышается период стойкости ножей. Наряду с внешними факторами (прежде всего свойствами обрабатываемых древесных материалов, параметрами процесса рубки), на прочность стальных ножей влияет множество внутренних факторов материала: химический состав, загрязняющие примесные компоненты, количество и качество инородных включений, соотношение аустенита, мартенсита, цементита, а также дисперсность и однородность структуры, остаточные внутренние напряжения. Это значит, что на прочность сталей, помимо термообработки, существенно изменяющей структуру, важное влияние оказывает технология изготовления изделий. Стали, не обладающие достаточной вязкостью, нельзя использовать для изготовления инструмента, работающего при значительных динамических нагрузках (например, при рубке мерзлой древесины).

Проведенные исследования позволяют утверждать, что российские производители инструментальных сталей могли бы насытить белорусский рынок доступными

по цене марками сталей для производства дереворежущего инструмента. Однако, маркетинговый анализ рынка сталей, предлагаемых в Республике Беларусь, показывает, что цены на инструментальную сталь из Германии оказываются ниже цен российских производителей.

Результаты исследований могут быть положены в основу международного сотрудничества по поставке высоколегированных сталей для инструментального производства.

Библиографический список

1. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – Введ. 01.01.1969. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1989. – 11 с.
2. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 01.01.1979. – М.: ИПК издательство стандартов, 1989. – 9 с.
3. Алифанов А.В., Милюкова А.М., Цуран В.В. Разработка импортозамещающей технологии изготовления рубильных ножей для производства технологической щепы / Перспективные материалы и технологии: коллективная монография, гл. 25. В 2т. Т1 / под ред. В.В. Клубовича. – УО «ВГТУ», Витебск, 2015. – С.277–299.
4. Алифанов А.В., Милюкова А.М., Цуран В.В. Исследование химического состава и механических свойств рубильных ножей зарубежного производства // Литье и металлургия. – 2015. – №1 (78). – С. 105–113.
5. Милюкова, А.М. Исследование физико-механических свойств и проведение производственных испытаний рубильных ножей, изготовленных по импортозамещающим технологиям / А.М. Милюкова, Н.В. Бурносков, В.В. Цуран // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки: материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16-18 сентября 2015г. – Минск, 2015. – Т.2 – С 221 – 228.



ДИАГНОСТИКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ СЛУЖБЫ ПОЛЫХ РОЛИКОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Аннотация

Предложена методика диагностики температурных условий эксплуатации полых роликов машин непрерывного литья заготовок по максимальной температуре поверхности роликов. Максимальная температура бочки ролика определяется с учетом величины и характера тепловой нагрузки, угловой скорости вращения, расхода и температуры охлаждающей жидкости, состава и концентрации накипеобразователей в охлаждающей жидкости.

Наибольшую опасность для роликов представляет сочетанное действие высокой температуры охлаждающей жидкости на входе в ролик, падение давления в системе охлаждения роликов и использовании для охлаждения роликов жесткой воды

Методика может быть использована для выявления критических температурных условий эксплуатации роликов МНЛЗ.

Ключевые слова: МНЛЗ, ролик, температура, теплообмен, охлаждение, канал охлаждения, накипь.

Введение

В соответствии с «Правилами технической эксплуатации механического оборудования машин непрерывного литья заготовок» [1] система охлаждения роликов должна обеспечивать температуру поверхностного слоя бочки не вызывающую выход состояния материала за пределы упругой области (~ 650 °С), а температуру поверхности канала охлаждения – парение охлаждающей жидкости (~ 100°С). Поэтому к выбору температурных условий службы роликов, поддержанию их на проектном уровне предъявляют очень высокие требования, так как они определяют нормальную работу МНЛЗ, ее производительность и качество готовых заготовок. В настоящее время срок службы роликов отечественных МНЛЗ весьма ограничен и составляет для большинства роликов около полугода [2,3].

В производственной практике применяется визуальное наблюдение за состоянием поверхности канала охлаждения и поверхности бочки и контроль величины износа бочки и прогиба роликов во всех слу-

чаях остановок и проверок МНЛЗ. Критериями замены роликов является износ поверхности более 2 мм, прогиб роликов - 1,0 мм/м и наличие на бочке ролика кольцевых и продольных трещин глубиной от 1 до 3 мм [1]. Внешний осмотр позволяет своевременно выявлять неисправности и предельные дефекты роликов: сетку разгара на бочке ролика, величину износа бочки и шеек ролика, остаточный прогиб бочки и разрушение подшипников, оценивать толщину и состав отложений на поверхности канала охлаждения. Однако внешний осмотр роликов только констатирует возникающие повреждения, а ролики продолжают работу в неблагоприятных условиях. А поскольку причины возникновения ранних дефектов в большинстве случаев не устраняются, то по достижении критериев дефектов своих предельных значений ролики заменяются. Такую раннюю замену роликов можно предупредить, если внешний осмотр роликов дополнить диагностикой температурных условий службы полых роликов МНЛЗ, учитывающей параметры работы системы охлаждения роликов и

условия их взаимодействия со слитком. Целью данной работы является разработка метода диагностики температурных условий службы полых роликов машин непрерывного литья заготовок по максимальной температуре бочки ролика.

Основная часть

При длительной эксплуатации роликов машин непрерывного литья заготовок (даже при соблюдении технологической дисциплины) неизбежно возникают нарушения в условиях их охлаждения, обусловленные изменениями температуры и расхода охлаждающей жидкости, условий теплового взаимодействия ролика со слитком, а также ростом отложений на поверхности канала охлаждения. Эти нарушения в условиях охлаждения вызывают временное или постоянное повышение температуры бочки до значений температуры отпуска материала роликов (~ 650°C) и выше. Возникающий перегрев металла увеличивает износ бочки, способствует появлению сетки разгара и, следовательно, значительно сокращает срок их службы. Наибольшие изменения температуры на поверхности ролика наблюдаются в зоне контакта ролика со слитком на установившемся режиме работы. Максимальная температура поверхности ролика наблюдается на выходе его из зоны контакта со слитком ($\varphi = \varphi_0$), а минимальная температура – на входе ролик в зону контакта ($\varphi = -\varphi_0$). Поэтому диагностике критического температурного режима эксплуатации ролика удобно проводить по температуре поверхности ролика на выходе его из зоны контакта со слитком.

В основу метода диагностики критического температурного режима службы полых роликов МНЛЗ по максимальной температуре поверхности положен постоянный или периодический контроль расхода охлаждающей жидкости через ролик, ее химического состава, температуры жидкости на входе и выходе из ролика, температуры поверхности слитка на входе в ролик и химического анализа состава отложений на поверхности канала охлаждения ролика. Для контроля этих параметров могут быть использованы штатные приборы машины непрерывного литья заготовок.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что температурное поле роликов машин непрерывного литья заготовок условно можно разделить на две составляющие: осесимметричную и неосесимметричную. При этом максимальная температура бочки в зоне контакта ролика со слитком на установившемся режиме работы определяется выражением [4,5]:

$$t(\varphi_0) = t_2 + q_2 \cdot \frac{R_2}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{\sqrt{Pd}} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\sqrt{n}} \cdot \sin n\varphi_0 \cdot \cos \left[n\varphi_0 - \frac{\pi}{4} \right], \quad (1)$$

где t_2 – осесимметричная составляющая температуры поверхности бочки ролика; q_2 – плотность теплового потока в зоне контакта ролика и слитка; R_2 – радиус бочки ролика; $Pd = \omega \cdot R_2^2/a_2$ – критерий Предводителя; ω – угловая скорость вращения ролика; a_2 – коэффициент температуропроводности материала ролика; λ_2 – коэффициент теплопроводности материала ролика; $2\varphi_0$ – угол контакта ролика со слитком.

Осесимметричная составляющая температуры поверхности бочки ролика формируется под действием осесимметричной составляющей теплового воздействия. На установившемся тепловом режиме работы при известной толщине слоя накипи на поверхности канала охлаждения осесимметричная температура рабочей поверхности ролика определяется из уравнения [6]:

$$t_2 = t_{ж} + \frac{Q}{\pi \cdot L} \left(\frac{1}{\alpha \cdot (d_1 - \delta)} + \frac{1}{2\lambda_n} \cdot \ln \frac{d_1}{(d_1 - \delta)} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \right), \quad (2)$$

где $t_{ж}$ – средняя по длине канала охлаждения температура воды; Q – тепловой поток; α – коэффициент теплоотдачи; λ_n – коэффициент теплопроводности накипи; δ – толщина слоя накипи; d_1 – диаметр канала охлаждения ролика; d_2 – наружный диаметр бочки ролика; L – длина бочки ролика.

В соотношении (2) принято, что время наступления установившегося теплового состояния ролика значительно меньше времени роста накипи. Тепловой поток на по-

верхности канала охлаждения Q определяется по расходу и температуре охлаждающей воды на входе и выходе из ролика.

