

ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Попов С.Н.

ВВЕДЕНИЕ

В современных тяжелых условиях, которые переживает народное хозяйство Украины, проблема срока службы деталей машин и агрегатов, их долговечности и надежности приобрела весьма большое значение. Сложности создаются ещё и тем, что практически все оборудование промышленных предприятий изношено до предела, а приобретение нового для его замены непосильно для большинства заводов. В связи с этим поиски износостойких материалов и технологий, обеспечивающих увеличение срока службы быстро изнашиваемых деталей машин, становится первостепенной научной задачей.

В книге рассматриваются некоторые общие закономерности изнашивания сталей и сплавов в различных условиях эксплуатации и приложении этих знаний к конкретным обстоятельствам износа оборудования.

Мы предприняли попытку оценить имеющиеся в литературе результаты исследования износостойкости сталей и сплавов, проведенные разными авторами, и сопоставить с нашими данными, полученными при поиске материалов, обладающих высокой способностью к сопротивлению разрушающему воздействию изнашивающих сред. Анализ большого числа публикаций по вопросам износостойкости подвигнул нас к необходимости разработать такие подходы, которые обеспечили бы наиболее полный учет всех взаимосвязанных факторов, влияющих одновременно на результат изнашивания: изнашивающая среда - материал детали - внешние условия изнашивания.

Проверка целесообразности и действенности такого обобщенного подхода к оценке процесса изнашивания производилась в сопоставлении с материалами, опубликованными в технической литературе и полученными при исследовании и разработке износостойких сталей и сплавов, в частности, для рабочих органов оборудования асфальтобетонных заводов, дорожном строительстве, производстве строительных материалов.

Применяемые в настоящее время на заводах по производству строительных материалов сплавы для изготовления деталей и технологические мероприятия по повышению их долговечности не обеспечивают необходимого срока их службы [1,2]. Поэтому задача повышения износостойкости рабочих органов строительного оборудования является актуальной и для своего решения потребовала проведения направленных исследований.

В настоящей работе представлены результаты комплексных исследований влияния изнашивающей среды и внешних условий изнашивания на увеличение срока службы в частности рабочих органов асфальтосмесителей.

Эти исследования включали изучение характера и механизма изнашивания, влияние типа металлической основы и количества упрочняющей фазы на способность материала сопротивляться изнашиванию в условиях эксплуатации лопаток [3,4,5]. С помощью методов математического планирования определен наплавочный сплав, наиболее приемлемый для работы в заданных условиях изнашивания [6,7,8].

Кроме этого, на основе анализа энергии разрушения абразивных частиц, в зависимости от внешних факторов, выработаны рекомендации по эксплуатации смесительной установки с минимальной интенсивностью изнашивания лопаток. Анализ внедрения результатов работы показал, что оптимальные служебные характеристики лопаток асфальтосмесителей (высокая износостойкость в сочетании с необходимой эксплуатационной приемлемостью) обеспечиваются при наплавке рабочей поверхности лопатки порошковыми проволоками и наплавочными электродами, содержащими в своём составе в определённых соотношениях углерод, хром, бор, кремний и ванадий. (А. С. 1307698, 1453768, 1459128, 1460869, 1487326, 1541937, 1587804, 1633659, 1676174, 1675105, 1731550).

Впервые предпринята попытка рассмотрения в комплексе единой системы: изнашивающая среда - условия изнашивания - изнашиваемый материал, отражающая характер взаимосвязи этих факторов. Изучена взаимосвязь всех компонентов в этой системе, разработаны износостойкие наплавочные материалы и технология их наплавки на конкретные быстроизнашиваемые детали. Установлены

закономерности изменения износостойкости сплавов и принципы создания износостойких материалов на основе единой трибосистемы, а также исследовано влияние легирующих элементов на способность сплавов к сопротивлению изнашиванию незакрепленным абразивом. Процесс изнашивания охватывает совокупность сложных явлений, происходящих при взаимодействии поверхностных слоев металла с изнашивающей средой в определенных условиях температуры и давления. Все компоненты этого процесса, включающие и металл, и изнашивающую среду, и внешние условия, при которых изнашивание осуществляется, взаимно связаны и каждый из них оказывает определенное влияние на конечный результат - процесс изнашивания и величину износа. Поэтому весьма важно найти пути оптимизации этих параметров, обеспечивающих применительно к процессу изнашивания получение наименьшей величины износа и, следовательно, увеличение срока службы, как отдельных деталей, так и машин и аппаратов в целом.

Публикуемые данные, справедливые только для ограниченных обстоятельств, оказываются часто противоречивыми. Одни и те же сплавы, проявляющие высокую износостойкость в одних условиях, оказывают слабую сопротивляемость изнашиванию в других. Многочисленные публикации производственно-технического порядка по износостойкости отдельных конкретных изделий ещё требуют дальнейшего анализа и обобщений.

Предпринимались неоднократные попытки оптимизации методами планирования эксперимента химического состава износостойкого металла. Однако при этом минералогический, гранулометрический, химический состав и прочностные характеристики изнашивающей среды, а также условия изнашивания (давление и температура) принимались постоянными и считались критериальными факторами, накладывающими определенные ограничения. Поэтому хотя целью поиска состава износостойкого материала, проведенного многими авторами, была максимальная износостойкость, химический состав, разработанный каждым из исследователей, получался существенно различным. При этом оптимизация проводилась вполне корректно в соответствии со всеми известными рекомендациями по планированию и обработке экспериментов [1,2]. Это вполне объяснимо, т.к. каждый из исследователей разрабатывал износостойкий материал для сугубо частных условий работы конкретной детали. Даже малейшие отклонения от одного из параметров этих частных случаев делает полученные рекомендации по химическому составу, свойствам сплава непригодными для использования их для других условий изнашивания и требуют нового цикла планирования эксперимента при тех же подходах к решению проблемы износостойкости. Поэтому задача получения оптимального состава износостойкого сплава имеет бесконечно большое количество решений, каждое из которых справедливо только для какой-либо одной детали из бесконечно большого количества реально существующих деталей, изнашиваемых в своих частных условиях при взаимодействии с конкретной изнашивающей средой.

К настоящему времени в отечественной и зарубежной научной литературе по износостойкости накоплен уже достаточно богатый экспериментальный материал, интересные и оригинальные научные разработки, которые могут служить базой для первых обобщений, и, по нашему мнению, могут быть полезными для специалистов, занимающихся как практическими, так и теоретическими проблемами износостойкости. Методология решения задачи износостойкости и прогнозирования ресурса износостойкости остается в сфере компетентности высококвалифицированных специалистов, работающих в этой предметной области, включающей сложную взаимосвязь различных факторов и явлений, учитываемых при постановке и решении такой задачи. Анализ большого числа работ в области износостойкости деталей машин показывает, что добытая авторами этих работ информация не является однозначно определенной, а вводимые критерии и ограничения могут быть точно не определены. Таким образом, необходима разработка четкого методического подхода к созданию модели оценки износостойкости на основе формализации некоторой базы накопленных знаний, позволяющих преодолеть барьер при обобщении знаний об износостойкости конкретных материалов в оговоренных условиях абразивного изнашивания. Проработка предлагаемого подхода к изучению износостойкости возможна при комплексном системном подходе, включающего изучение общей трибосистемы по схеме: материал - условия изнашивания - изнашивающая среда.

Комплексное использование производственных и лабораторных методов изучения изнашивания, а также исследование изменений тонкой структуры металла в рабочем слое и аналитический расчет

величины энергии, затрачиваемой на осуществление каждого из элементарных процессов в металле, составляющих акт изнашивания, помогут выявить те свойства сплава, которые в наибольшей мере контролирует его способность к сопротивлению разрушительной работе абразивов. Разработка модели изнашивания и количественная оценка каждого из явлений, предшествующих и сопровождающих разрушение поверхностного слоя металла, обуславливает более глубокое раскрытие природы сопротивления сплавов изнашиванию, позволит повысить эффективность упрочнения материалов для быстроизнашиваемых деталей и даст возможность полнее реализовать защитные силы металла и управлять его износостойкостью в заданных условиях эксплуатации.

Наиболее полно проблема изнашивания металлов и сплавов может быть решена при её использовании в комплексе, включающем:

- 1) Характеристику изнашивающей среды;
- 2) Внешние условия изнашивания давление, температура, характер силового и коррозионного воздействия;
- 3) Состав, структура и свойства изнашиваемого материала.

Попытки создать износостойкий материал без одновременного учёта всех параметров характеристики изнашивающей среды и внешних условий изнашивания в лучшем случае дают частное решение, пригодное только для одной конкретной детали. Это обстоятельство является причиной больших расхождений в оценке износостойкости практически одинаковых по составу и свойствам материалов, исследованных независимыми авторами, применительно к разным деталям. Пока еще невозможно дать полное математическое описание физических закономерностей с учетом всех компонентов, определяющих износостойкость материалов в обобщенном виде с учетом множества различных факторов, которые необходимо принимать во внимание. Однако, данная концепция имеет самостоятельное значение, поскольку уточняет предметные представления об износостойкости и расширяет базу научных знаний трибологии, материаловедения и др. Поскольку в некоторых областях науки и техники, где требуется принятие решения на основе множества взаимосвязанных факторов, взаимное математическое описание влияния которых друг на друга отсутствует, допускают принятие решений, выраженное в нечеткой форме (нечеткие множества) [3-11].

Результаты исследования формирования состава, структуры и свойств износостойких сплавов, полученные с использованием современных методов, научного оборудования и оригинальных приборов, обеспечили достоверность приведенных в книге данных, подтвержденные при производственном использовании натуральных деталей в течение длительной эксплуатации с 1989 года.

На основе научных результатов разработаны новые износостойкие сплавы, технология и режимы их нанесения, обеспечивающие более высокую работоспособность рабочих органов оборудования по сравнению со стандартными сплавами, ранее применявшимися для изготовления этих деталей. Разработки существенно повышают эффективность, надёжность и ресурс работы оборудования. Работа выполнялась на кафедрах "Оборудование и технология сварочного производства" и "Технологии металлов" Запорожского ордена "Знак Почета" машиностроительного института им. В.Я. Чубаря, (ныне Запорожский государственный технический университет) и на Запорожском Областном Объединённом асфальтобетонном заводе.

Автор выражает свою благодарность д.т.н. профессору Брыкову Н.Н., к.т.н. доц. Гордиенко В.Н., к.т.н. доц. Шумилу А.А., д.т.н. проф. Волчку И.П., инж. Митяеву А.А. за помощь в организации проведения и внедрении результатов исследований.

Автор книги и ректорат Запорожского государственного технического университета выражают свою благодарность ОАО "Мотор - Січ" и лично генеральному директору д.т.н., проф. Богуслаеву Вячеславу Александровичу за помощь в организации ее издания.

1. ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ МАШИН

Проблема повышения долговечности машин и оборудования является одной из актуальных народнохозяйственных задач. Борьба с преждевременным износом деталей оборудования имеет наибольшее значение в отраслях промышленности, добывающих и перерабатывающих

минеральное сырьё.

Срок службы быстроизнашивающихся деталей определяет рентабельность многих дорогостоящих машин. Незапланированные остановки оборудования для замены изношенных деталей новыми, приводят к существенным потерям материалов, труда, финансовых ресурсов, связанных со снижением качества продукции, нарушением ритмичности процесса производства, необходимостью в специальном ремонтном персонале. Все это является причиной колоссальных непроизводительных затрат, которые снижают эффективность народного хозяйства.

Современные тенденции интенсификации производственных процессов, увеличения рабочих давлений, скоростей, температуры приводят к ускорению изнашивания деталей, и в сочетании с необходимостью автоматизации производства, делают проблему повышения долговечности быстроизнашиваемых узлов машин ещё более острой.

К сегодняшнему дню человек выплавил 20 млрд. тонн железа. Всего мировой металлофонд в сооружениях, машинах и механизмах составляет 6 млрд. тонн, таким образом 14 млрд. тонн деталей и машин в целом, изношены и "съедены" ржавчиной. Средняя продолжительность жизни стальных изделий, находящихся в употреблении, составляет 15 лет [9].

Поиски износостойких металлов и сплавов весьма широкая, специфичная и наукоёмкая область инженерной деятельности, требующая обширных знаний о процессах, происходящих в рабочей поверхности изнашиваемой детали под воздействием изнашивающих сред в условиях эксплуатации.

Только четкие представления о свойствах, контролирующей способности сталей и сплавов к сопротивлению их рабочего слоя разрушению в процессе изнашивания, помогут сформулировать требования к износостойким материалам и выработать конкретные меры, обеспечивающие работоспособность деталей и увеличение срока их службы.

По результатам исследования износостойкости материалов в технической литературе имеется много публикаций. В большинстве из них содержатся сведения о конкретных материалах, изучаемых в конкретных условиях эксплуатации. Поэтому публикуемые данные, справедливые только для ограниченных обстоятельств, оказываются часто противоречивы. Одни и те же сплавы, проявляющие высокую износостойкость в одних условиях, оказывают слабую сопротивляемость изнашиванию в других. Многочисленные публикации производственно-технического порядка по износостойкости отдельных конкретных изделий ещё требуют дальнейшего анализа и обобщений. Комплексное использование производственных и лабораторных методов изучения изнашивания, а также исследование изменений тонкой структуры металла в рабочем слое и аналитический расчет величины энергии, затрачиваемой на осуществление каждого из элементарных процессов в металле, составляющих акт изнашивания, помогут выявить те свойства сплава, которые в наибольшей мере контролирует его способность к сопротивлению разрушительной работы абразивов. Разработка модели изнашивания и количественная оценка каждого из явлений, предшествующих и сопровождающих разрушение поверхностного слоя металла, обуславливает более глубокое раскрытие природы сопротивления сплавов изнашиванию, позволит повысить эффективность упрочнения материалов для быстроизнашиваемых деталей и даст возможность полнее реализовать защитные силы металла и управлять его износостойкостью в заданных условиях эксплуатации.