Для случая использования жесткой воды с большим количеством накипеобразователей прогноз толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения ролика можно сделать по соотношению [7]:

$$\delta(\tau) = \frac{D}{\Delta \cdot \gamma_n} \cdot (C - C_n) \cdot \tau, \quad (3)$$

где D - коэффициент диффузии; Δ - толщина теплового пограничного слоя; γ_n - плотность накипи; C, C_n - концентрация накипеобразователя в осевой части потока и около поверхности канала охлаждения; τ - время.

В соотношении (3) применяется линейная зависимость, описывающая процесс роста толщины слоя накипи во времени, поскольку она позволяет прогнозировать предельную толщину слоя накипи, требующую обязательную очистку поверхности канала охлаждения ролика. Для практических приложений наибольший интерес представляет исследование влияние динамики роста накипи на максимальную температуру рабочей поверхности, а, следовательно, на планируемый срок службы роликов (т.е. время достижения максимальной температуры поверхности ролика своего критического значения).

Неосесимметричная составляющая температуры рабочей поверхности бочки ролика с внутренним охлаждением формируется, в основном, под действием неосесимметричной составляющей теплового воздействия в зоне контакта ролика со слитком. Плотность теплового потока, выходящего из слитка и поступающего в ролик в зоне контакта, определяется по формуле [7,8]:

$$q_2 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \omega}{2\varphi_0}} \cdot (t_1 - t_2), \quad (4)$$

где $\varepsilon_1 = \lambda_1 / \sqrt{a_1}$ и $\varepsilon_2 = \lambda_2 / \sqrt{a_2}$ - тепловая активность материала слитка и ролика; λ_1, a_1 - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материала слитка; t_1 - температура поверхности слитка на входе в ролик.

Неосесимметричная составляющая теплового воздействия формирует максимальную и минимальную температуру на поверхности ролика. Соотношение между максимальной и минимальной температуры поверхности за время оборота определяет стойкость ролика против образования сетки разгара. С увеличением угловой скорости вращения и выравнивания тепловых воздействий по образующей ролика температура по образующей ролика выравнивается.

Используя соотношения (1 – 4) произведем оценку влияния температуры воды на входе в ролик, интенсивности охлаждения и накипеобразования на поверхности канала охлаждения на максимальную температуру поверхности. Для проведения расчетов принято: материал ролика - сталь 25X1МФ, материал слитка - углеродистая сталь; $t_1 = 950^\circ\text{C}$; $\omega = 53 \cdot 10^{-3} \text{ 1/c}$; $R_2 = 0,19\text{M}$; $R_1 = 0,045\text{M}$; $2\varphi_0 = 0,042 \text{ рад}$; $\lambda_1 = 29,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_2 = 40 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_n = 1,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\gamma_n = 2710 \text{ кг/м}^3$ - плотность накипи; $a_1 = 5,83 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $a_2 = 11,59 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $t_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$ - температура воды на входе в ролик; $t_{\text{вых}} = 29^\circ\text{C}$ - температура воды на выходе из ролика; $G = 2,25 \text{ кг/с}$ - расход охлаждающей жидкости; $\delta = 0 \text{ мм}$ толщина слоя накипи. Кольцевой канал охлаждения ролика полностью заполнен охлаждающей жидкостью. Угол контакта ролика со слитком по данным расчётно-конструкторской лаборатории НИИтяжмаша и УПИ может находиться в диапазоне $2 \dots 7^\circ$ [9].

Для принятых условий тепловой поток воспринимаемый охлаждающей жидкостью составляет $84,7 \cdot 10^3 \text{ Вт}$, коэффициент теплоотдачи от поверхности канала охлаждения к жидкости - $2280 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Максимальная температура поверхности ролика составляет 619°C . Расчет максимальной температуры поверхности ролика выполнен по соотношению (1) согласуется с расчетом температуры зоны контакта системы ролик – металл по соотношению, полученному из решения системы одномерных дифференциальных уравнений в частных производных при граничных условиях IV рода [8].

Влияние температуры воды на входе в ролик. Изменения температуры воды на входе в ролик обусловлены, в основном, сезонными колебаниями температуры. В холодный период года температура охлаждающей воды на входе в ролик уменьшается, а в теплый период года – увеличивается. На рис. 1. показана зависимость максимальной

температуры поверхности бочки от температуры охлаждающей жидкости на входе в ролик. С повышением температуры охлаждающей жидкости на входе в ролик максимальная температура поверхности ролика увеличивается. При температуре воды на входе в ролик $t_{вх} = 15^{\circ}\text{C}$ максимальная температура поверхности составит 617°C , а для $t_{вх} = 30^{\circ}\text{C}$ - 625°C .

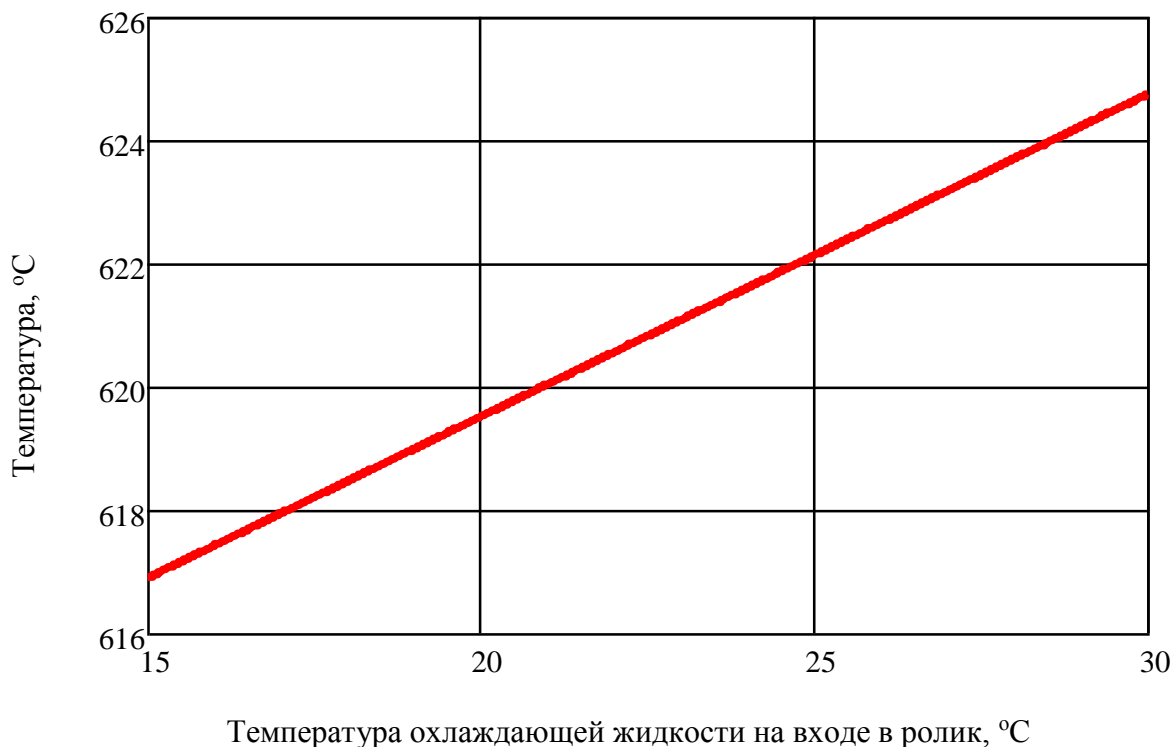


Рисунок 1. Зависимость максимальной температуры поверхности бочки от температуры охлаждающей воды на входе в ролик

Влияние интенсивности охлаждения на поверхности канала. Изменения коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения могут быть обусловлены, например, падением давления в системе охлаждения роликов. На рис. 2. показана зависимость максимальной температуры поверхности ролика от коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения. С понижением коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения максимальная температура поверхности ролика увеличивается. При значении коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения $\alpha = 1100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ максимальная температура поверхности ролика достигает своего критического значения

($\sim 650^{\circ}\text{C}$). С увеличением интенсивности охлаждения максимальная температура поверхности ролика уменьшается.

Влияние накипи на поверхности канала охлаждения. При проектировании систем охлаждения и оценке теплового состояния роликов металлургических машин термическое сопротивление слоя накипи обычно принимается величиной постоянной во времени, а чаще - равной нулю. При этом не принимается во внимание тот факт, что в начальный период эксплуатации ролика канал охлаждения чистый и работает в условиях, резко отличающихся от условий конечного периода эксплуатации. Толщина и характеристики слоя накипи на поверхно-

сти охлаждения являются функцией времени и изменяющихся величин: состава воды, режима движения воды и температуры поверхности охлаждения и тепловой нагрузки. Накипь на поверхности охлаждения образуется в результате сложных физико-химических процессов и при понижении растворимости солей с повышением температуры воды, приводящих к образованию нерастворимых соединений. Накипь,

возникающая на поверхности канала охлаждения, имеет высокие механические свойства и низкий коэффициент теплопроводности. Например, по данным работы [2] слой накипи толщиной 0,5 мм может вызвать повышение температуры рабочих поверхностей роликов до 735 °С. На рис. 3. показана зависимость максимальной температуры поверхности ролика от толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения.

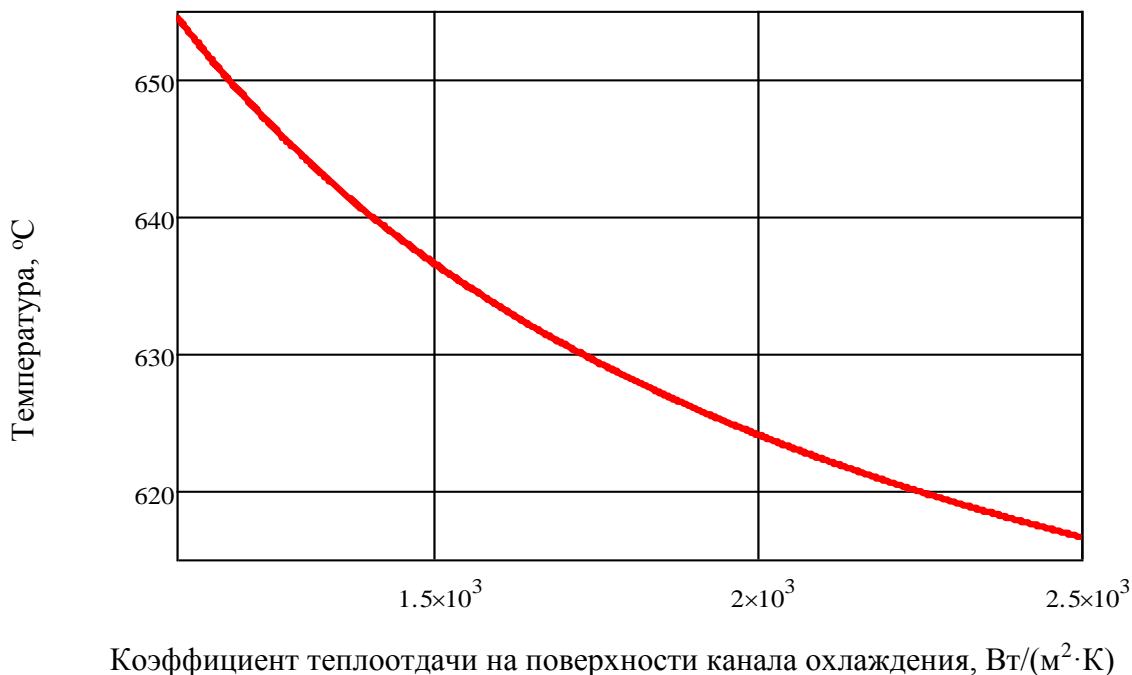


Рисунок 2. Зависимость максимальной температуры поверхности ролика от коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения

С увеличением толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения максимальная температура поверхности ролика увеличивается. При значении толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения $\delta = 1,35$ мм максимальная температура поверхности ролика достигает своего критического значения (650°С).

Кроме того, непрерывно растущий слой накипи на поверхности канала охлаждения нарушает гидродинамический режим.

В настоящее время для снижения интенсивности накипеобразования на поверхности канала охлаждения для охлаждения роликов применяется химически очищенная вода, имеющая карбонатную жесткость

0,7 мг-экв/л. Основное вещество, образующее накипь на охлаждаемых поверхностях - карбонат кальция. Для выбранных значений параметров работы ролика и качества применяемой воды скорость образования толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения роликов, определенная по соотношению (3), составляет $7,8 \cdot 10^{-2}$ мм/мес. Время достижения максимальной температуры поверхности ролика своего критического значения составит ~17 мес. Толщина теплового пограничного слоя оценивается с использованием формулы Нуссельта-Крауссольда, а коэффициент диффузии в охлаждающей жидкости определяется по формулам Стокса и Эйнштейна.

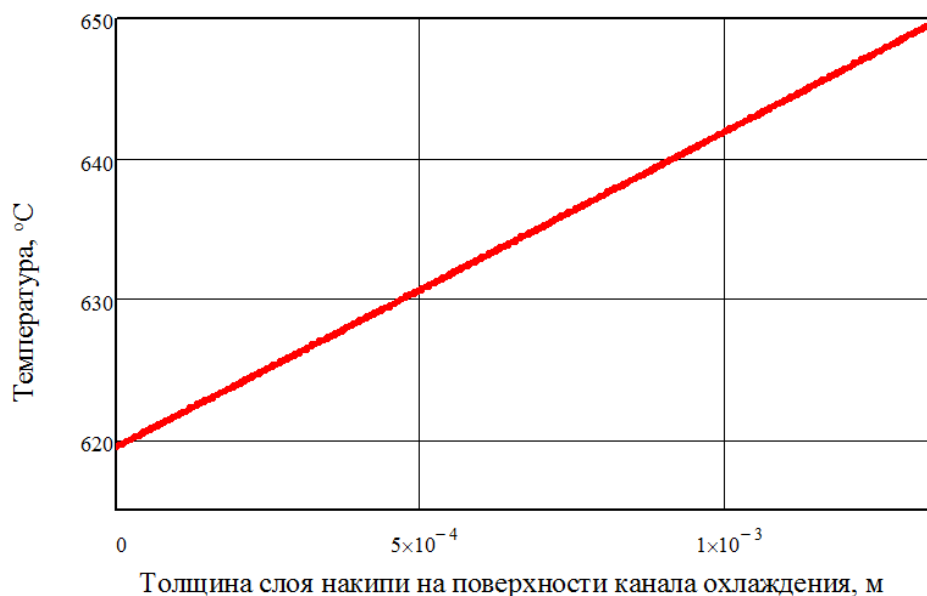


Рисунок 3. Зависимость максимальной температуры поверхности ролика от толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения.

Наибольшую опасность для роликов представляет сочетанное действие высокой температуры охлаждающей жидкости, падение давления в системе охлаждения роликов и использовании для охлаждения роликов жесткой воды. При выборе допустимого перепада температур ($t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}$) в охлаждающей жидкости следует учитывать процесс накипеобразования в канале роликов. В пределах температур $t = 20 \dots 60^\circ\text{C}$ растворимость в воде соединений кальция и магния (CaSO_4 , CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$) изменяется не очень существенно. В связи с этим во избежание интенсивного накипеобразования на поверхности канала охлаждения температура охлаждающей воды, покидающая ролик, не должна превышать $50 \dots 60^\circ\text{C}$. В реальных условиях следует стремиться к тому, чтобы, нагрев воды в ролике не превышал $20 \dots 25\text{K}$. Это требование выполняется определенным выбором сечения кольцевого канала охлаждения и скорости течения охлаждающей воды [10].

Заключение

Результаты представленных исследований позволяют заключить следующее:

- предложена методика диагностики температурных условий эксплуатации полых роликов машин непрерывного литья

заготовок по максимальной температуре поверхности роликов;

- предлагаемая методика диагностики температурных режимов эксплуатации роликов по максимальной температуре поверхности позволяет повысить эффективность и надежность работы роликов и МНЛЗ в целом;

- наибольшую опасность для роликов представляет сочетанное действие высокой температуры охлаждающей жидкости, падение давления в системе охлаждения роликов и использовании для охлаждения роликов жесткой воды;

- использованные в настоящей работе методы и полученные результаты могут быть применимы к проектированию новых и анализу работы существующих систем охлаждения роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), выбору материала для их изготовления и прокатных валков непрерывных широкополосных станков горячей прокатки (НШСГП) и организации временных и скоростных режимов разлива или прокатки.

Библиографический список

1. Правила технической эксплуатации механического оборудования машин непрерывного литья заготовок. – М.: Металлургия, 1991. – 219с.

2. Буланов, Л.В. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет/Буланов, Л.Г. Корзунов, Е.П. Парфенов, Н.А. Юровский, В.Ю. Авдонин, под общей редакцией Г.А. Шалаева. - Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы. - 2003. - 320с.
3. Ловчинский, Э.В. Эксплуатационные свойства металлургических машин/Э.В. Ловчинский, В.С. Вагин. - М.: Металлургия. - 1986. - 160с.
4. Телин, Н.В. Динамика неосесимметричного температурного поля полого вращающегося цилиндра/Н.В. Телин, Н.И. Шестаков // Теплоэнергетика.- 2005. - №.8 - С.72-76.
5. Телин, Н.В. Оценка температурных условий службы роликов металлургических машин в условиях накипеобразования/Н.В. Телин, Н.Н. Синицын//Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия. - 2016.- №59(7). -С.465-469.
6. Исаченко, В.В. Теплопередача/В.В. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - М.: Энергоатомиздат. - 1981. - 416с.
7. Телин, Н.В. Моделирование внутреннего охлаждения роликов МНЛЗ//Н.В. Телин, Н.Н. Синицын // Сталь.- 2016.- № 6. - С.54 – 58.
8. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 599с.
9. Математическое обеспечение ЕС ЭВМ/ Ю.В. Денисов, В.М. Нисковских, В.Г. Житомирский и др. - Свердловск: СГПИ, 1983. - 266с.
10. Телин, Н.В. Оценка ресурса роликов металлургических машин в условиях накипеобразования//Безопасность труда в промышленности. - 2013.- №2.- С.52-54.