Наиболее полно проблема изнашивания металлов и сплавов может быть решена при её использовании в комплексе, включающем:

- 1) Характеристику изнашивающей среды;
- 2) Внешние условия изнашивания - давление, температура, характер силового и коррозионного воздействия;
- 3) Состав, структура и свойства изнашиваемого материала.

Попытки создать износостойкий материал без одновременного учёта всех параметров характеристики изнашивающей среды и внешних условий изнашивания в лучшем случае дают частное решение, пригодное только для одной конкретной детали. Это обстоятельство является причиной больших расхождений в оценке износостойкости практически одинаковых по составу и свойствам материалов, исследованных независимыми авторами, применительно к разным деталям.

2. ИЗНАШИВАНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Повышение износостойкости деталей машин возможно на основе достоверной информации о механизме разрушения металлов абразивными телами, знания процессов, происходящих в изнашиваемом слое под воздействием абразивов.

Изучение характера этих процессов и оценка их удельного вклада в сопротивляемость изнашиванию позволяет определить те свойства сплава, которые в наибольшей мере контролируют его способность противостоять разрушению при взаимодействии с абразивами и сформулировать требования к составу и структуре износостойкого материала.

Особенность абразивного изнашивания состоит в том, что прямое разрушение поверхностного слоя металла в каждый данный момент времени составляет незначительную часть от числа контактов абразивных тел с рабочей поверхностью детали. Результат взаимодействия абразивных частиц с изнашиваемой поверхностью сопровождается сопутствующими процессами -выделением тепла, увеличением плотности дислокаций в рабочем слое, структурными превращениями и т. п..

Сложность явлений, протекающих в зоне контакта абразивного тела и испытываемого материала в процессе каждого единичного акта изнашивания, обусловлена большим числом факторов, зависящих от условий испытания и комплекса свойств сплавов и абразивных частиц. Накопленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при любых видах изнашивания в металле происходят процессы, непосредственно связанные с упрочением и разупрочением поверхностного слоя.

Для глубокого понимания сущности абразивного изнашивания необходимо всестороннее изучение большого числа факторов, определяющих интенсивность изнашивания и выбор наиболее рациональных путей повышения долговечности деталей машин, эксплуатирующихся в абразивной среде. Выявление влияния на износостойкость каждого из этих факторов возможно лишь при использовании смежных наук – триботехники, физико-химической механики материалов, физики твёрдого тела, металловедения и термической обработки, а также технологии производства и особенностей эксплуатации машин.

За последние годы знания о природе и особенностях механизма изнашивания материалов значительно расширились благодаря применению при исследовании совершенных методик и средств изучения изменений, происходящих в поверхностных слоях изнашиваемого материала, установлению связи между характером взаимодействия твердых тел в зоне контакта и реальным строением поверхностного слоя металла. В любом случае при всех условиях процесс изнашивания осуществляется в соответствии с фундаментальными законами природы, в частности законом сохранения энергии. Для того, чтобы отделить от монолитной детали некоторый микро или макро объем нужно затратить энергию, по крайней мере, равную величине энергии, необходимой для образования двух новых поверхностей соответствующей площади. Изменение внутренней энергии изнашиваемого материала равно величине энергии новых поверхностей, образующихся при разрушении, и энергии, аккумулируемой в металле в виде скрытой энергии деформации при взаимодействии с изнашивающей средой. При этом происходит разрыв межатомных связей, приводящий к отделению одной части кристаллической решётки от другой и образованию новых поверхностей. Эти явления требуют для своего осуществления определённых энергических затрат и могут осуществляться, если металлу сообщено необходимое её количество.

Если пренебречь расходом энергии на трение, тепловой эффект и процессы, происходящие в самом абразивном зерне, то разрушение станет возможно только тогда, когда рабочая поверхность будет насыщена энергией, достаточной для осуществления в рабочем слое указанных выше необратимых процессов, а также зарождения и развития трещин. Количество рабочих циклов изнашивания, необходимое для накопления в металле энергии, достаточной для разрушения, составит:

$$m = E_m/E_a \quad (2.4)$$

Количество энергии, поглощаемой рабочей поверхностью и в значительной степени определяющей способность к сопротивлению изнашиванию абразивными телами, зависит от энергоёмкости процессов, протекающих в металле при взаимодействии с абразивами.

2.1 КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ИЗНАШИВАНИЯ

Изнашивание - основной фактор, ограничивающий срок службы оборудования, работающего в самых различных условиях. Начиная с 1939 года, предложено несколько классификаций видов

изнашивания, в каждой из которых абразивное изнашивание выделено в особый вид, имеющий чётко выраженные признаки. Классификация изнашивания может быть произведена по признакам, относящимся к условиям службы деталей или к результату изнашивания-износу или же к явлениям и закономерностям в процессе изнашивания. Типовые условия службы деталей машин, работающих на изнашивание, в классификации, предложенной М.М. Хрущевым, включают в себя:

- 1) вид тела, изнашивающего деталь;
- 2) вид трения;
- 3) вид изнашивания.

Стандартной терминологии в области трения и изнашивания пока нет. Хрущевым М.М. и Бабичевым М.А. в работе [10] предложены следующие определения:

Изнашивание - процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности материала и его остаточной деформации.

Износ - результат изнашивания, проявляющийся в виде отделения или остаточной деформации металла.

Линейный износ - износ, определяемый по уменьшению размера по нормали к поверхности трения.

Скорость изнашивания - отношение величины износа ко времени, в течении которого он возник.

Интенсивность изнашивания - отношение величины износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или объёму выполненной работы.

Относительная износостойкость - безразмерный показатель, характеризующий соотношение абсолютных величин износа двух материалов, из которых один принят за эталон.

Обычно вид изнашивания определяется условиями службы деталей. Однако в ряде случаев одним и тем же внешним условиям эксплуатации могут соответствовать различные виды изнашивания.

По признаку основных явлений, обуславливающих эффект изнашивания, различные его виды можно объединить в следующие три главные группы: механический, молекулярно-механический и коррозионно-механический.

Основную группу механического вида изнашивания составляет абразивное изнашивание, т.е. изнашивание поверхности детали в результате режущего или царапающего действия твёрдых частиц. Механизм этого вида изнашивания заключается в удалении материала с изнашиваемой поверхности либо в виде очень мелкой стружки, либо фрагментов металла выдавленного предварительно по сторонам пластически деформированной царапины, либо в виде дисперсных частиц, хрупко отделяющихся при однократном или многократном воздействии.

Абразивное изнашивание характерно для очень большого числа машин и механизмов, работающих в самых разнообразных условиях, когда рабочие органы оборудования непосредственно соприкасаются добываемыми, транспортируемыми и перерабатываемыми горными породами, режут грунт или почву, а также в случаях, когда твердые частицы, увлекаемые потоком воды, воздуха, газов со значительной скоростью ударяются о металлические детали.

Абразивный износ выделяется в самостоятельный вид и характеризуется как наиболее интенсивный процесс разрушения материалов. Следует отметить, что классификационные признаки пока твердо не установлены и эти классификации существенно отличаются друг от друга. В процессе абразивного изнашивания металл и поверхностные слои испытывают сложноподвиженное состояние. При этом воздействие абразивов, вдавливаемых в рабочую поверхность и затем перемещающихся относительно её, характеризуется неравномерностью распределения по поверхности и сосредоточенностью в местах контакта с абразивными телами. Площадь соприкосновения каждого абразива с деталью может быть соизмерима с величиной зерна металла. В этих условиях механические и физические свойства структурных составляющих приобретают большее значение, чем общие свойства сплава, определяемые стандартными методами [10]. Для абразивного изнашивания при трении скольжения по монолитному абразиву характерно высокое внешнее силовое воздействие на поверхность металла. В этих условиях не все частицы абразива в виде выступов и неровностей способны разрушать металл путем микрорезания или многократного пластического деформирования: часть из них разрушается не поражая металла, но создавая предпосылки к ухудшению условий изнашивания рабочей поверхности деталей. Интенсивность изнашивания металла при трении о монолитный абразив определяется

соотношением их прочностных характеристик. Высокие значения твердости и прочности абразива определяют его способность внедряться в металл и разрушать его путем резания или сжатия при взаимном перемещении. Если металл более твердый и прочный - разрушается абразив. В механизме абразивного изнашивания велика роль не только твердости и прочности, но и устойчивости исходных структур при нагреве.

Усталостное изнашивание осуществляется при повторных достаточно высоких напряжениях испытываемых одним и тем же объемом материала поверхности, особенно при чередовании знака напряжения. В результате в нём возникают микротрещины, приводящие к местному поверхностному разрушению, выкрашиванию в виде ямок. Этот вид изнашивания проявляется только через некоторый период работы детали. К этому виду изнашивания приводит и малоцикловая усталость, возникающая при повторных пластических деформациях одних и тех же объемов металла.

Основным видом молекулярно-механического изнашивания является адгезионное изнашивание, заключающееся в "схватывании" металлов при трении в результате переноса металла с одной на другую и вырывания частиц с поверхности одной детали и налипания или наволакивания их на сопряжённую. Это обычно приводит к появлению на поверхности рисок и задиров, заеданию сопряжённых деталей, сопровождаемому повреждением поверхности. В этих случаях проявляется молекулярное взаимодействие между тесно сближенными поверхностями деталей. Необходимое условие для схватывания - это приведение в непосредственное соприкосновение "ювелирных" поверхностей, которые возникают в процессе совместного пластического деформирования. К разновидности такого вида изнашивания относят и схватывание при нагреве поверхностных участков трущихся тел, что происходит в процессе трения с большими скоростями и значительными удельными давлениями. При этом изнашивание осуществляется за счёт образования металлических связей между трущимися деталями, приведёнными в достаточно тесное соприкосновение до сферы действия межатомных сил. Для этого участки поверхности должны быть, как и в случае "чисто адгезионного" изнашивания, свободны от разного рода плёнок, оксидов и адсорбированных веществ.

Коррозионно-механическое изнашивание - это механическое изнашивание, осложнённое явлениями коррозии. Поверхность металла, вступая во взаимодействие с кислородом воздуха, образует оксидную плёнку, которая в силу её неметаллической природы не способна к схватыванию и в начальный момент изолирует поверхности сопряжённых деталей от тесного соприкосновения. При трении оксидные плёнки постепенно истираются или, отрываясь, удаляются с поверхности контакта. Затем такая плёнка образуется вновь, снова разрушается при трении и таким образом изнашивание представляет собой удаление непрерывно возобновляющихся оксидных плёнок. Усиление изнашивания при трении происходит в случае наличия агрессивных сред.

Фреттинг - коррозия - особый вид изнашивания мест сопряжённых деталей, находящихся под нагрузкой, возникающей при очень малых повторных относительных перемещениях (например, при продольных вибрациях).

Кавитационное изнашивание происходит в потоке жидкости, движущейся с переменной скоростью в закрытом канале, в участках сильно пониженного давления, например, при обтекании препятствий, когда возникают при некоторых условиях местные разрывы сплошности с образованием каверн. Попадая с потоком в область более высокого давления, каверны захлопываются и, если это происходит у поверхности детали, жидкость с большой скоростью ударяется в стенку. Многократные повторные удары жидкости по одному и тому же участку металла (каверны возникают и захлопываются периодически, иногда с большой частотой) приводят через некоторое время к его местному разрушению, образованию углублений.

На практике редко встречаются случаи изнашивания по какому-либо одному из видов, или по другим вариантам классификации, известным из литературы [11,176]. Обычно изнашивание осуществляется в сложных реальных условиях и по любой из известных классификаций может быть отнесено к нескольким из выделенных видов

2.2 ИЗНАШИВАЮЩАЯ СРЕДА.

В общей схеме единой системы, определяющей процесс изнашивания: изнашивающая среда - условия изнашивания - изнашиваемый материал (сталь или сплав) нельзя выделять любой из этих

трёх звеньев как наиболее важный. Влияние каждого из них одинаково существенно. Поскольку результат совместного и одновременного участия всех этих трёх компонентов в общем процессе проявляется на стали или сплаве, из которых изготовлена деталь, естественно, исследователи при анализе изнашивания главное внимание уделяли рабочим органам машины или агрегата, вышедшим из строя по причине износа. Исходя из этого, основные усилия в области повышения износостойкости и срока службы машин были сосредоточены на поиске таких сталей и сплавов, которые обладали бы наибольшей способностью к сопротивлению изнашиванию. При этом подразумевалось, что другие два равноправных компонента процесса изнашивания: изнашивающая среда и условия изнашивания, являются величинами постоянными.

Разработанные новые или подобранные, среди существующих при таком подходе, износостойкие материалы в иных условиях оказывались менее износостойкими или даже вообще не износостойкими. Литературные источники в области изнашивания содержат много сведений с весьма неоднозначными, а часто и противоречивыми оценками износостойкости одних и тех же материалов. Это явилось следствием подхода к исследованию изнашивания, ориентированного на одну конкретную деталь, а не вид изнашивания. Поэтому среди тех критериев, по которым выбирается химический и структурный состав стали или сплава для изнашиваемой детали и оценивается её износостойкость, обязательно должны учитываться количественно или хотя бы качественно все три компонента процесса изнашивания.

2.2.1 ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗНАШИВАЮЩЕЙ СРЕДЫ.

Изнашивающая среда вне зависимости от её состава, формы и размеров - это в общем виде контртело или набор контртел, которые в процессе воздействия на рабочую поверхность детали приводят к её повреждению. При этом в поверхностных слоях стали или сплава происходят сложные многофакторные явления, включающие микро и макро деформации, происходит отделения микро и макрообъемов сплава в виде микростружки; на поверхности появляются углубления в виде канавок и царапин, некоторая часть микрообъемов выдавливается в более поверхностное положение по краям канавок с образованием "навалов", которые при последующих рабочих циклах удаляются с поверхности и эти процессы непрерывно возобновляются. Роль изнашивающей среды в этом процессе достаточно значительна. Это то, что изнашивает.

Механизм изнашивания может быть существенно различным в зависимости от характеристики изнашивающей среды - это монолит или закреплённый абразив либо незакреплённый абразив в составе перемешиваемой массы в наполнителе определённой вязкости. Большое значение имеет физико-механические свойства отдельных гранул абразива, особенно их твёрдость и прочность, форма и размер гранул [256-258].