УДК 621.893

В.С. Славин, Е.А. Пузик, Е.К. Чумичёв
 ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
 технический университет им. Г.И. Носова»
 г. Магнитогорск, Россия
 E-mail: girkin@yandex.ru
 Дата поступления: 05.11.2016

ВЛИЯНИЕ КАРБОНИТРИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ЗУБЬЕВ В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ

Аннотация

Приведены результаты исследования на экспериментальной установке с замкнутым силовым контуром по изучению характера взаимодействия карбонитрированных поверхностей зубьев зубчатых колёс цилиндрических редукторов. Установлена зависимость величины силы тока электродвигателя на преодоление сил трения в зубчатых зацеплениях и подшипниках качения от величины нагрузок воспринимаемых испытательным стендом. Использование данной зависимости позволило выявить закономерность изменения величины коэффициента трения от величины номинального давления на контакте в зубчатом зацеплении. Исследование показало, что карбонитрирование поверхностей трения приводит к формированию упругого контакта между ними, и что при увеличении параметров шероховатости и величины номинального давления это ведёт к снижению величины коэффициента трения.

Ключевые слова: карбонитрирование поверхностей, зубчатое зацепление, коэффициент трения, экспериментальная установка, упругий контакт.

Введение

За последние годы для повышения эксплуатационных характеристик поверхностей трения применяется их карбонитрирование, что ведёт к повышению поверх-

ностной твердости и изменению параметров шероховатости поверхностей трения [1, 2]. Проведённые на машине трения исследования карбонитрированных образцов показали снижение величины коэффици-

ента трения в сравнении с необработанными образцами не только для образцов, твёрдость которых существенно возросла, но и для образцов с практически неизменной твёрдостью [3]. Следовательно, одной из причин снижения коэффициента трения при взаимодействии карбонитрированных поверхностей является изменение вида контакта между ними. Известно, что в зависимости от условий нагружения, макро- и микро-характеристик поверхностей, формируются различные виды контакта, определяющие величину коэффициента трения [4].

Целью данного исследования явилось установление характера зависимости величины коэффициента трения от нормальной

силы в зубчатом зацеплении карбонитрированных зубчатых колёс, что и позволило установить сформировавшийся вид контакта в зубчатом зацеплении.

Постановка эксперимента

Исследование проводилось на экспериментальной установке (рисунок 1) [5], представляющей замкнутый силовой контур из двух редукторов 1 и 3, соединённых карданными валами 2 и 5, и в котором опорой редуктора 3 является подшипниковая опора 4. К основанию редуктора 3 прикреплён нагрузочный рычаг, на который подвешивается грузы для изменения величины номинального давления в зацеплении.

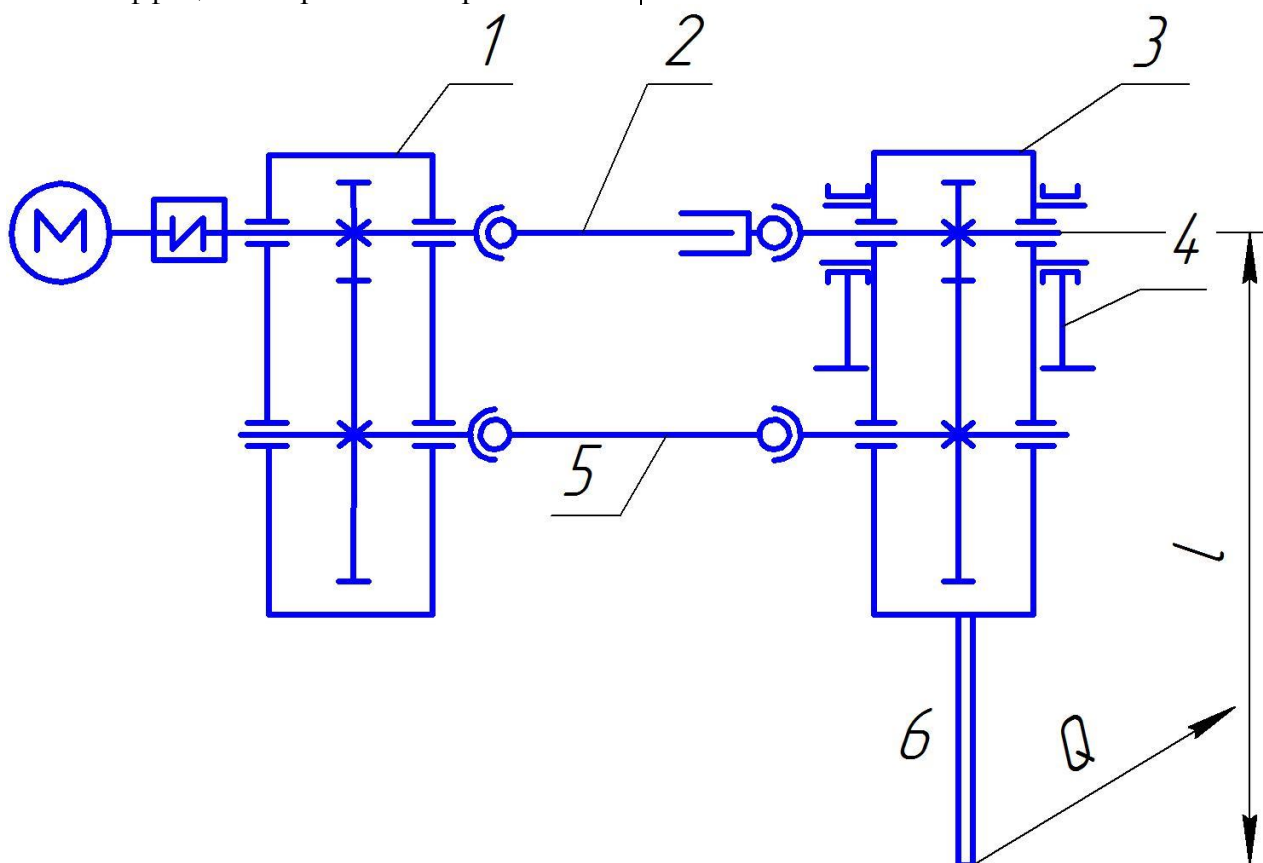


Рисунок 1. Кинематическая схема экспериментальной установки редукторов с замкнутым силовым контуром для измерения коэффициента трения в зубчатом зацеплении
1 – жестко закрепленный редуктор; 2, 5 – карданные валы; 3 – подвижный редуктор, закрепленный на подшипниковой опоре 4; 6 – нагрузочный рычаг

Система смазывания узлов трения экспериментальной установки – циркуляционная, в качестве смазочного материала использовали минеральное масло И-Г-А-68.

Технические характеристики экспериментальной установки приведены в таблице 1

Технические характеристики экспериментальной установки

Наименование характеристики	Обозначение	Численное значение
Ток холостого хода электродвигателя, А	$J_{ХХ}$	2,45
Частота вращения, мин ⁻¹	n	1430
$\cos\varphi$		0,82
Редуктор, шт.	ЦУ-160-2-12-1-У2	2
Вес редуктора, Н	Q_p	750
Передаточное число	i	2
Межосевое расстояние, мм.	a_w	160
Диаметр шестерни, мм	$d_{ш}$	106
Диаметр колеса, мм	d_k	214
Модуль зацепления, мм	m	3
Ширина зубчатого колеса	мм	40
Угол наклона зубьев, град	β	8
Угол зацепления, град	α	20
Подшипники качения на шестерне	7609	100/45
Подшипники качения на колесе	7611	120/55

Силы трения в зубчатом зацеплении, определяли по измерению мощности, развиваемой электродвигателем на преодоление сил трения в зубчатом зацеплении и подшипниках качения из соотношения:

$$\begin{aligned} \sqrt{3}U(J_H - J_{ХХ})\cos\varphi &= \\ &= 2V_{СК} * P_{зац} * f + N_{тр.п.к}, \end{aligned} \quad (1)$$

а величину коэффициента трения находили из зависимости:

$$f = \frac{\sqrt{3}U(J_H - J_{ХХ})\cos\varphi - N_{тр.п.к}}{2V_{СК} * P_{зац}}, \quad (2)$$

где U – напряжение в сети, $U = 380$ В;

J_H – ток нагрузки, А;

$J_{ХХ}$ – ток холостого хода двигателя, 2,45А;

$N_{тр.п.к}$ – мощность электродвигателя на преодоление сил трения в подшипниках качения, Вт;

$V_{СК}$ – скорость скольжения на контакте, 0,85м/с;

$P_{зац}$ – окружная сила в зубчатом зацеплении, Н. (рис. 2)

$$P_{зац} = \frac{Q \cdot l}{R_{ш}}, \quad (3)$$

Нагрузку на подшипники качения в опорах а, b, c, d определяли по зависимости:

$$P_H = P_{зац} / \cos \alpha, \quad (4)$$

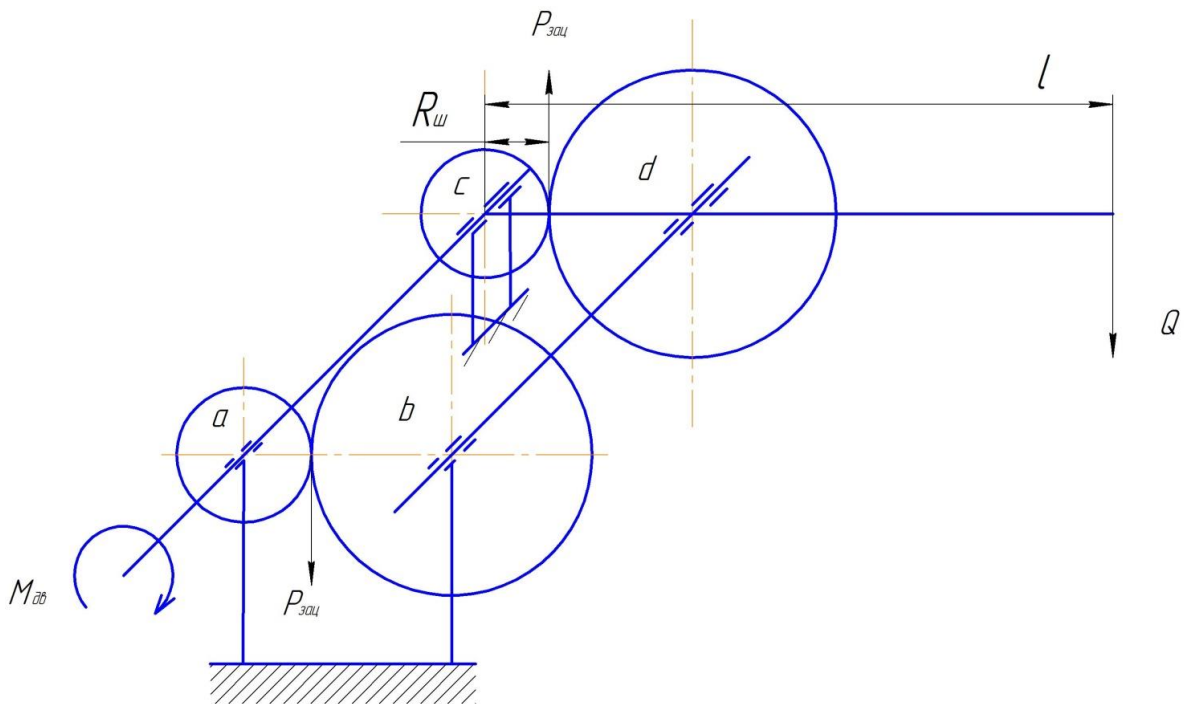


Рисунок 2. Схема действия сил в замкнутом силовом контуре экспериментальной установки.

Условие проведения эксперимента

Начальное нагружение замкнутого силового контура осуществлялось весом редуктора. Сила от веса редуктора, приведённая к концу рычага длиной l (в точке подвешивания грузов) (см. рисунок 1), $Q_p = 108 \text{ Н}$.

В дальнейшем в точке подвешивания грузов на рычаг последовательно устанавливались грузы $Q_p, Q_p + Q_1, Q_p + Q_1 + Q_2, Q_p + Q_1 + Q_2 + Q_3, Q_p + Q_4$ (груз $Q_1 = 52,5 \text{ Н}$, груз $Q_2 = 52,5 \text{ Н}$, груз $Q_3 = 52,8 \text{ Н}$, груз $Q_4 = 188 \text{ Н}$).

После запуска электродвигателя последовательно через каждые пять минут устанавливались грузы и через каждую минуту регистрировалась сила тока.

Эксперимент повторялся три раза. Результаты замеров силы тока электродвигателя представлены на рис. 3 в виде функциональной зависимости $J_H - J_{x.x} = f(Q)$.

После обработки экспериментальных данных в программе Excel 2016 получена аппроксимационная зависимость, которая использовалась в дальнейшем для расчёта величины коэффициента трения f , как функции от номинальной силы в зацеплении $-P_{зац}$.

$$J_H - J_{x.x} = 0,121 * Q^{0,269} \quad (5)$$

Расчет мощности трения в подшипниках качения

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в подшипниках качения, включает мощность подшипников качения шестерен - $N_{п.к.ш}$ и мощность подшипников качения зубчатых колёс - $N_{п.к.к}$:

$$N_{тр.п.к.} = N_{п.к.ш} + N_{п.к.к.} \quad (6)$$

$$N = M \cdot \omega \quad (7)$$

Момент трения в подшипниках качения согласно работе [6]

$$M = M_0 + M_1 \quad (8)$$

$$M_0 = 1 * 10^{-7} * f_0 * (v_p * n)^{2/3} * D_0^3 \quad (9)$$

$$M_1 = f_1 * P_{зац} * D_0 \quad (10)$$

где $f_0 = 4$, $f_1 = 5 \cdot 10^{-4}$ - табличные значения коэффициентов для данных типов подшипников;

D_0 - средний диаметр подшипника, мм;

v_p - кинематическая вязкость смазочного материала при рабочей температуре на контакте, $\text{мм}^2/\text{с}$ [7].

$$v_p = v_{t=40} \left(\frac{40}{t_p} \right)^{2.3} \quad (11)$$

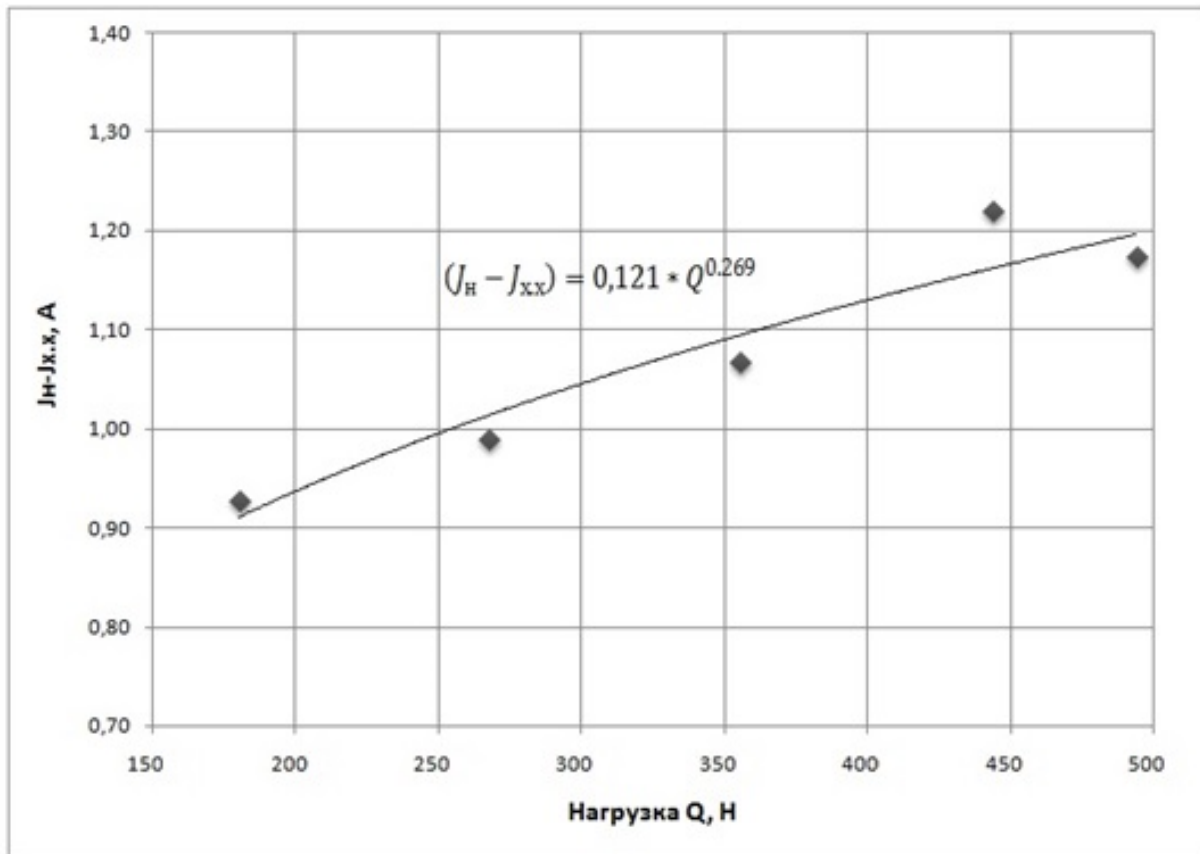


Рисунок 3. График зависимости силы тока электродвигателя от нагрузки Q

Фактическая температура на контакте и суммарная скорость качения на контакте находились по зависимостям [8, 9]:

$$t_p = 86 + 9,74 \cdot U_\Sigma - 5,72 \cdot \lambda \quad (12)$$

$$\lambda = j \cdot t_{\text{вх}}^Y$$

$$Y = -0,3 \cdot \ln(\text{КВ}) - 0,57$$

$$j = 0,076 \cdot \text{КВ}^2 - 1,12 \cdot \text{КВ} + 283,4$$

$$U_\Sigma = \frac{\pi \cdot D_0 \cdot n}{60} (1 - \gamma^2) \quad \gamma = \frac{D_w}{D_0} \cos \beta \quad (13)$$