Абразивная способность изнашивающей среды зависит от её состава и степени закреплённости в ней абразивных частиц, отражающей агрегатное состояние этой среды. Способность абразивного зерна создавать напряжения в месте контакта с рабочей поверхностью зависит как от микротвердости абразива, так и его прочности и величины нормальной нагрузки [177,189-191]. На высокопрочных скальных породах украинских месторождений гранитов ($G_{сж}=32000 \text{ Н/см}^2$) брони дробилок ЩДП 12?15 за 1 месяц работы полностью изнашиваются, выдерживая до 107 ударов большой силы. За год эксплуатации на уральском месторождении известняка брони дробилок выдерживают более 109 циклов ударно-абразивных воздействий при 50% износе толщины брони [196].

Изнашивание в незакреплённой массе абразива довольно часто встречающееся явление при работе строительной-дорожной техники, агрегатов асфальтосмесителей и др.

Природа абразива, его химический состав, механические свойства в значительной мере определяют характер изнашивания и его интенсивность. Исследованию закономерностей, проявляющихся при взаимодействии металлов и сплавов с различными абразивными материалами, посвящено немало работ [181-184].

Качественная картина изнашивания отражает характер взаимодействия детали и абразива, величину и схему внешнего силового воздействия, соотношение прочностных свойств металла и абразива. Высоким значением твердости и прочности абразива соответствует его высокая способность к

внедрению в рабочую поверхность детали и разрушению металла при их взаимном перемещении. Если металл более твёрдый и прочный, чем абразив - разрушится абразив и, следовательно, изнашивание за данный цикл не происходит.

Образование на рабочей поверхности детали царапин, канавок, локальных углублений свидетельствует о том, что твердость и прочность абразива превосходит соответствующие свойства металла и, как результат этого, происходит срез микрообъёмов металла, его деформирование, образование лунок и углублений и вытеснение в "навалы" по краям царапин на пути движения абразивной частицы.

Горные породы, в частности такие компоненты асфальтовых смесей как гранит, характеризуется ограниченной пластичностью - их способность к некоторой деформации проявляется лишь при всестороннем сжатии, которое в практических условиях изнашивания не наблюдается. При обычных для изнашивания в абразивной массе одноосном сжатии абразивных частиц при взаимодействии с рабочими органами машин большое значение имеют модуль упругости, предел прочности на сжатие. Поэтому изнашивающая среда в условиях изготовления асфальтовых смесей подвергалась подробному исследованию.

2.2.2 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ И ЭНЕРГИИ ИХ РАЗРУШЕНИЯ

Материалы, перемешиваемые в асфальтосмесительной установке, являются той абразивной средой, взаимодействие с которой приводит к изнашиванию рабочих органов машины. Интенсивность разрушения рабочей зоны лопатки и броневой футеровки смесителя зависит от положения частицы на поверхности трения в процессе их относительного перемещения, а также от размеров, формы и физико-механических свойств самой частицы в частности: твёрдости и прочности. В работах, посвященных исследованию свойств абразивных тел и зависимости от них изнашивания металлов [11,30,228,253-255] установлено, что величина удельного износа у стали со стабильной структурой возрастает с повышением размеров абразивных зерен (рис. 2.1). В тоже время для сплавов с метастабильным аустенитом эта зависимость существенно нарушается. При этом изменяется и характер зависимости и величина удельного износа.

Анализ характера изменения содержания аустенита и микротвердости изношенной поверхности в зависимости от размера зерен абразивных масс (см. рис. 2.1) показывает их четкую взаимосвязь - степень упрочнения рабочей поверхности метастабильных сплавов является следствием полноты превращений в процессе изнашивания и сопутствующих этим превращением глубоких изменений физико-химических свойств. Следовательно, для

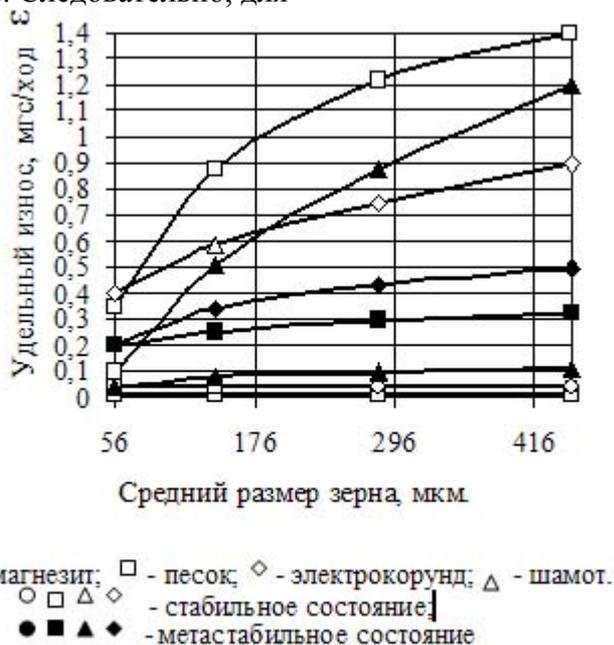


Рисунок 2.1- Зависимость удельного износа стали X12Ф1 от среднего размера зерна абразивных масс [218].

сплавов с метастабильным аустенитом уменьшение, постоянство или незначительное повышение интенсивности изнашивания с ростом размера абразивных частиц, (рис.2.2) является результатом

того, что возрастающая абразивность масс с изменением зернового состава компенсируется более глубоким превращением, приводящими к упрочнению поверхности и увеличению сопротивляемости изнашиванию.

При достаточно малых размерах абразивных зерен их способность производить микрорезание и пластическое деформирование снижается [252]. В поверхностных слоях возникают незначительные деформации и, как следствие, превращения протекают не полно, а упрочнение не достигает предельного значения.

С ростом величины зерен абразивной массы увеличиваются напряжения, возникающие в зоне контакта частиц и поверхности металла, и изнашивание происходит в основном за счет микрорезания и пластического оттеснения. При этом происходит расширение зоны пластической деформации, повышается полнота мартенситных превращений и степень упрочнения изнашиваемой поверхности.

Таким образом, потенциальные возможности метастабильных сплавов наиболее полно реализуются при изнашивании деталей в абразивных массах с прочными частицами размером более 50 мкм, твердость которых ниже или равна твердости поверхности металла, упрочненной в процессе изнашивания [228].

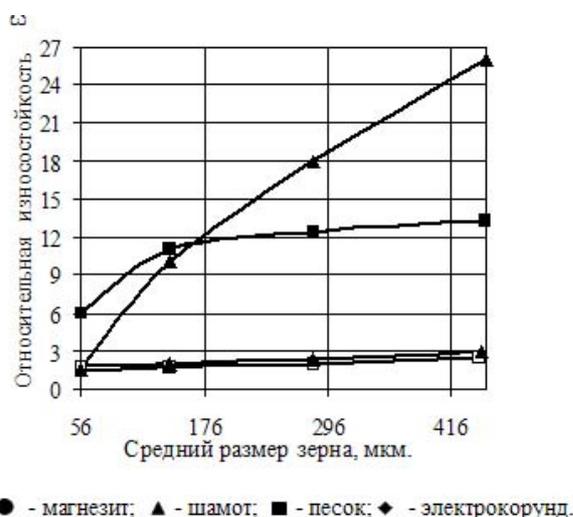


Рисунок 2.2- Зависимость относительной износостойкости (ϵ) стали X12Ф1 с метастабильным аустенитом от величины зерна абразивных масс [228].

Микротвёрдость абразивного материала является одним из основных факторов, определяющих характер и интенсивность изнашивания поверхности трения. Для возможности измерения микротвердости гранитных частиц их смешивали с мастикой АКР-7 и полученную смесь заливали в цилиндрические формы.



Рисунок 2.3- Микрошлиф для определения микротвердости гранитных зерен. После 24-х часовой выдержки изготавливали микрошлиф таким образом, чтобы на его поверхности находилось достаточное количество гранитных частиц (рис. 2.3), микротвердость которых измерялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Химический состав гранита. SiO-69...73%, Al2O3 -16...18%, CaO-1,75...26%, Fe2O3 <3,4%, P<0,10%, S<0,015%.

В работе Хрущёва М.М. и Бабичева М.А. [11] подробно исследовалось абразивное изнашивание в зависимости от соотношения твёрдости абразива и металла. Изнашивание происходит только тогда, когда твёрдость абразива выше твёрдости металла, причём эта зависимость имеет сложный характер (рис. 2.4). В области 1 при твёрдости абразива значительно ниже твёрдости металла изнашивание практически не происходит. В области 2 износостойкость металла существенно снижается до определённой величины и в области 3, где твёрдость абразива существенно выше твёрдости металла, его относительная износостойкость не зависит от этого соотношения. Таким образом величина отношения твёрдости контактирующих тел - абразива и металла определяет износостойкость последнего. При изменении твёрдости абразива существенно изменяется износостойкость.

В соответствии с анализом влияния соотношения твёрдостей абразива и металла на изнашивание, проведенном В. Н. Виноградовым и Г. М. Сорокиным [181], границы областей на рисунке 2.4 характеризуют "критические" условия изнашивания. В первой области при H_a/H_m менее 0,7 относительная изнашивающая способность абразива равна нулю и явного разрушения поверхности металла не происходит. Во второй области, ограниченной пределами от 0,7 до 1,3... 2,2, заметно разрушение металла частицами абразива путём микрорезания, пластического деформирования в зависимости от схемы силового воздействия. В третьей области, охватывающей отношение твёрдостей абразива и металла H_a/H_m выше 1,3... 2,2, изнашивающая способность абразива постоянна независимо от отношения H_a/H_m .

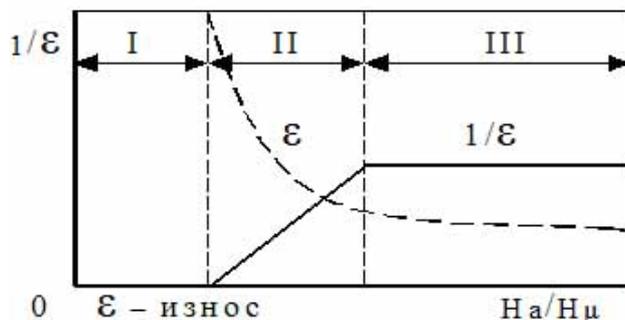


Рисунок 2.4- Зависимость относительной износостойкости от отношения твердостей абразива и металла [11].

В более поздней работе этих авторов [229] приводятся уточненные данные (рис. 2.5) о зависимости износостойкости сталей от соотношения твердости абразива и металла.

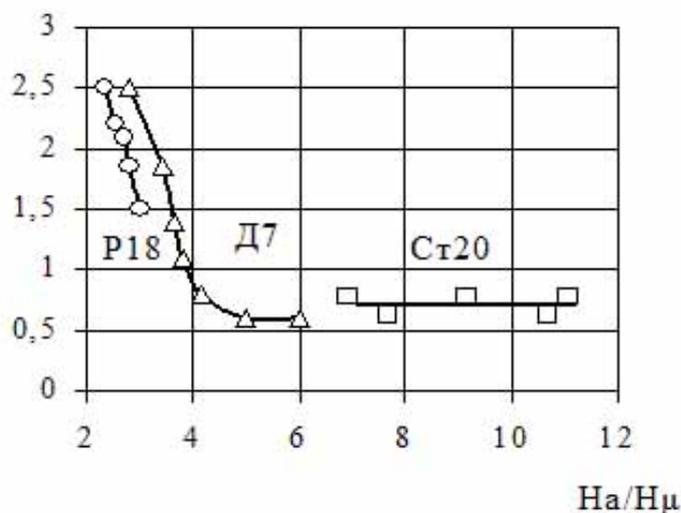


Рисунок 2.5- Зависимость износостойкости от отношения твердостей абразива и металла [229] При твердости абразива меньше твердости металла изнашивание не происходит, так как абразив не внедряется в металл. Изнашивание начинается, когда твердость абразива примерно равна твердости металла. При отношении твёрдостей абразива и металла выше 5,5 повышение твердости абразива

не сопровождается увеличением износа. Таким образом, абразив, твердость которого превышает твердость металла более чем в 5 раз, не влияет на величину износа.

Однако такая зависимость не всегда соблюдается. В этой же работе Хрущёва М.М. и Бабичева М.А. приводятся данные о существенно различной износостойкости сталей различного химсостава при одинаковой твёрдости. Отношение твёрдостей абразива и металла имеет лишь ориентировочное значение, поскольку процесс изнашивания характеризуется огромным многообразием условий взаимодействия рабочей поверхности детали и изнашивающей среды, которые не воспроизводятся при стандартных испытаниях механических свойств. При изнашивании рабочих органов смесителей перемешивающих массу, содержащую щебень, происходит увеличение зазора между броневым листом и лопатками ротора. В этом зазоре защемляются абразивные частицы, которые при повороте вала с лопатками, должны либо повредить контактную поверхность, что и составляет акт изнашивания, либо разрушатся сами, следовательно, изнашивание за данный цикл не происходит.

В этих условиях существенную роль приобретает прочность абразивных зёрен. Экспериментальное определение прочностных свойств абразивных зёрен представляет значительные трудности в связи с тем, что они имеют неправильную геометрическую форму и различную остроту граней.

Основными компонентами асфальтобетонных смесей являются щебень, песок и битум. По гранулометрии (рис. 3.3) асфальтобетон подразделяют на крупнозернистый - наибольший размер зёрен до 40 мм; среднезернистый - до 20-25мм; мелкозернистый - до 10-15 мм; песчаный - до 5 мм [12].

На износостойкость рабочих кромок лопаток, работающих в условиях абразивного изнашивания, прежде всего влияет абразивность щебня - форма, прочность и твёрдость его частиц.

Веллинггер К. и Уэкс Н. показали, что разрушение материала абразивными частицами существенно зависит от их микротвёрдости и прочности [25]. В работах [26-28] отмечено, что при одинаковой твёрдости абразивность частицы определяется её прочностью. Влияние твёрдости абразива на износостойкость можно оценить, используя коэффициент $K_t = H_a / H_m$ [11,29,30], где H_a - твердость абразивных зёрен, а H_m - твёрдость металла.