где $t_{\text{вх}}$ - температура смазочного материала на входе в зону трения, 25°C

КВ – класс вязкости смазочного материала. КВ принимали раным 68

Результаты расчётов приведены в табл. 2

Таблица 2

Расчётные значения мощности трения в подшипниках качения

Q, Н	108	160,5	213	265,8	296
$P_{\text{зац}}, \text{ Н}$	1803	2680	3556	4438	4942
$N_{\text{тр.п.к.}}, \text{ Вт}$	57,9	72,95	88,47	102,81	111,39

По зависимости (2) получены расчётные значения коэффициента трения в зубчатом зацеплении, при различных значениях номинального давления - $P_{\text{зац}}$, и получена функциональная зависимость, $f_{\text{тр}} = f(P_{\text{зац}})$, представленная на рисунке 4



Рисунок 4. График зависимости коэффициента трения от номинального давления в зубчатом зацеплении.

Найдена соответствующая аппроксимационная зависимость:

$$f_{тр} = 26,31 \cdot P_{зац}^{-0,66} \quad (14)$$

Заключение

По характеру зависимости коэффициента трения от номинального давления установлено, что с ростом номинального давления происходит снижение величины коэффициента трения, что характерно для упругого контакта в зоне взаимодействия поверхностей трения зубьев. Таким образом, карбонитрирование зубьев зубчатых колёс является эффективной упрочняющей обработкой, особенно для тяжело-нагруженных зубчатых передач, и приводящей не только к повышению поверхностной твёрдости, но и к формированию упругого контакта, обеспечивающего снижение интенсивности изнашивания поверхностей.

Библиографический список

1. Коротков В.А. Карбонитрация деталей машин. //Главный механик, 2011.- № 9. С. 20-22.
2. Юсупов Р.Р., Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Губарев Е.В. Исследование

влияния карбонитрирования на снижение коэффициента трения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т. 1. № 1. С. 214-216.

3. Жиркин Ю.В., Губарев Е.В., Чумичёв Е.К. Исследование влияния карбонитрирования на микрогеометрические параметры поверхностей пар трения. Международная научно-практическая конференция Ч 2 / Инструменты и механизмы современного инновационного развития; 2016. Уфа: АЭТЕРНА. С. 20-22.
4. Жиркин Ю.В Основы теории трения и изнашивания (основы триботехники): учебное пособие. Магнитогорск: Гос. образовательное учреждение высшего проф. образования "Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова". 2007. 95 с.
5. Стенд для испытания зубчатых передач. Платов С.И., Чумиков А.М., Жиркин Ю.В., Железков О.С., Мироненков Е.И., Терентьев Д.В. патент на полезную модель RUS 88445 29.06.2009

6. Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения: Расчёт, проектирование и обслуживание опор: справочник. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.
7. Пузик Е.А., Жиркин Ю.В., Филатов А.А. Повышение долговечности подшипниковых опор прокатных клетей «кварто» при их техническом обслуживании. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013, № 3 (51) С 83-88.

8. Жиркин Ю.В., Пузик Е.А., Султанов Н.Л. Проектирование тяжело нагруженных подшипниковых опор, смазываемых системой «масло-воздух». // Вестник машиностроения, 2016, № 9. С. 58-62
9. Жиркин Ю.В., Пузик Е.А. Аналитически-экспериментальное определение температурного коэффициента режима ЭГД-смазки. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013, № 1(41). С 73-75.



УДК 621.774.38

Е.А. Максимов, Е.П. Устиновский
 ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»,
 г. Челябинск, Россия
 E-mail: maksimov50@mail.ru
 Дата поступления: 24.10.2016

ДООСНАЩЕНИЕ РОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Аннотация

Представлена конструкция семироликовой правильной машины с устройством для отгибания переднего конца листа. Правка листа на такой машине позволяет повысить качество выправляемых листов. Разработана методика расчета параметров рамы устройства для отгибания переднего конца листа при его правке. При проведении лабораторных исследований с помощью поляризационно-оптического метода определены напряжения в верхней поперечине и основании рамы устройства.

Ключевые слова: правильная машина, листовой прокат, качество.

Введение

Анализ конструкций роликовых правильных машин (РПМ) позволил выявить следующие направления их дальнейшего развития [1-7]:

- увеличение жесткости роликового узла путем использования опорных роликов различной конструкции,
- установка предохранительных устройств для предупреждения перегрузки роликового узла,
- увеличение скорости правки,
- использование устройства для отгибания (перегиба) переднего конца листа,

- автоматизация контроля качества выправляемого листового проката.

При правке листа на РПМ как правило наблюдается снижение качества правки из-за отсутствия технологических возможностей для выправления переднего конца листа. Кроме того, в результате недостаточного выправления кривизны листа при выходе из машины передний конец листа изгибается вниз ниже уровня правки. При этом передний конец листа упирается в первый ролик рольганга, что вызывает необходимость оператору делать реверс машины и проводить повторную правку.

При правке передний участок листового проката и оставшаяся часть листа находятся в разных условиях нагружения.

При правке листа, находящегося между роликми правильной машины, лист представляет собой как бы многоопорную балку, нагруженную сосредоточенными силами от роликов. Но передний участок листового проката не опирается на роликми и не выправляется, сохраняя изгиб вниз.

Целью работы является дооснащение роликмй правильной машины (РПМ) для повышения качества выправляемых листов

путем разработки устройства для отгибания (перегиба) переднего конца листа.

Основная часть

На рисунке 1 приведена схема семироликмй РПМ Старокраматорского машиностроительного завода (СКМЗ). В машине такой конструкции устройство для отгибания переднего конца листа отсутствует и выправление переднего конца листа невозможно, что снижает его качество.

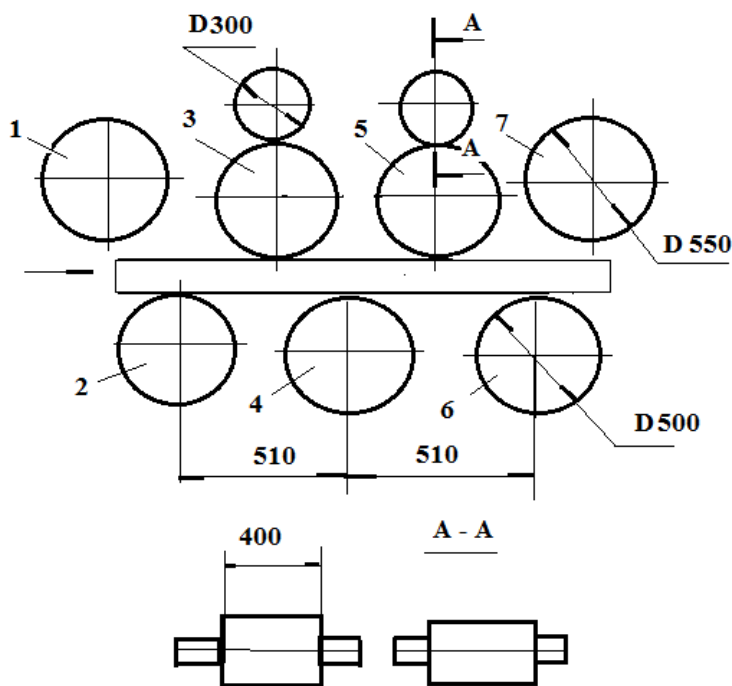


Рисунок 1. Схема семироликмй РПМ СКМЗ: 1-7 – номер роликмй

Рассмотрим семироликмй правильную машину с устройством для отгибания (перегиба) переднего конца листа (рисунки 2 и 3).

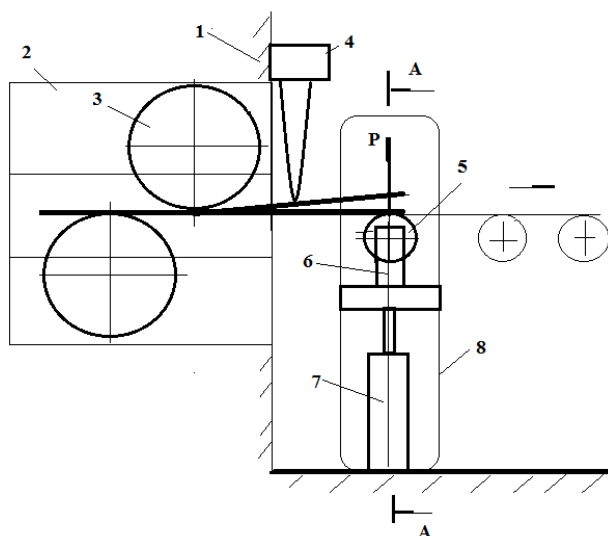


Рисунок 2. Схема роликмй правильной машины с устройством для отгибания переднего конца листа: 1- станина, 2- верхние и нижние кассеты, 3- рабочие роликми, 4- треугольный упор, 5- неприводной ролик, 6 - корпус крепления роликмй, 7-гидроцилиндр, 8- рама

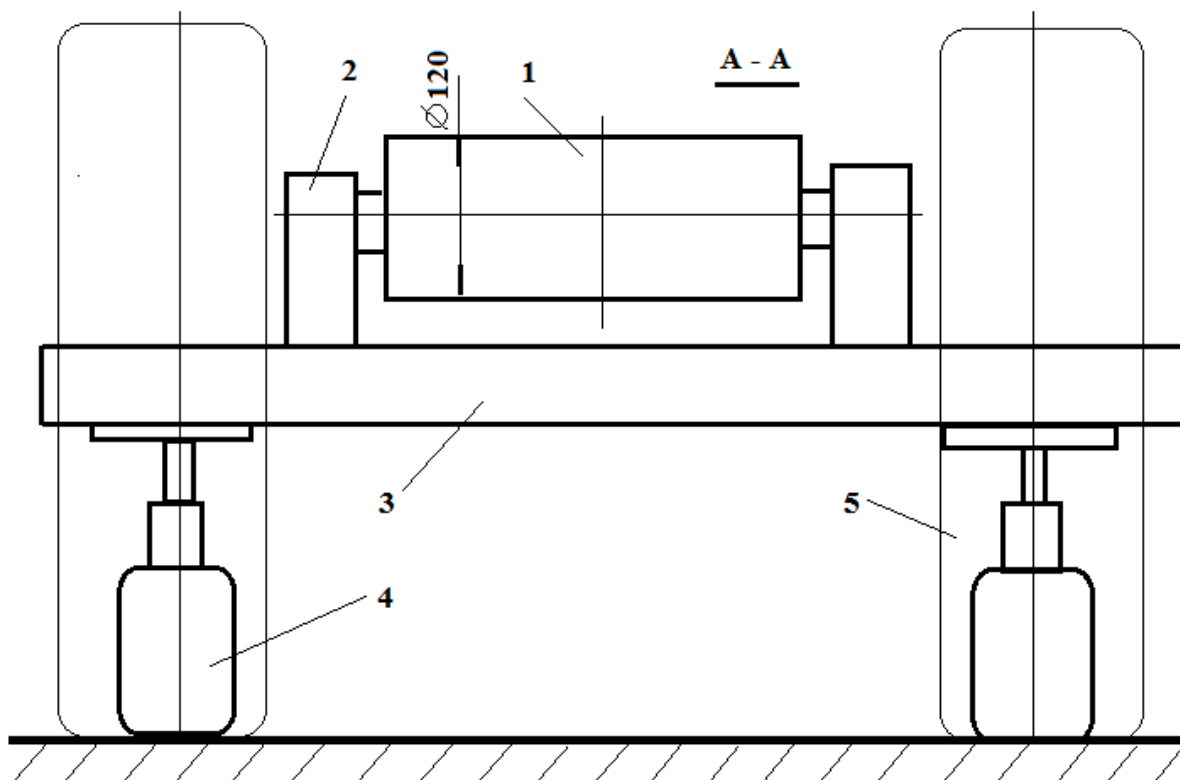


Рисунок 3. Схема устройства для отгибания переднего конца листа: 1- неприводной ролик, 2- корпус крепления ролика, 3-плита, 4-гидроцилиндр, 5- рама

Расчеты показали, что в устройстве могут использоваться два гидроцилиндра марки ЦГ =40.25- 435.17 [8].

Техническая характеристика гидроцилиндра представлены в таблице 1.

Таблица 1

Техническая характеристика гидроцилиндра

Параметры	Значение
Рабочее давление в гидросистеме, МПа	16
Предельное осевое усилие на штоке, кН	20,1
Диаметр поршня, мм	40
Ход поршня, мм	435
Длина гидроцилиндра, мм	580
Диаметр штока, мм	25

Правка листа на роликовой правильной машине выполняется следующим образом. Выправляемый лист по рольгангу подается в установленные в станине верхние и нижние кассеты, несущие правильные приводные ролики. Затем включается главный электропривод и лист протягивается между приводными правильными роли-

ками. В результате знакопеременного перегиба листа между роликами его кривизна снижается и на последнем ролике становится минимальной. Однако выправление переднего конца листового проката при его изгибе вниз не происходит, так как отсутствуют ролики для его перегиба в противоположном направлении. При увеличении рабочего давления в гидросистеме гидроцилиндра – выдвигается его шток, который передает усилие на неприводной ролик. При знакопеременном перегибе переднего конца листа между роликом и упором снижается его кривизна, а качество правки листа улучшается.

В лабораторных условиях проведено комплексное экспериментальное исследование рамы устройства для отгибания переднего конца листа поляризационно-оптическим методом с целью определения напряжений, возникающих при работе устройства.

Рама исследуемого устройства представляет собой массивную замкнутую конструкцию, для которой определялись все компоненты тензора напряжений.

Для изучения напряженного состояния листа поляризационно- оптическим методом была изготовлена модель рамы из оптически активного материала марки ЭД-6. Экспериментальные решения объемных задач прочности листа поляризационно- оптическим методом основаны на возможности «замораживания» деформаций в изучаемых моделях. Суть процесса «замораживания» заключается в следующем. Исследуемая модель помещалась в термостат и медленно нагревалась до температуры +135 °С для материала марки ЭД-6. Оптически активный материал имеет двухфазную структуру. При температуре «замораживания» его аморфная составляющая переходит в новое состояние. Если в этом состоянии изучаемую модель нагрузить системой сил и не снимая нагрузки постепенно понизить температуру в термостате до комнатной, то возникающие при температуре «замораживания» деформации модели окажутся зафиксированными. Аморфная составляющая материала модели, возвратившись в обычное упругое состояние, как бы заморозит их. «Замораживание» модели проводилось в термостате марки BFW-10 по суточной программе, а нагружение проводилось пневмонагружателем. Величина удельного давления при пневмонагружателе составляла $7,84 \times 10^4$ Па, полного давления

260,68Па. После «замораживания» модель разрезалась на отдельные фрагменты. Полученные срезы обрабатывались на поляризационно- оптической установке ФМВ-53. Снимки полос интерференции представлены на рис.4.

Для расшифровки полос интерференции были определены оптические постоянные $4,096 \text{ МПа} \times \text{мм/полос}$.

На рисунке 5 показано расположение модели, принятой при обработке результатов экспериментов, в соответствии с выбранной системой среза, срединная плоскость которой параллельна плоскости $X Y Z$.

Разность нормальных напряжений $(\sigma_y - \sigma_z)$ и касательные напряжения τ_{yz} определяли по формуле

$$(\sigma_y - \sigma_z) = \sigma_0 \frac{m_x}{t_x} \text{Cos} \alpha_{yz}, \quad (1)$$

$$\tau_{yz} = 0,5\sigma_0 \frac{m_x}{t_x} \text{Sin} \alpha_{yz} \quad (2)$$

где σ_0 - цена полосы интерференции,

α_{yz} - параметр псевдоизоклины,

m_x - порядок полосы интерференции в рассматриваемой точке модели,

t_x - толщина среза.