В дорожном строительстве в зависимости от назначения асфальтобетонного покрытия используют прочные морозостойкие магматические, метаморфические и осадочные горные породы, а также медленно охлажденные металлургические шлаки. Прочность при сжатии используемых горных пород находится в пределах 10-14 ГПа, а осадочных карбонатных пород и металлургических шлаков-8-10 ГПа. Изверженные горные породы (гранит, диобазы, бальзаты и др.) обладают большой прочностью 10-35 ГПа и, как правило, имеют высокую твёрдость (5-7 баллов по шкале Мооса) [17]. Наибольшее применение для приготовления битумоминеральных смесей получили граниты (таб. 2.1) - глубинные породы с ярко выраженной зернистой кристаллической структурой, которые состоят из полевых шпатов, слюды и железисто-магнезиальных силикатов. При выборе щебня, используемого для изготовления асфальтобетона (см. рис. 2.6), стремятся, чтобы форма зёрен приближалась к тетраэдрной и кубовидной, что обеспечивает большую прочность и долговечность покрытия.

По данным исследований [19], в наибольшей степени на срок службы лопаток влияет прочность частиц. В работе показано, что эта зависимость может быть выражена уравнением регрессии 1-го порядка:

$$T_{p.c.p.} = 78,08 - 5,44 G_{сж}, (2.6)$$

где $T_{p.c.p.}$ - средний ресурс лопатки в тыс. тонн выпущенной смеси;

$G_{сж}$ - предел прочности на сжатие частиц гранита в ГПа.

Зависимость срока службы лопатки от диаметра абразивных частиц имеет следующий вид: $T_{p.c.p.} = 38,84 - 1,11 D_{ср}, (2.7)$

где $D_{ср}$ - средний диаметр зёрен гранита, мм.

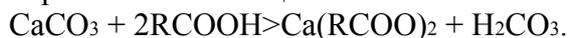
Анализ приведённых уравнений показал, что увеличение диаметра и прочности частиц вызывает снижение срока службы лопаток смесителя, что, с одной стороны, связано с повышением абразивности перемешиваемого материала, а, с другой, обусловлено ростом энергии разрушения

зёрен при заклинивании их в зоне радиального зазора. Однако уравнения регрессии (2.6) и (2.7) построены без учёта влияния радиального зазора, размер которого в значительной степени определяет величину энергии, необходимой для дробления частиц, а, следовательно и срок службы лопаток асфальтосмесителей.

Битумы - являются одним из наиболее распространённых видов вяжущих материалов, применяемых при производстве дорожных покрытий.

Примерная массовая доля битума, %: масла - 40-60, смолы - 20-40, асфальтены - 10-25, карбоны и карбоиды - 1-3, асфальтогеновые кислоты и их ангидриды - 1.

Битумы являются органическими защитными плёнками [12] и применяются также для защиты металлов от коррозии. Химическое взаимодействие битумов с абразивными материалами приводит к образованию на границе раздела фаз новых химических соединений. Химоадсорбционные процессы возникают при объединении минеральных материалов из карбонатных и основных горных пород с битумами, содержащими поверхностно-активные вещества (нафгеновые, асфальтогеновые кислоты и т.д.). Между известняком и битумом происходит реакция с образованием кальциевых мыл:



Образующаяся плёнка этого соединения не растворима в воде и обладает высокими коррозионно-защитными свойствами. Таким образом, наличие битумной фазы не только не вызывает коррозию металла, а напротив защищает поверхность деталей от окисления. В тоже время, практически неизвестно какой вклад вносят битумы в механизм разрушения поверхности трения, как влияют на процесс деформационного упрочнения.

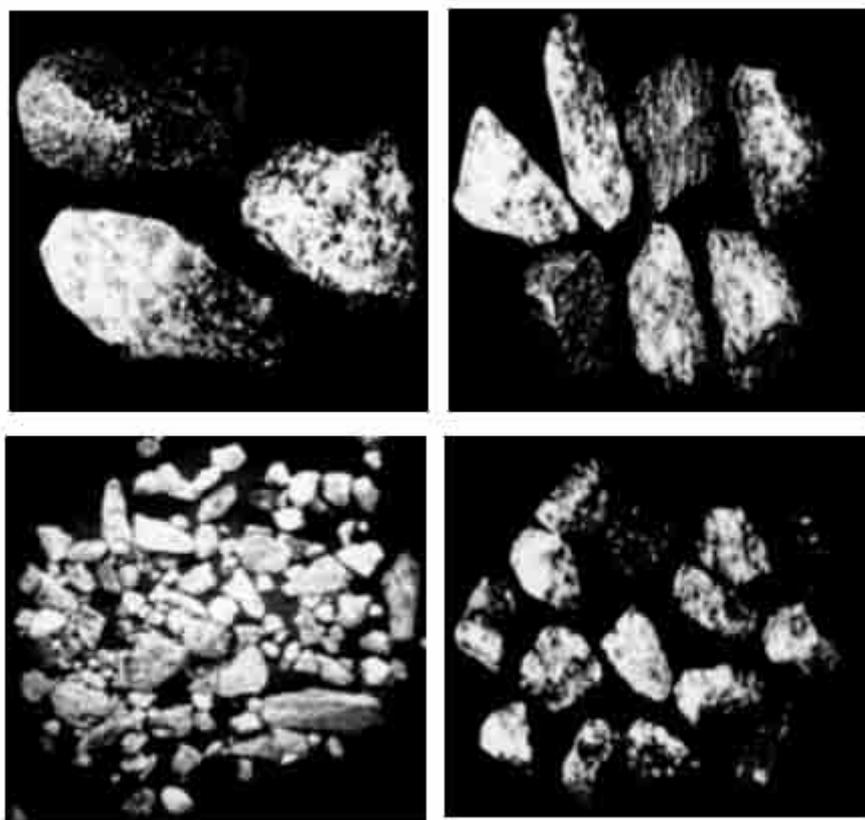


Рисунок 2.6 - Форма зёрен щебня используемого для изготовления асфальтобетона

Таблица 2.1 – Состав и свойства абразивных материалов

Материал	Микротвёрдость Н ₅₀ , ГПа	Предел прочности при сжатии, ГПа	Состав компонентов		
			Полевой шпат	Слюда	Железисто-магнезиальные силикаты
1. Гранит серого цвета	13,9	10-30	Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈]-тёмно-серый		Ca(Mg, Fe, Al) [(SiAl) ₂ O ₅]-тёмно-зелёный
2. Гранит красно-бурого цвета	14,45	10-30	K[AlSi ₃ O ₈]-розово-красный	K(MgFe ₃) [Si ₃ AlO ₁₀] [OH, Fe] ₂ -чёрная	
3. Гранит розового цвета	15,9	10-30	Na[AlSi ₃ O ₈]-белый	KAl ₂ [AlSi ₃ O ₁₀] [OH] ₂ -прозрачная	CaNa(Mg, Fe)(Al, Fe) [(SiAl)OH][OH]-чёрный
4. Гранит с прослойкой окислов железа	16,8	10-30	K[AlSi ₃ O ₈]-розово-красный		
5. Песок кварцевый	13,5-16,0	4,8			

Исходя из этого мы не пытались хоть бы качественно оценить влияние жидких прослоек, в частности, битума на процесс изнашивания деталей асфальтосмесителя. Учитывая сложность всех обстоятельств взаимодействия изнашивающих сред с рабочей поверхностью детали через пограничный слой жидкости необходимы некоторые допущения и упрощения (абразивная частица принимается сферической формы, а контакт осуществляется на неподвижную поверхность под углом 90°).

Значение скорости сближения V ударяемой частицы с изнашиваемой поверхностью можно найти через начальную скорость удара, исходя из условий движения частицы:

t - масса ударяемой частицы;

P - сила, возникающая в слое жидкости, которая тормозит частицу.

Для определения этой силы рассмотрим уравнение движения вязкой жидкости уравнение Навье - Стокса [261].

где: ρ - плотность жидкости; η - вязкость жидкости; η₂ - вязкость 2-го рода;

P - давление; U - скорость движения.

Если жидкость несжимаема, то $\text{div} \vec{U} = 0$, а следовательно и последний член уравнения Навье - Стокса равен нулю.

В нашей задаче движение жидкости асимметрично, поэтому выбираем цилиндрическую систему координат. Если слой жидкости тонкий, то движение в основном радиально

$$\begin{cases} U_z \ll U_r \\ \frac{\partial U_z}{\partial z} \ll \frac{\partial U_r}{\partial r} \end{cases} \quad (2.7)$$

После соответствующих преобразований получим выражение для величины силы, действующей на абразивную частицу радиусом R:

$$\begin{aligned} F &= \int \Delta P d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \Delta P r d\phi dr = \int_0^{\pi} r 2\pi \frac{3U\eta}{h^3} (R^2 - r^2) d\phi = \frac{6\pi U\eta}{h^3} \int_0^{\pi} (R^2 r - r^3) d\phi = \\ &= \frac{6\pi U\eta}{h^3} \left(R^2 \frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right) \Big|_0^{\pi} = \frac{6\pi U\eta}{h^3} \left(\frac{R^4}{2} - \frac{R^4}{4} \right) = \frac{3\pi U\eta R^4}{2h^3}; \end{aligned} \quad (2.8)$$

где: h - толщина слоя жидкости между частицей и изнашиваемой поверхностью;

η - вязкость жидкости.

Подставив величины для каждого из членов, входящих в формулу для определения силы P, тормозящей движения абразивной частицы при внедрении в изнашиваемую поверхность для нашего случая изнашивания лопаток асфальтосмесителя:

U - скорость движения абразивной частицы в начальный момент соударения с поверхностью детали м/с;

η - вязкость битума;

R - радиус абразивной частицы, ($R \approx 5$ мм);

h - толщины слоя жидкости между абразивной частицы и изнашиваемой поверхности (принимаем равной $2R$); $h=10$ мм;

получим:

$$P = -F = -\frac{3}{2} \frac{3,14 U \eta^5}{10^3} \approx -2,29 U \eta$$

Влияние этой силы связано с эффектом торможения, которое возникает при прохождении абразивной частицы через пограничный слой битума и таким образом снижает рабочее давление абразива на изнашиваемую поверхность. Это явление в принципе должно способствовать снижению величины износа.

Однако абсолютное значение величины силы, тормозящей битумом движения абразивной частицы при ее внедрении в изнашиваемую поверхность, незначительно и по нашему мнению практически мало влияет на величину износа.

Микрорельеф рабочей кромки лопатки со следами деформации поверхностного слоя после эксплуатации (см. рис. 2.7) свидетельствует о том, что основной вклад в процесс разрушения металла вносит абразивное изнашивание. Кроме того, наличие большого количества рисок и царапин указывает на то, что в данных условиях главным образом происходит одноциклоый и малоциклоый характер разрушения металла [30], который определяет высокую интенсивность изнашивания лопатки.

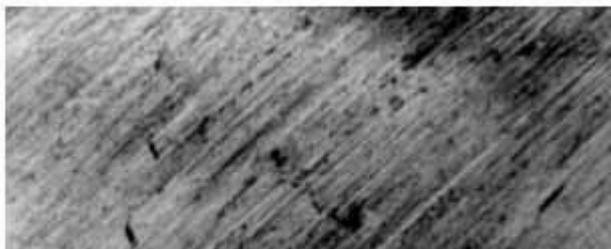


Рисунок 2.7- Микрорельеф рабочей кромки лопатки со следами деформации поверхностного слоя после эксплуатации.

Размер абразивных зёрен играет заметную роль в изнашивании сплавов, хотя это влияние размера неодинаково при разных схемах нагружения (трение скольжения по монолитному абразиву, удар по слою незакреплённого абразива, движение в абразивной массе), при достижении определенного размера абразивных частиц интенсивность изнашивания не изменяется [181].

При постоянной твёрдости металла твёрдость и размер абразивных частиц влияют на изнашивание только до определённого значения этих показателей и затем остаётся на одном уровне при всех схемах внешнего силового воздействия.

Таким образом, выявляется существование некоторого предельного уровня роста, интенсивности изнашивания сталей за счёт изменения твёрдости абразива (рис. 2.4). Однако при размере абразивных тел до этого предельного уровня их влияние на процесс изнашивания может сказываться весьма заметно.

Прочность абразивных частиц может колебаться в широких пределах в зависимости от их природы. Например, прочность обычного кварца, входящего в состав большого числа сложных абразивных материалов, на раздавливание составляет 2100 Н/мм^2 [198].

Эффект разрушения поверхности трения в значительной степени определяется прочностью абразивной частицы. При этом износ металла возможен в том случае, если до возникновения разрушающих напряжений в самой частице, она успевает деформировать некоторый объём материала или даже вызвать отделение его от поверхности.

Ранее разработанные методики определения прочности абразивных частиц [25,129] отличаются большой погрешностью при фиксировании момента разрушения зёрен (по треску). Прочность

абразивных материалов по методике ВНИИАШ [128] определялась процентным отношением массы зёрен, сохранивших свой первоначальный размер после приложения нагрузки, к массе установленной исходной навески.