Рисунок 4. Картина полос интерференции

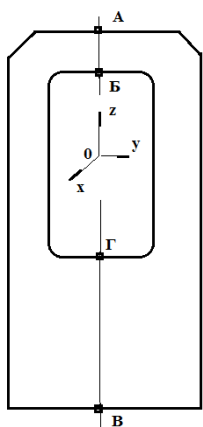


Рисунок 5. Схема расположения точек измерения на модели рамы

Разность нормальных напряжений $(\sigma_x - \sigma_y)$ и касательные напряжения τ_{yz} определяли по формуле:

$$(\sigma_x - \sigma_y) = \sigma_0 \frac{m_z}{t_z} \cos \alpha_{xy}, \quad (3)$$

$$\tau_{yz} = 0,5 \sigma_0 \frac{m_z}{t_z} \sin \alpha_{xy}. \quad (4)$$

Разность нормальных напряжений $(\sigma_z - \sigma_x)$ и касательные напряжения τ_{zx} определяли по формуле:

$$(\sigma_z - \sigma_x) = \sigma_0 \frac{m_y}{t_y} \cos \alpha_{zx}, \quad (5)$$

$$\tau_{zx} = 0,5 \sigma_0 \frac{m_y}{t_y} \sin \alpha_{zx}. \quad (6)$$

Следует заметить, что если известны две разности нормальных напряжений в рассматриваемой точке модели, то в вычислении третьей разности нет необходимости, так она может быть определена из уравнения:

$$(\sigma_x - \sigma_y) + (\sigma_y - \sigma_z) + (\sigma_z - \sigma_x) = 0. \quad (7)$$

По формулам (1) - (7) могут быть определены все величины необходимые для определения эквивалентного напряжения:

$$\sigma_M = \{0,5 [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 - 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]\}^{0,5}. \quad (8)$$

В результате экспериментов были вычислены разности нормальных и касательных напряжений для наиболее нагруженных мест модели, а также эквивалентные напряжения (см. таблицу 2).

Анализ данных, представленных в таблице 2, показал, что наибольшие напряжения $\sigma_M = -39,65 \times 10^4$ Па наблюдаются для точки А верхней поперечины, наименьшие напряжения $\sigma_M = 8,82 \times 10^4$ Па наблюдаются для точки Б основания.

Переход от напряжений в модели рамы к фактическим напряжениям проводился по формуле

$$\sigma_p = \beta \sigma_M. \quad (9)$$

где β - коэффициент силового подобия.

σ_M - напряжения в модели.

$$\beta = P_H / P_M. \quad (10)$$

где P_H, P_M - фактические усилия и усилия, приложенные к образцу модели.

В результате проведенных экспериментов установлено, что наиболее нагруженными в исследуемой раме устройства является сечение А-Б в верхней поперечине и сечение В-Г в основании рамы. Выявлено также, что в зонах перехода стоек рамы и верхней поперечины концентрации напряжений не наблюдается. Это свидетельствует об удовлетворительном выборе радиусов переходных зон.

Параметры дефекта переднего конца листа до и после правки приведены в таблице 3 (А - величина дефекта, то есть расстояние от поверхности листа до оси правки), l - длина дефекта.

Таблица 2

Расчет напряжений четырех точек модели (Па) для верхней поперечины

Напряжения	Точка А	Точка Б
$(\sigma_x - \sigma_y)$	$-36,26 \times 10^4$	$17,64 \times 10^4$
$(\sigma_y - \sigma_z)$	$42,14 \times 10^4$	$-25,48 \times 10^4$
$(\sigma_z - \sigma_x)$	$-5,88 \times 10^4$	$-7,84 \times 10^4$
σ_M	$-39,65 \times 10^4$	$-22,54 \times 10^4$

для основания

Напряжения	Точка А	Точка Б
$(\sigma_x - \sigma_y)$	$-17,24 \times 10^4$	$8,13 \times 10^4$
$(\sigma_y - \sigma_z)$	$20,58 \times 10^4$	$-9,3 \times 10^4$
$(\sigma_z - \sigma_x)$	$-3,33 \times 10^4$	$1,17 \times 10^4$
σ_M	$-14,7 \times 10^4$	$8,82 \times 10^4$

Параметры дефекта переднего конца листа из стали марки 20
до и после правки ($B = 2000$ мм, $h = 10,0$ мм)

A	l	A/l	A	l	A/l	Эффективность
мм	мм	-	мм	мм	-	%
150,0	400	0,37	4,0	50	0,080	78,0
200,0	450	0,44	6,0	70	0,085	80,0
300,0	500	0,60	10,0	90	0,11	81,6

Из таблицы 3 следует, что до правки параметр A изменяется от 150,0 до 300,0 мм, параметр l – от 400 до 500 мм, после правки параметр A изменяется от 4,0 до 10,0 мм, параметр l – от 50 до 90 мм, эффективность правки изменяется от 78 % до 81,6 %.

Заключение

1. Представлена конструкция семироликовой правильной машины (РПМ) с устройством для отгибания переднего конца листа. Правка листа на такой машине позволяет повысить качество выправляемых листов.
2. Разработана методика расчета рамы, используемой в устройстве для отгибания переднего конца листа при его правке на роликовой правильной машине РПМ.
3. При проведении лабораторных исследований установлено, что наиболее нагруженными в исследуемой раме устройства является сечение в верхней поперечине и основании рамы по ее вертикальной оси. Установлено, что в зонах перехода стоек рамы и верхней поперечины концентрации напряжений не наблюдается.
4. Приведены параметры дефекта правки переднего конца листа до и после правки. Показано, что эффективность правки изменяется от 78 % до 81,6 %.

Библиографический список

1. Мошнин Е.Н. Правка и гибка полос / Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1987, –132 с.
2. Слоним А.З. Машины для правка листового и сортового проката / А.З. Слоним, Л.А. Сонин. – М.: Металлургия, 1987. –132 с.

3. Винокурский А.Х. Область выправляемого сортамента листов и полос на роликовых машинах Часть 1. Методика расчета // А.Х. Винокурский, И.В. Недорезов, Т.А. Мезрина. – Производство проката, –2007. –№10. – С.34–37.
4. Винокурский А.Х. Область выправляемого сортамента листов и полос на роликовых машинах Часть 2. Примеры использования методики // А.Х. Винокурский, И.В. Недорезов, Т.А. Мезрина. – Производство проката, –2007. –№10. – С. 36–38.
5. Хольцмюллер Г. Комплексное определение параметров толстого листа // Черные металлы, – 2007. –№ 6. – С.58–62.
6. Бодини Л. Улучшение плоскостности толстых листов благодаря прогнозированию и оптимизации производства/ Л. Бодини, О.Эрих., М. Краухазен // Черные металлы, –2008. –№ 11. – С.35–38.
7. Кнапп С. правка растяжением и изгибом и ее влияние на свойства холоднокатаных полос из качественных сталей / С. Кнапп, П. Функе, К. Киргоф, К. Вупперман // Черные металлы, 1995. – №2. – С. 49–53.
8. Устиновский Е.П., Шевцов Ю.А., Вайчулис Е.В. Детали машин основы конструирования / под ред. Устиновского Е.П.- Челябинск, изд-во ЮуРГУ, – 2010.- 305 с.

ТРЕБОВАНИЯ

к оформлению материалов представляемых для публикации

1. Материалы предоставляются в электронном виде, оформленные в программе MS Word 97-2003.
2. Объем представленных материалов должен быть не менее 6-ти страниц (в режиме оформления одной колонкой на листах формата А4), включая рисунки и таблицы.
3. Формат листа: А4 (210х297 мм).
4. Межстрочный интервал: одинарный.
5. Размер полей слева, справа и сверху страницы 18 мм, снизу 20 мм.
6. Нумерация страниц осуществляется внизу по центру страницы.
7. Шрифт текста: Times New Roman, размер 12 пт.
8. Отступ перед каждым абзацем (красная строка) –10 мм.
9. Формулы должны быть набраны в тексте, вписывание формул от руки не допускается, размер базового шрифта в формулах – 12 пунктов.
10. Рисунки должны быть вставлены в текст и обязательно представлены в виде отдельного файла в формате jpeg, tiff, bmp с разрешением не менее 300 dpi. Наличие подрисовочной надписи обязательно.
11. Не допускается разрыв таблиц, рисунков, заголовков при переходе со страницы на страницу.
12. Структура текста.
 - 12.1. Индекс УДК.
 - 12.2. Имя, отчество и фамилия авторов, жирный шрифт – Times New Roman, размер – 12 пт.
 - 12.3. Наименование организации.
 - 12.4. Город, страна.
 - 12.5. Контактный адрес электронной почты (E-mail).
 - 12.6. Название (должно быть набрано прописными буквами не в режиме CAPS LOCK (SHIFT)).
 - 12.7. Аннотация.
 - 12.8. Ключевые слова.
 - 12.9. Введение.
 - 12.10. Основная часть.
 - 12.11. Заключение (Выводы).
 - 12.12. Библиографический список.
13. Библиографический список составляется в последовательности ссылок в тексте. В тексте статьи ссылки на литературный источник заключаются в квадратные скобки. Библиографическое описание регламентировано ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Материалы для публикации направлять по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова, кафедра «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования».
Контактные телефоны: (3519) 29-85-07, 29-84-51.
E-mail: momz-magtu@yandex.ru, momz-magtu@mail.ru с указанием темы электронного письма «Журнал МОМЗ».
Сайт журнала: www.momz.magtu.ru
Контактное лицо, отв. редактор к.т.н. Слободянский Михаил Геннадьевич.