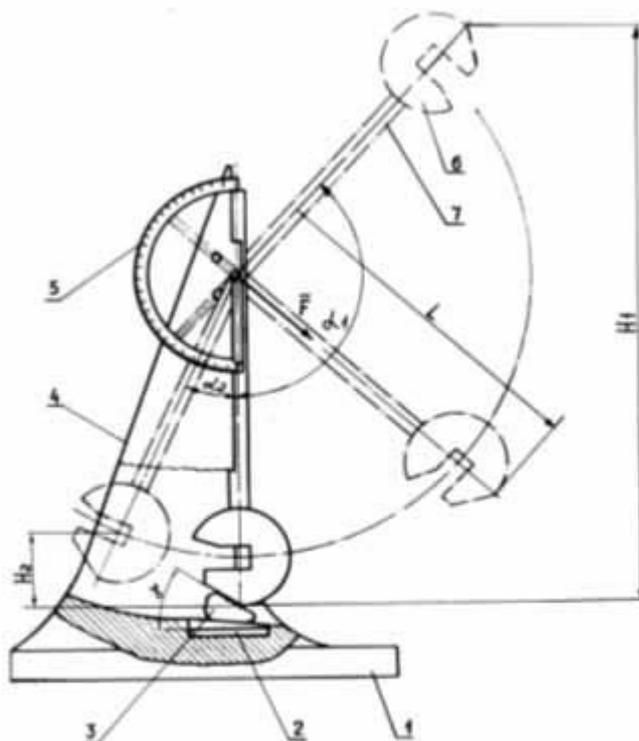
Для определения энергии разрушения гранитных частиц нами была разработана методика и усовершенствована установка [130], состоящая (рис. 2.8) из основания 1, на котором расположены две металлические стойки 4, поддерживающие качающийся на оси маятник 6. Регулировка радиального зазора осуществляется с помощью регулировочных пластин 2. Для проведения испытаний маятник массой Q с длиной L поднимают на высоту H (угол отклонения от вертикали – α_1), закрепляют и устанавливают на циферблате 5 стрелку на нулевую отметку. В этом положении маятник обладает известным запасом потенциальной энергии $A_1 = Q \cdot H$, где $H = L \cdot \cos \alpha_1$. Затем маятник освобождают и он в свободном падении наносит удар по абразивной частице 3 и разрушает её. На это расходуется часть энергии. Другая ее часть поднимает маятник на некоторую высоту h . Угол α_2 определяют по шкале 5).

Оставшаяся энергия $A_2 = Q \cdot h$, где $h = L \cdot \cos \alpha_2$

Количество энергии, затраченное на разрушение абразивной частицы, вычислялось (в Дж) по формуле:

$$A = A_1 - A_2 = Q(H - h);$$

$$A = QL(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (1.7)$$



1-основание; 2-регулирующие пластины; 3- абразивная частица;
4- стойка; 5- цифровая шкала; 6- маятник; 7- тяга; α - угол заклинивания.

Рисунок 2.8 - Установка для определения энергии разрушения абразивных частиц

Отбор зёрен для определения энергии разрушения проводили по методике [131]. Из общего количества зёрен отбирали только те, которые по параметрам (высота граней, угол заклинивания ?) подвержены заклиниванию и дроблению. При испытаниях каждое единичное зерно подвергалось ударному воздействию один раз.

Результаты этих испытаний показывают, что прочность абразивных зёрен в большей степени, чем твёрдость могут служить критерием для выбора износостойких сталей, предназначенных для работы в абразивной среде, соответствующей условиям характеристики лопаток асфальтосмесителей.

1.3 УСЛОВИЯ ИЗНАШИВАНИЯ.

Понятие условия изнашивания охватывает характер, величину внешнего силового воздействия, температуру, при которой должна происходить изнашивание и степень коррозионности среды. При этом должна учитываться как рабочая температура нагрева по условиям эксплуатации оборудования, так и та температура, которая возникает в локальном объеме металла в результате единичного взаимодействия с абразивной частицей в месте их контакта. Условия абразивного изнашивания, естественно влияют как на собственно механизм, так и интенсивность изнашивания. Это проблема изучалась в ряде работ [185-188]. Реальные условия изнашивания весьма многообразны и в работах по этой проблеме исследователи рассматривают очень важные, но частные факторы.

Одной из составляющих условий изнашивания является влажность изнашивающей среды, или наличие охлаждающих сред, которые могут существенно изменить износостойкость сталей, сплавов и упрочняющих покрытий [177]. Немаловажное значение может иметь химическая природа изнашивающей среды и изнашиваемого материала в месте их взаимодействия, которая может в значительной степени повлиять на начальный химический состав контактирующих металла и абразива за счет окружающей атмосферы и воздействия температуры, возникающей в зоне трения [184,192,193].

В процессе взаимодействия абразивных тел с поверхностью детали работа упругой деформации в местах каждого единичного контакта полностью переходит в теплоту. Хотя контактная температура в локальных объемах может достигать значительных величин, теплота быстро отводится в холодные объемы металла и изнашивающей среды в соответствии с их теплопроводностью. Температура нагрева рабочей поверхности оказывает весьма важное влияние на износостойкость металлов и сплавов. Так например, термическая обработка, закалка высокохромистых сталей типа X12 с высоких температур, обуславливает получение в структуре большого количества остаточного аустенита (80%). Известно, что остаточный аустенит такого типа в сталях под воздействием внешней нагрузки может превращаться в мартенсит деформации [194]. Характер зависимости мартенсита деформации при изменении напряжений иллюстрируется (рис. 1.9). При этом существует некоторая минимальная величина напряжений – σ_m , с которой начинается образование мартенсита деформации. Изучение влияния температуры изнашиваемой детали на сопротивление сплавов воздействию изнашивающих сред посвящено достаточно много работ [158,228-236].

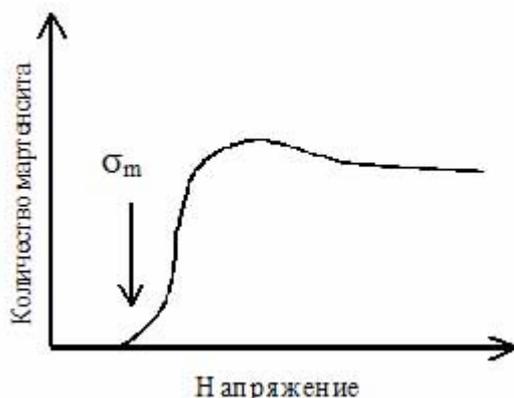


Рисунок 2.9- Мартенситная кривая характеризующие образование мартенсита деформации [194]

Исследовались как случаи общего нагрева деталей до различных рабочих температур, при которых происходит изнашивание, так и локального нагрева в результате контактного взаимодействия изнашиваемой поверхности с отдельным абразивным зерном. Как показано в исследованиях [158,228] износ деталей при нагреве до температуры начала мартенситных превращений существенно различен. У сталей со стабильной структурой, не чувствительной к упрочнению в процессе изнашивания и сталей с нестабильной структурой, в которой происходят структурные превращения под воздействием абразивных тел.

Установлено, что упрочнение, полнота протекания $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений и износостойкость сплавов с остаточным метастабильным аустенитом в большей мере зависят от температуры испытаний

(табл. 1.2). Так при увеличении температуры от комнатной до 250°C величина удельного износа возрастает в два раза (рис.1.10).

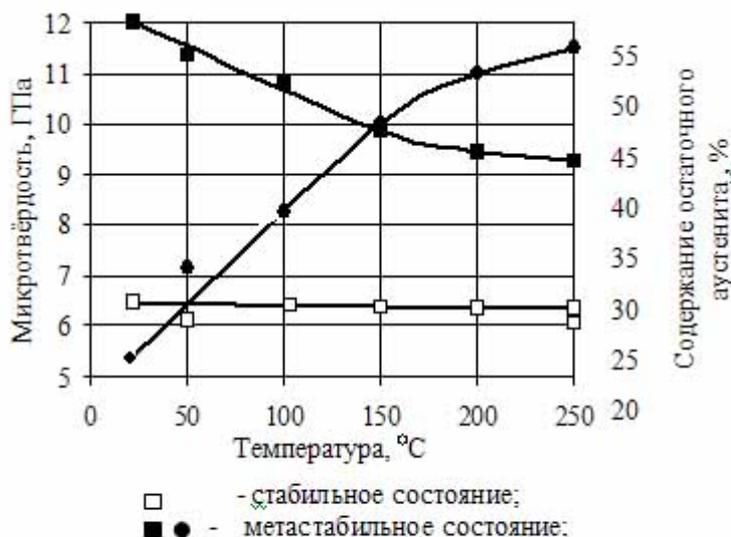


Рисунок 2.10 – Изменение микротвердости (H_{50}) и содержания остаточного аустенита (A) на рабочей поверхности стали X12Ф1 в зависимости от температуры изнашивания [28]

Максимальный уровень износостойкости метастабильных сплавов получен при испытании без подогрева, когда упрочнение стали происходит наиболее полно. Явление резкого снижения износостойкости сплавов со структурой остаточного аустенита при увеличении температуры очевидно связано со стабилизацией γ - фазы и снижением за счет этого упрочняемой поверхности (рис. 1.10, 1.11).

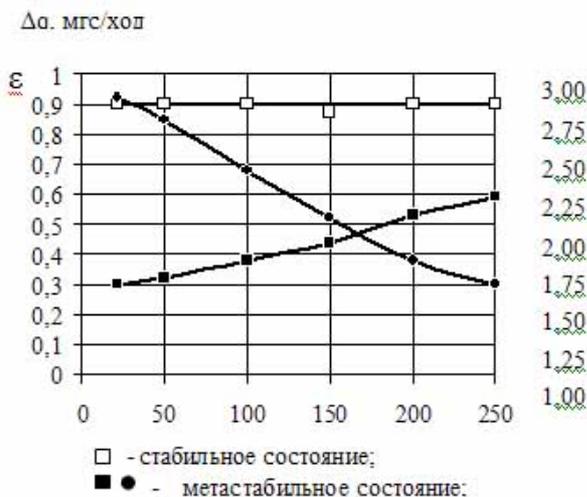


Рисунок 2.11 – зависимость удельных износосов (Δq) и относительной износостойкости (ϵ) стали X12Ф1 от температуры изнашивания [228]

Для начала образования мартенсита необходимо разность свободных энергий $\Delta F(\gamma \rightarrow \alpha)$, превышающая затраты на упругую деформацию ΔG_γ и образование границ раздела ΔG_s . Пластическая деформация повышает температуру мартенситной точки за счет снижения разности свободных энергий и поэтому $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения могут протекать во время деформации при комнатной температуре [237-246,247]. С повышением температуры изнашивания разность свободных энергий снижается, а устойчивость аустенита возрастает [247]. Рост температуры рабочей поверхности, при неизменных других параметрах изнашивания, повышает устойчивость аустенита и только треть его претерпевает $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Анализ изменений тонкой структуры изношенной поверхности, характеризуемых расширением дифракционных линий, показал, что наиболее высокие степени искажений кристаллической решетки и изменений блочной структуры нестабильного сплава соответствует испытанию без

подогрева (рис. 1.12). С ростом температуры испытаний наблюдается уменьшение ширины линий 211-мартенсита и 311-аустенита, которое не может быть связано с релаксацией напряжений второго рода и ростом блоков при температурах до 250°C [238]. Следовательно, высокий уровень микротвердости и искажений решеток α и γ фаз является следствием образования в поверхностных слоях мартенсита деформации, который не просто наследует дефекты деформации аустенита, но и оказывает существенное влияние на состояние тонкой структуры за счет фазового наклепа [248]. С повышением температуры изнашивания возрастает стабильность аустенита и снижается количество

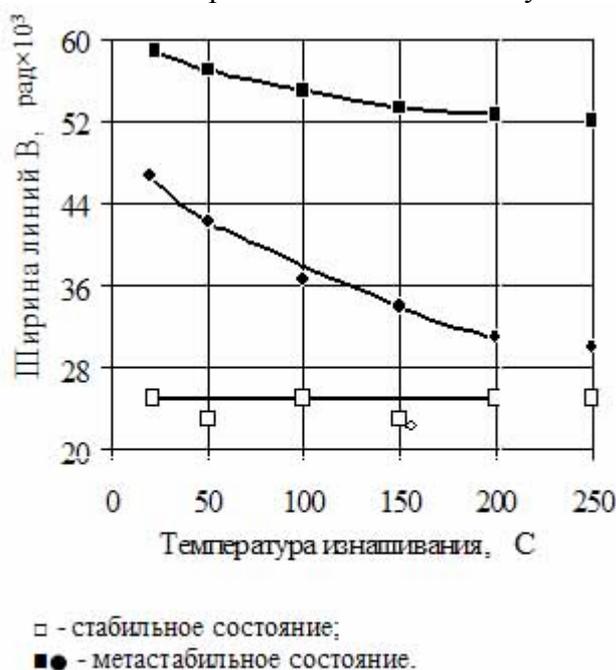


Рисунок 212 – Изменение ширины линии (211) α - фазы и (311) - аустенита на рабочей поверхности стали X12Ф1 в зависимости от температуры изнашивания [228]

мартенсита деформации и как следствие, уменьшается ширина дифракционных линий. Отсутствие фазовых превращений у сплава со стабильной структурой в процессе изнашивания при комнатной температуре вызывает незначительные изменения микротвердости и расширение линии (211), которые не изменяются с повышением температуры изнашивания до 250°C, и его износостойкость остается постоянной при изнашивании в диапазоне температур от комнатной до 250°C.

Таким образом, степень упрочнения сплавов с метастабильным аустенитом и их износостойкость по сравнению со стабильными структурами максимальны при изнашивании без подогрева и снижаются с ростом температуры испытаний.

Авторами исследования [118] разработан метод измерения температуры в местах локальных микроконтактов рабочих поверхностей детали при мгновенном взаимодействии с изнашивающим контртелом (сталь, гранит).

Экспериментальные исследования тепловых процессов при единичном ударе, проведенные В.Н. Виноградовым и Г.М.Сорокиным [229] показали, что на первом этапе удара, работа упругой и пластичной деформации полностью переходит в теплоту и на кривой температуры - время наблюдается резкий скачок. На втором этапе удара происходит упругое восстановление деформированных объемов и контактная температура резко снижается за счет теплоотвода в объемы соударяющихся тел (рис. 1.13). При одних и тех же режимах соударения контактная температура пары сталь-хромель-копель выше, чем пара гранит-хромель-капель. При ударе металла по горной породе на фактической площади контакта развиваются большие давления, т.к. твердость абразивных частиц выше твердости металла, отдельные абразивные зерна горной породы внедряются в металл, вызывая локальную пластическую деформацию. Большая часть теплового потока, генерируемая в результате пластической деформации микрообъемов, вследствие низкой теплопроводности абразива уходит в металл, меньшая - в гранит. Поэтому при одних и тех же режимах удара более высоким тепловым воздействием подвергается металл, соударяющийся с

горной породой. Температура в месте контакта при ударе абразивного тела по поверхности детали обратно пропорциональны площади контакта.

Динамический характер пластического деформирования при изнашивании, в частности, лопаток асфальтосмесителей, при котором теплообмен в зоне соударения практически отсутствует, может вызвать на фактической площади контакта мгновенные скачки температуры. Такие вспышки температуры локализуются в слое толщиной несколько микрометров. В этом объеме металла могут происходить структурные превращения и изменения микротвердости. Поэтому одним из средств повышения износостойкости может служить выбор теплостойких материалов, у которых при рабочих температурных режимах не изменяются микроструктура и механические свойства. В асфальтосмесительных установках энергия соударения лопасти с абразивными частицами асфальтовой смеси равно величине не менее 2-4 Дж. Это соответствует (рис. 1.13) развитию нагрева поверхности лопасти в местах контакта с абразивным телом до температуры около 300°C, что превышает температуру начала мартенситных превращений в исследованных нами сталях. Этим объясняется факт отсутствия структурных превращений в стали X12Ф1, испытанной в условиях работы лопаток асфальтосмесителей и, как следствие этого, отсутствия упрочнения рабочей поверхности деталей. Известны многократно подтвержденные факты существенного упрочнения и, следовательно, повышение износостойкости деталей из этой стали при работе в условиях эксплуатации при высоком давлении абразивных масс на рабочую поверхность при отсутствии ударов. Например, в прессформах для прессования огнеупоров, где отсутствует нагрев пластин прессформ выше температуры начала мартенситных превращений износостойкость пластин из стали X12Ф1, закаленной на остаточный аустенит (HRC=45-50) повышается в 4-7 раз по сравнению с закаленным на мартенсит состоянием (HRC=60-62).

В соответствии с [10] процесс образования мартенсита деформации сопровождается выделением карбидов в поверхностном слое на глубине до 16 мкм, приростом плотности дислокаций на глубине до 50 мкм и образованием остаточных напряжений в поверхности слоя 40 мкм. Эти структурные изменения требуют для своего осуществления значительных затрат энергии.

Так как при деформации сталей с нестабильной структурой часть энергии внешнего воздействия расходуется на образование в рабочем слое детали новой высокопрочной мартенситной фазы то, следовательно, на развитие процессов разрушения поверхности приходится только часть энергии внешней нагрузки, уменьшенная на величину энергетических затрат на структурные превращения в стали в процессе взаимодействия с изнашивающей средой [195].

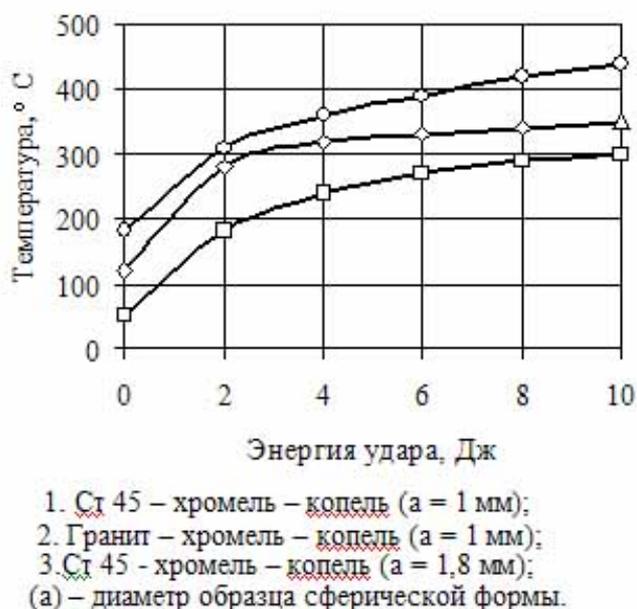


Рисунок 2.13 - Зависимость температуры от энергии удара [229]

Одной из наиболее известных упрочняемых в процессе эксплуатации сталей является высокомарганцовистая сталь 110Г13Л, которая нашла широкое применение в различного рода

установках для дробления горных пород, строительном-дорожном оборудовании, в механизмах по подготовке шихты в металлургическом и литейном производствах [115].

Упрочнение рабочей поверхности деталей, изготовленных из стали 110Г13Л, в процессе взаимодействия с изнашивающей средой обуславливает значительное повышение износостойкости и срока службы таких деталей, особенно, если рабочие нагрузки являются ударными. Так например в рабочих слоях бронифутеровок шаровых мельниц изготовленных из нестабильной аустенитной стали образуется в процессе эксплуатации структура мартенсита деформации с твердостью HRC 50-60 на глубину до 2-3,5 мм при сохранении аустенитной структуры в основном сечении отливки. Прочный поверхностный слой обеспечивает высокую износостойкость при абразивном изнашивании, в результате чего долговечность бронеплит увеличивается более чем в 2 раза [196]. Однако не при всех условиях эксплуатации сталь 110Г13Л проявляет способность к упрочнению. Так известно, что сталь 110Г13Л не является износостойкой при нагреве в интервале температур 400-800°C. Например, в условиях ускоренного процесса производства цемента, применяемые футеровки и перегородки мельниц из стали 110Г13Л эксплуатирующиеся при температуре 180-450°C быстро выходят из строя.

Таблица 2.2 - Микротвердость, фазовый состав, ширина линий и износостойкость образцов из стали X12Ф1 в зависимости от температуры испытаний [228].

Температура испытаний Т°С	Микротвердость изношенной поверхности Н ₅₀ , ГПа		Содержание аустенита изношенной поверхности А, %	Удельный износ Δq, мг/ход		Ширина линии В, рад × 10 ⁻³			Относительная износостойкость (эталон ст. X12Ф1 со стабильной структурой). ε
	Стабильная Структура	Метастабильная структура		Стабильная структура	Метастабильная структура	Метастабильная			
						α	α	γ	
Комнатная	6,35	11,99	22	0,8915	0,2942	25,34	59,96	48,72	3,05
50	6,16	11,36	30	0,9100	0,3130	23,46	58,08	43,96	2,87
100	6,53	10,83	36	0,9100	0,3630	25,07	56,32	35,80	2,47
150	6,30	10,00	45	0,8950	0,4300	23,46	54,56	34,58	2,09
200	6,31	9,27	50	0,9010	0,5290	24,44	52,80	32,16	1,72
250	6,13	9,07	52	0,8915	0,5980	24,24	51,16	30,55	1,50

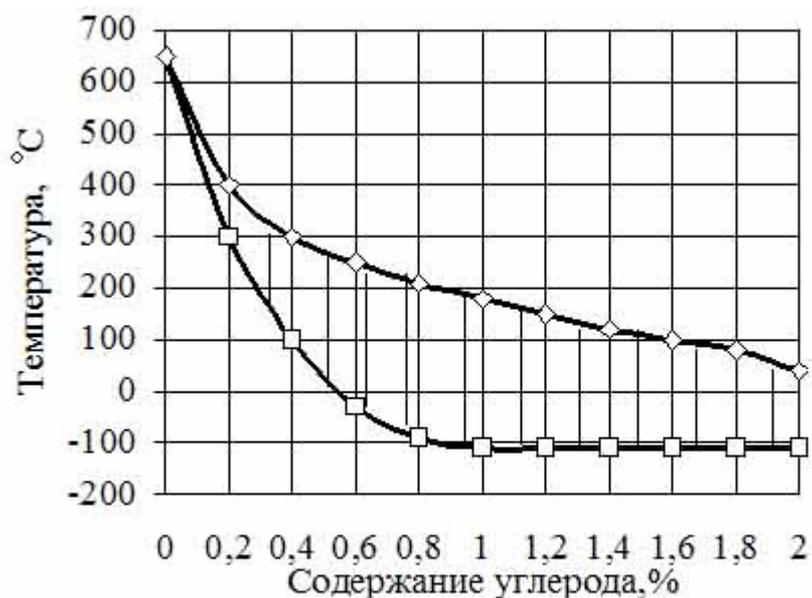
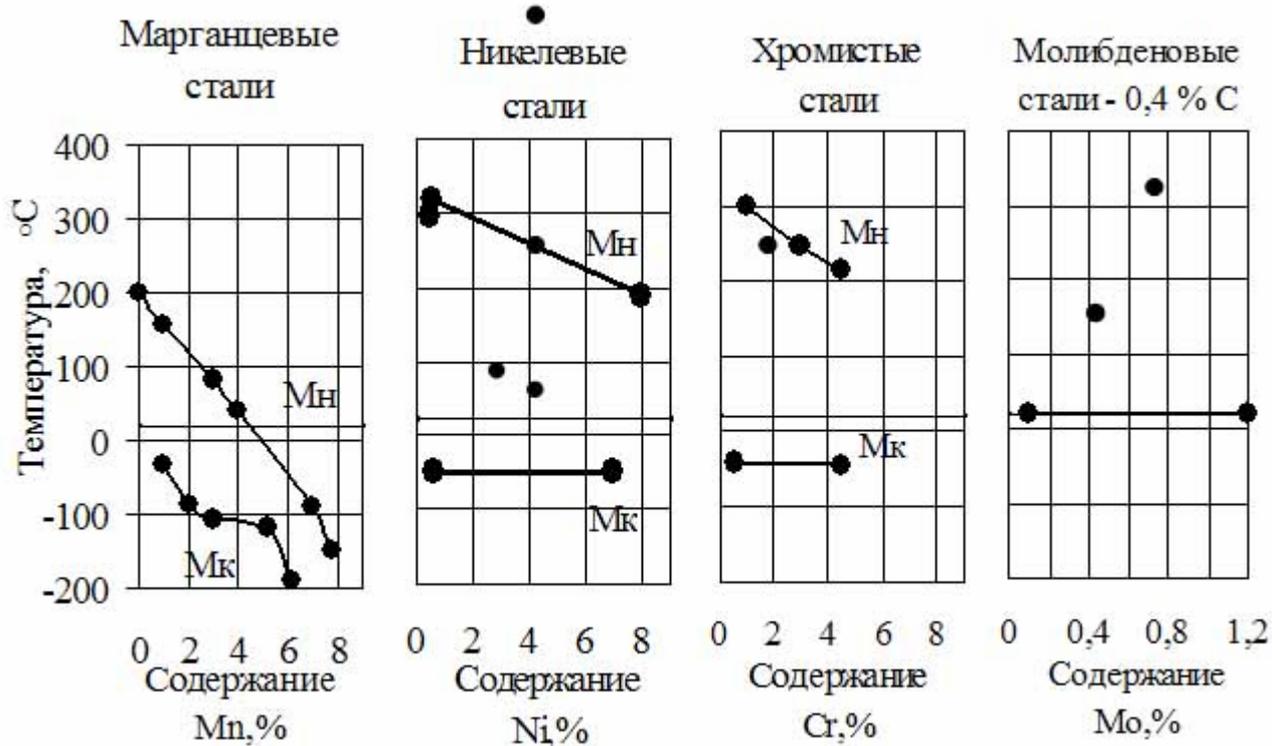
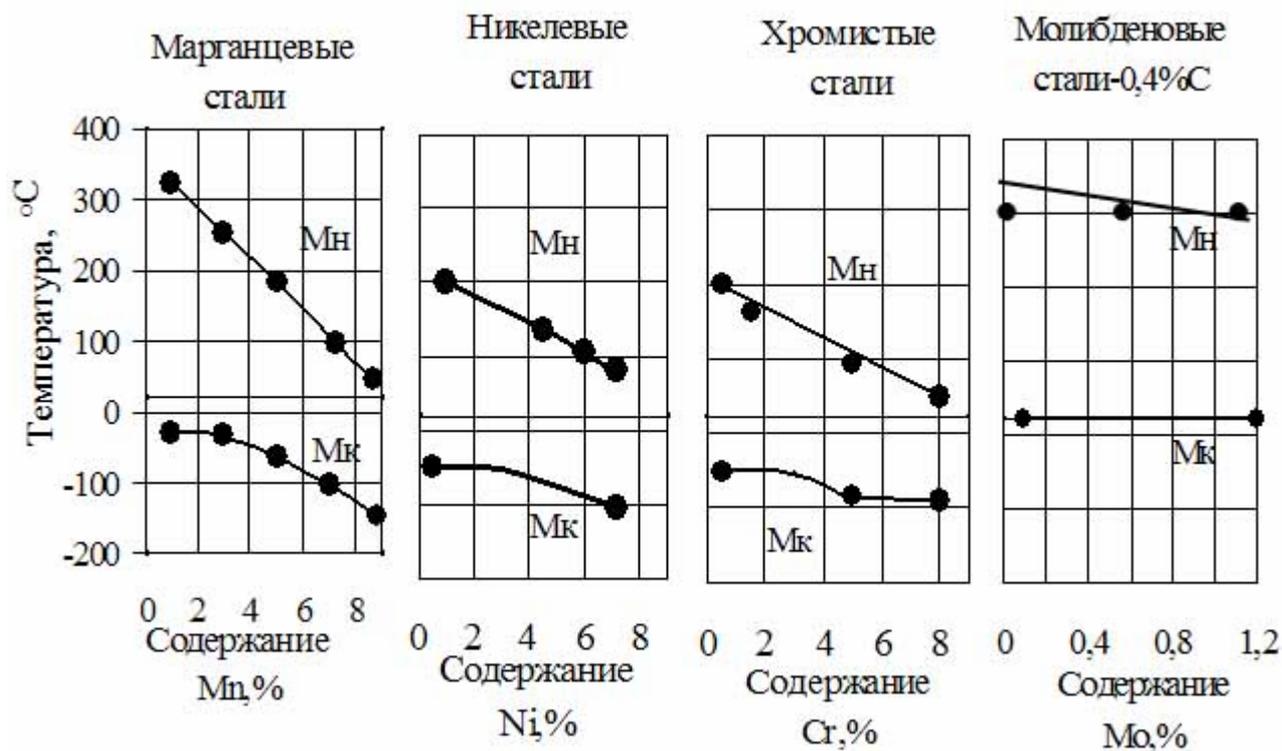


Рисунок 2.14- Влияние углерода на температуру начала (M) и конца (Mк) мартенситных превращений[194]

Способность аустенита к превращению в мартенсит деформации зависит от его состава, характера и величины напряжений, создаваемых абразивными телами в локальных объемах поверхности при изнашивании. Мартенсит, в силу его строения и образования, характеризуется наличием большого числа микроскопических и субмикроскопических трещин, которые располагаются чаще всего в местах стыка мартенситных пластин [194].



a)



б)

Рисунок 2.15 – Влияние легирующих элементов на температуру мартенситного превращения в сталях с содержанием углерода 0,6 % (а) и 1,0 % (б) [194]

В связи с этим сам мартенсит слабо сопротивляется разрушающему действию абразивных тел при изнашивании. Известно, что углерод снижает температуру начала превращения (рис.2.5). На положении мартенситных точек он влияет гораздо интенсивнее, чем остальные легирующие элементы (рис.2.14). Конец мартенситного превращения находится ниже 0°C уже при его содержании в сталях выше 0,5-0,6 %. Повышение содержания углерода от 0,2% до 1,2% снижает точку начала мартенситных превращений с 400°C до 160°C, т.е. на 240°C. При введении 1%С, марганец на 45°C, Cr-35°C, V-30°C, Mo-25°C, Ni-26°C, W-10°C, Cu-7°C, Si-0°C, кобальт повышает мартенситную точку на 12°C, Al-18°C (рис.2.15) [194]. Чем больше содержание углерода в твердом растворе, тем эффективнее влияние легирующих элементов на положение мартенситной точки, которое определяется составом аустенита. Карбиды не оказывают влияния на температуру мартенситного превращения и характер мартенситной реакции [194].

Количество образующего мартенсита деформации определяется кривой (рис.2.9) точка G_m которой характеризуют минимальную величину напряжений, вызывающих мартенситное превращения. Образование мартенсита деформации зависит от отношения температур мартенситного интервала и деформации (изнашивание). Степень мартенситного превращения уменьшается с повышением температуры деформации и, при некоторой температуре, деформация аустенита уже не сопровождается образованием мартенсита [194].

Анализ влияния температуры нагрева металла и внешнего давления изнашивающей среды на рабочей поверхности детали показывает, что от этих факторов существенно зависит износостойкость, срок службы и работоспособность машин и агрегатов. Эти параметры изнашивания для разных материалов действуют не одинаково. Так, если износостойкий сплав имеет стабильную структуру, не способную к превращениям под действием абразивных тел, то их износостойкость обратно пропорциональна величине нагрева и давлению изнашивающей среды. Степень этой пропорциональности при одном и том же ее характере, зависит от химического состава износостойкого материала, фазового состава и дисперсности упрочняющей фазы. В случае, когда мы имеем дело с металлом, обладающим не стабильной структурой, способной к превращениям при изнашивании, то зависимость износостойкости от условий изнашивания (температуры и давления) будет значительно более сложной. Если рабочие температуры агрегата или локальная температура, возникающая в месте контакта в месте с абразивным зерном, ниже

температуры мартенситных превращений (см. рис. 2.9 и 2.15), то в процессе эксплуатации под давлением абразивов возможны структурные превращения с образованием мартенсита деформации, приводящие к упрочнению рабочего слоя и износостойкость будет выше, чем у сплавов со стабильной структурой при таком же уровне легированности. Нагрев в процессе изнашивания сплава с нестабильной структурой до температуры выше температуры начала мартенситных превращений (см. рис. 2,14 и 2,15) приведет к обычным структурным превращениям аустенита в феррито-перлитную смесь, не сопровождающихся значительным упрочнением рабочего слоя. Износостойкость материала в этих условиях повышаться не будет.

Влияние давления изнашивающей среды на рабочую поверхность детали из материала нестабильной структуры имеет сложный характер [259,260]. Образование мартенсита деформации в таких материалах в процессе их взаимодействия с абразивами, начинается с давления, имеющего определённую величину G_m (см. рис. 2.9). По мере увеличения давления, превышающего G_m , количество мартенсита деформации растёт пропорционально величине давления. При этом рабочая поверхность детали значительно упрочняется и износостойкость детали возрастает.

Таким образом, если температура детали превышает температуру начала мартенситных превращений (M_n) (см. рис. 2.14 и 2.15), то при любом давлении изнашивающей среды мартенсит деформации образовываться не будет, упрочнение не произойдёт и износостойкость не увеличится.

В случае если температура нагрева детали в процессе эксплуатации ниже линии M_n , характеризующей начало мартенситных превращений (см. рис. 2.6) и давление ниже величины G_m (см. рис. 2.4), упрочнение также не произойдёт. Если же температура рабочей поверхности будет ниже линии мартенситных превращений M_n , а давление выше G_m (см. рис. 2.9) в процессе эксплуатации будет появляться мартенсит деформации и, следовательно, будет расти упрочнение материала и износостойкость. Пресс-формы для прессования огнеупоров, изготовленные из стали типа X12 после термической обработки, в результате которой в структура стали содержит достаточное количество остаточного нестабильного аустенита и в процессе прессования на рабочую поверхность оказывается большое давление происходит значительное упрочнение контактируемых слоев и износостойкость таких пластин возрастает в несколько раз.

Лопатки асфальтосмесителя работают в иных условиях температуры и давления. В результате на их рабочей поверхности упрочнения не происходит и износостойкость не увеличивается. В сплаве со стабильной структурой воздействие абразивных частиц при трении вызывает в тонких поверхностных слоях дробление и фрагментацию зерен, искажение кристаллической решетки и т. д., что приводит к упрочнению. Отсутствие в сплавах со стабильной структурой фазовых превращений приводит к тому, что степень упрочнения только за счет деформационного воздействия не достигает высоких значений.

Величина давлений абразивной массы оказывает существенное влияние на интенсивность изнашивания сплавов (рис.2.16). В начале при давлении до 50 -100 ГПа удельный износ сплавов со стабильной структурой возрастает почти по линейному закону. При дальнейшем увеличении давления рост удельного износа уменьшается и, достигнув максимума, начинает снижаться.

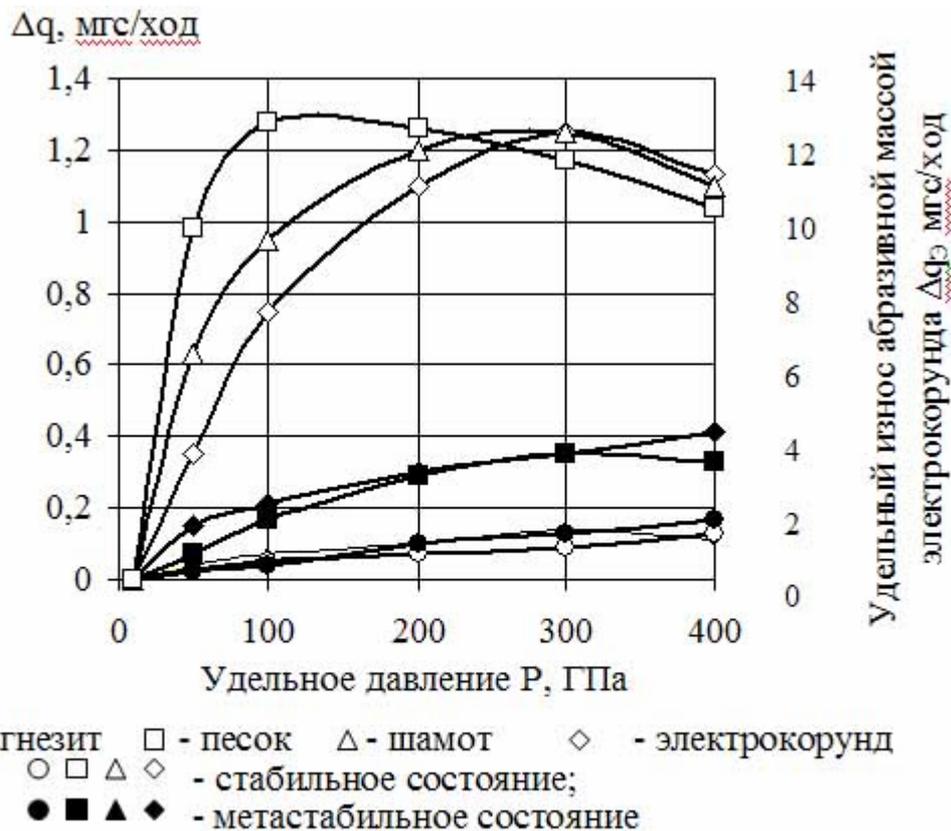


Рисунок 2.16 – Зависимость удельного износа (Δq) стали X12Ф1 от давления абразивных масс [228]

Постепенное снижение скорости изнашивания с ростом контактной нагруженности является следствием упрочнения или изменения процесса изнашивания, обусловленного влиянием нагрузки на характер взаимодействия абразивных частиц с поверхностью сплава.

Существенное отличие износостойкости сплавов в стабильном и метастабильном состоянии (см. рис. 2.16) объясняется различной их упрочняемостью в процессе изнашивания. Высокая микротвердость и износостойкость метастабильных аустенитных сплавов, в поверхностных слоях которых происходит глубокие деформационные $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, являются следствием существенных изменений тонкой структуры, вызванных этими превращениями. С увеличением степени деформации аустенита происходит рост числа плоскостей скольжения, измельчение блоков и зерен. При этом полученные дефекты в процессе деформации аустенита переходят в мартенсит и существенно увеличивая его твердость. Кроме того, происходит дополнительное упрочнение и повышение плотности дислокаций за счет фазового наклепа [249,258].

При абразивном изнашивании степень пластической деформации определяется уровнем контактных напряжений, возникающих при взаимодействии абразивных частиц с металлом, которые зависят от механических свойств, радиуса контактной поверхности, нормальной нагрузки и степени закрепленности частицы в абразивной массе [251,252]. При возрастании давления абразивной массы увеличивается напряжения в микрообъемах, что способствует пластической деформации поверхностных слоев, при этом полнота $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений и упрочнения увеличиваются. Если при возрастании нагрузки происходит интенсивное дробление абразивных частиц, то величина контактных напряжений снижается, что уменьшает интенсивность фазовых превращений изнашиваемой поверхности.

Таким образом, как показано в работе [228], повышение давлений при абразивном изнашивании, с одной стороны, приводит к увеличению контактных напряжений, благодаря повышению нормальных нагрузок и степени закрепленности частиц в массе, с другой, - уменьшению напряжений за счет дробления абразивных частиц. Суммарный эффект этих процессов зависит от величины давлений и свойств абразивных материалов. Если процесс дробления зерен происходит постепенно (шамот, электрокорунд) и они разрушаются, образуют более мелкие фракции,

способные еще производить значительное изнашивание, то резких перегибов на кривых зависимости $\Delta q=f(\text{уд.})$ не наблюдается (рис.2.16).

В связи с тем, что степень упрочнения сплавов в стабильном состоянии имеет прямолинейный, а метастабильных - сложный характер отношение их удельных износов в зависимости от давлений не является постоянной величиной. При малых удельных нагрузках, когда абразивные частицы слабо закреплены и могут перекатываться по поверхности, только малая часть их совершает микрорезание и пластическую деформацию металла. Таким образом, при изнашивании абразивными массами максимальная степень упрочнения метастабильных аустенитных сплавов и их высокая износостойкость реализуется в интервале давлений, обеспечивающих достаточную степень закрепленности частиц массы, однако не приводящих еще к их интенсивному дроблению.

2.4 ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И СРОКА СЛУЖБЫ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.

Различными отраслями промышленности и сельского хозяйства ежегодно расходуется сотни тысяч тонн металла на изготовление запасных частей и замену ими быстроизнашивающихся деталей: различного рода штампов, рабочих органов дробильных механизмов, деталей землеройных машин, валков прокатных станков, почвообрабатывающих машин и других деталей. При этом затрачивается большое количество труда, увеличиваются простои агрегатов для замены изношенных деталей, снижается производительность машин и аппаратов. Поэтому повышение износостойкости и срока службы машин весьма важная задача науки и производства особенно в современных условиях, когда оборудование всех предприятий существенно изношено, а перспективы его замены в ближайшее время нет в связи с общим падением производства и отсутствием средств для оплаты заказов на изготовление или покупку новых машин и механизмов.

Повышение износостойкости и срока службы машин может быть достигнуто одним из следующих методов: рациональным конструированием, соответствующим выбором материала, термической или химико-термической обработкой, и износостойкой наплавкой.

Конструктор обычно пользуется соображениями наилучших способов обеспечения функциональных возможностей машины, выбирая материал детали и её размеры в соответствии с расчетом на прочность, её дизайном и не всегда принимает в расчёт особенности изнашивания и характеристики способности материала к сопротивлению изнашиванию, что обуславливает возможное увеличение срока службы быстроизнашиваемых деталей за счёт их рационального конструирования.

Износостойких материалов разработано много. Главные требования, которые закладывались их разработчиками, сводились к тому, чтобы обеспечить получение металла наибольшей твёрдости. При этом в состав сплава вводились легирующие элементы в большом количестве. Общее содержание легирующих элементов в сплаве достигало до 60%. Естественно, что далеко не во всех случаях использовались большие потенциальные возможности, заложенные в сплав таким легированием.

2.4.1 ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.

Изнашивается, как правило, поверхностная зона металла. В некоторых случаях, когда незначительные изменения геометрических размеров детали приводят к выходу из строя всего узла или машины, величина износа составляет всего лишь несколько микрометров. В связи с этим необходимо упрочнение только поверхностных слоев. Одним из способов, который может в некоторых случаях решить такую задачу, является термическая обработка поверхностных слоев методами Т.В.Ч. или химико-термическая обработка.

Поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты достаточно распространенный метод упрочнения, при котором в поверхностном слое реализуется классическая схема закалки, основанная на превращении аустенита в мартенсит. Толщина упрочнённого слоя достигается регулированием глубины прогрева деталей при равном по всему объёму содержании углерода которое должно превышать 0,3%. Максимальная твёрдость на поверхности за счёт высокой скорости нагрева и кратковременной выдержки на 5-7 HRC выше твердости тех же сталей, закалённых при печном нагреве.

Закалка Т.В.Ч. повышает износостойкость упрочнённого слоя вследствие образования в

поверхностном слое напряжений сжатия и незначительного повышения твёрдости. Это достаточно прогрессивный метод допускающий применение автоматизации и механизации производства. Однако он не свободен от недостатков т.к. для его осуществления требуется специальное оборудование - высокочастотные генераторы, эксплуатация которых связана с и большим расходом электроэнергии.

Термическая обработка токами высокой частоты может производиться на плоских поверхностях или на деталях, имеющих форму тел вращения. При этом поверхность детали приобретает высокую твёрдость и существенную износостойкость, а сердцевина детали остаётся достаточно пластичной, способной воспринимать динамические и знакопеременные нагрузки. Применение закалки ТВЧ ограничивается тем, что этот процесс эффективен не для любых материалов.

Для повышения износостойкости деталей из сплавов не воспринимающих закалку наиболее эффективно применение химико-термической обработки: насыщение поверхностного слоя стали углеродом - цементация, азотом - азотирование, азотом и углеродом одновременно - цианирование, бором - борирование, с последующей термической обработкой по соответствующим режимам. При этом поверхность стали приобретает иной состав, содержащий очень твёрдые включения: карбиды, нитриды, бориды. Структура матрицы такого сплава после термической обработки становится в поверхностном слое и сама достаточно твёрдой, и за счёт включений карбидов, нитридов, боридов, увеличивающих ещё более агрегатную твёрдость вследствие чего приобретает весьма высокую износостойкость, сохраняя в сердцевине необходимую пластичность и следовательно способность работать в различных условиях нагружения.

Цементацию обычно производят при 940-960°C. Глубина цементированного слоя в сталях с содержанием углерода 0,10...0,30 % достигает 2,5 мм. При этом содержание углерода у поверхности составляет 0,8... 1,0%. Закалка детали после насыщения с последующим низким отпуском при 160...180°C обеспечивает получение мартенситной структуры поверхностного слоя с твердостью на уровне 60...62 HRC. Сопrotивляемость изнашиванию цементированной поверхности сопоставима с сопrotивляемостью изнашиванию азевтктоидных инструментальных сталей.

Азотирование осуществляется с использованием аммиака при температуре 550...650°C и длительности процесса 40...80 часов. По механизму структурообразования упрочнённого слоя, глубина которого около 0,5 мм, есть существенные отличия от цементации и закалки Т.В.Ч., так как упрочнение в этом случае происходит не за счёт мартенситного превращения, а благодаря образованию нитридов Fe₂N, Fe₄N, AlN, Cr₂N и др. При этом в последующей закалке нет необходимости, т.к. она не может повлиять на твёрдость поверхности детали.

Азотированный слой обладает высокой устойчивостью к тепловому воздействию при эксплуатации. Разупрочнение мартенсита закалки и, следовательно, снижение твердости в сталях перлитного класса начинается при температурах 200...250°C, в то время как азотированный слой сохраняет свои свойства даже при 500...600°C, что и предопределяет его высокую износостойкость. Окончательную механическую обработку деталей, производят только до азотирования. После азотирования возможно выполнение только шлифования, что обуславливается малой толщиной и высокой твердостью азотированного слоя. Насыщение поверхности детали бором в твердых, жидких и газовых средах производят при температуре 1000...1100°C. Упрочнённый слой твёрдостью 1600...2000 HV. Характеризуется наличием столбчатых кристаллов с ромбическими тетрагональными боридами, которые очень устойчивы к тепловому воздействию и сохраняют твёрдость до 800°C. Недостатком борированного слоя является его хрупкость. В условиях абразивного изнашивания, особенно с ударами борирование менее эффективно, т.к. упрочнённый слой небольшой толщины (0,1...0,3 мм) продавливается абразивными частицами, растрескивается и отслаивается.

Титанирование производится в порошковых смесях, расплавах солей электролизным, безэлектролизным способом, в паровой фазе и с использованием вакуума, в газовых смесях, а также с местным с нагревом Т.В.Ч. Титанирование при 1100... 1250°C, обеспечивает получение высокой микротвердости и толщины слоя в пределах 0,3...0,5 мм.

Недостатками всех приведенных выше методов, кроме цементации и закалки Т.В.Ч. являются небольшая толщина упрочненного слоя и плохая его связь со структурой базового металла. При форсированных режимах эксплуатации упрочнённый слой быстро срывается с поверхности детали. В частности, борирование пытались применять для упрочнения пластин пресформ и шарошек буровых долот, но безуспешно, т.к. слой в процессе работы растрескивался и отслаивался [17]. Некоторые из приведенных выше методов упрочнения не технологичны, производственный цикл имеет достаточно длительный период, культура производства приведенных технологий требует модернизацию, механизация труда рабочих ограничена.

2.4.2 ИЗНОСОСТОЙКАЯ НАПЛАВКА.

Наплавка является мощным средством экономии затрат живого и овеществлённого труда в деле повышения долговечности быстроизнашиваемых деталей и узлов оборудования, машин и механизмов.

Наиболее универсальным, экономичным и широко применяемым в народном хозяйстве средством восстановления и изготовления деталей машин и механизмов, придания им специальных качеств, способствующих росту износостойкости, является наплавка. Этот процесс представляет собой нанесение на специально подготовленную поверхность изготавливаемых или ремонтируемых деталей расплавленного присадочного металла, образующего с поверхностными слоями основного металла сплав с высокими механическими и служебными свойствами.

Потребность в наплавочных материалах в качестве покрытий рабочих поверхностей быстроизнашиваемых деталей при их изготовлении, восстановлении и ремонте нарастает с каждым годом во всех областях промышленности.

Наплавка стала наиболее важным и эффективным способом борьбы с износом. Особенно широко наплавка применяется при ремонте и упрочнении новых деталей металлургического оборудования (засыпные аппараты доменных печей, катки мостовых кранов, рабочие органы дробилок, пескометов, валки горячей прокатки, штампы и др.) сельскохозяйственной техники (лемеха плугов, диски борон, лапы культиваторов), дорожных и строительных машин (зубья и ковши экскаваторов, деталей бульдозеров, грейдеров, лопатки и брони асфальтосмесителей и др.) в кирпичном, стекольном, керамическом производствах, изготовление огнеупорных изделий (пресформы, рабочие детали брикетных прессов), рудомелющие агрегаты, на железнодорожном транспорте (колесные пары электровозов и тяговых агрегатов, автосцепок и др.), лесопильной промышленности (зубья рамных пил, коросниматели, машины для приготовления щепы), рабочие поверхности ходовой части машин гусеничного хода, в автомобильном транспорте (клапаны двигателей внутреннего сгорания), в буровой технике (узлы и детали бурильного оборудования и инструмента, шарошки буровых долот, поршневые буровые насосы, трубные системы, по которым прокачивают жидкость или газ с абразивом) и многое другое в иных отраслях народного хозяйства [177].

Масса сплава, наносимого в процессе наплавки, обычно невелика и составляет 2-6 % массы самой детали, что определяет высокую экономическую эффективность наплавки. Наплавка позволяет повысить износостойкость детали в зависимости от наплавочного сплава и условий эксплуатации в 2-10 раз, а в некоторых случаях и более, сэкономить тысячи тонн стали (часто высоколегированной) снизить трудовые затраты и простои при ремонте оборудования. Задача повышения износостойкости и срока службы деталей машин методом наплавки износостойких покрытий стала насущной для современной техники [178].

Чаще всего наплавку применяют как восстановительную операцию начальных формы и размеров детали. Наплавочным материалом может быть как материал упрочняемой детали, так и иной с более высокими механическими и физико-химическими характеристиками. Развитие этого метода упрочнения сводится к поиску более износостойких материалов, чем материал упрочняемой детали. В качестве наплавочных материалов обычно используют легированную сталь. Главные факторы, регламентирующие износостойкость: химический состав наплавленного материала, возможность последующего дополнительного упрочнения, структурная устойчивость наплавленного слоя в условиях температурного воздействия при изнашивании.

Обычно наплавочные материалы различают по составу и свойствам. В США [100] наплавочные материалы разделяют в зависимости от химического состава на четыре группы: 1) малолегируемые на железной основе (от 2 до 12 % легирующих элементов); 2) высоколегируемые на железной основе (от 12 до 50 % легирующих элементов); 3) материалы на основе никеля и кобальта; 4) материалы, содержащие в основном карбиды вольфрама (75 % и выше).

Наиболее распространённые износостойкие наплавочные материалы включают в себя: аустенитные высокомарганцовистые стали, хромистые стали, карбидные стали класса быстрорежущих, высокохромистые чугуны; хромовольфрамовые теплостойкие стали, кобальтовые сплавы с хромом и вольфрамом, никелевые сплавы с хромом и бором, никелевые сплавы с молибденом, карбидные спечённые сплавы и т.д. [66,177]. Система легирования наплавочных материалов охватывает большой перечень сочетаний: Fe-C-Cr; Fe-C-Mn; Fe-C-W; Fe-C-Cr-Mn; Fe-C-Cr-B; Fe-C-Cr-Ni; Fe-C-Mo; Fe-C-Cr-Mo; Fe-C-Cr-W; Fe-C-Cr-W-V; Fe-C-Cr-W-B и т.д. Основные структурные составляющие таких сплавов после наплавки: мартенсит (58...60 HRC); аустенит (35...40 HRC); перлит (50 HRC); аустенит и ледебурит (40...50 HRC); ледебурит и карбиды (60... 63 HRC); сорбит (50... 52 HRC) и т.д. Количество углерода и легирующих элементов в наплавочных сплавах обычно колеблется в широких пределах: C- от 0,3 до 4,8 %; Cr - от 2 до 30 %; Mn - от 0,5 до 15 %; W - от 1 до 18 % ; B - от 0,1 до 6 %.

Износостойкость наплавочных материалов существенным образом зависит от типа и количества карбидной фазы в сплавах. Карбиды способствуют также сохранению устойчивости начальной структуры сплава при эксплуатации, осложненной повышенной температурой. Чаще всего упрочняющая фаза в наплавочных сплавах содержит карбиды: Fe₃C; Mn₃C; Cr₇C₃; W₂C; WC; VC; TiC; V₄C, Mo₂C, и др., а также карбобориды, нитриды, железа и легирующих элементов.

В дорожном строительстве для приготовления битумоминеральных смесей широко используются двухвалковые смесители периодического действия. К одной из наиболее быстроизнашивающихся деталей смесителя относятся лопатки роторов. Исследования [225] показали, что большей износостойкостью в условиях работы лопаток асфальтосмесителей обладают сплавы, имеющие упрочняющую фазу в виде боридных игл. При этом в ряде работ указывается, что максимальный эффект увеличения способности сплава к сопротивлению абразивному разрушению достигается когда боридные иглы расположены перпендикулярно плоскости изнашивания. Ориентация боридной иглы в матрице сплава зависит от направления теплоотвода и совпадает с ее большой осью. Таким образом, при разработке технологии наплавки лопаток асфальтосмесителей необходимо подходить с позиций максимального использования такого важного резерва, как направленная кристаллизация сплава, позволяющая полнее реализовать потенциальные возможности, заложенные в данных износостойких материалах.

Потеря массы при испытании в условиях малых давлений абразивной среды незначительно зависит от содержания первичных карбидов и эвтектики особенно когда содержание углерода выше 4,2 % [210].

В работе [211] отмечается существование корреляции между количеством больших первичных карбидов и величиной износа при больших давлениях абразивных тел. Наличие большого количества карбидов VC и NbC, вторичных карбидов MeC, Me₃C, а также карбидов, находящихся в вязкой матрице, которая препятствует их выкрашиванию, обеспечивает высокую износостойкость наплавленного металла. Оптимизация наплавленного металла системы Fe-C-Mn-Cr-V-Nb-B при наплавке шнеков шлаковых центрифуг обеспечила увеличение износостойкости в 5-6 раз по сравнению с электродами марки Т-590 и в 2-3 раза по сравнению с наплавками порошковой проволокой ПП-АН170 [215].

Величина износа возрастает по мере уменьшения размеров первичных карбидов и увеличения расстояния между ними [215]. Микролегирование и модифицирование при электрошлаковой наплавке обеспечило высокие механические свойства, горячую твёрдость, износостойкость и термическую выносливость металла типа 100ХНМ и 100СХНМ [216].

Существенным недостатком высоколегируемого наплавленного металла является появление трещин, как в самом процессе наплавки, так и при последующей эксплуатации детали. Образование трещин в тонком поверхностном слое связано с увеличением напряжений в результате фазовых

превращений и разрушении карбидной эвтектики.

Для стабилизации твёрдого раствора и изменения карбидной эвтектики наплавленный металл модифицировали феррониобием ФН-1. Структура металла приобрела мелкозернистое строение с мелко раздробленной карбидной эвтектикой, что исключило появление трещин в наплавленном металле [221].

Для восстановления износостойкой наплавки зубьев ковшей экскаваторов австралийские исследователи рекомендуют сложные сплавы на основе железа, содержащие 5 % С; 22 % Cr; 7 % Nb и 1,0% В, или 5% С; 6 % Cr; 7 % Ti;, а также карбиды вольфрама в матрице на основе никеля. Объём карбидной фазы в таких сплавах достигает 80%. Однако при этом, как сообщается в работе [213], была достигнута сопротивляемость абразивному изнашиванию с сочетанием с высокой пластичностью и хорошей способностью противостоять ударным нагрузкам.

При производстве строительных материалов, в дорожном строительстве, а также при выполнении земляных работ широко используется оборудование оснащенное элеваторами ковшевого типа, осуществляющим транспортировку сыпучих материалов на определенные расстояния. Надежность работы данных механизмов определяется главным образом сроком службы ковшей элеваторов, которые в процессе эксплуатации подвергаются изнашиванию высокоабразивными смесями песка, щебня, отсева и т.п., что приводит к быстрому разрушению захватывающей рабочей кромки ковша, уменьшению его емкости и, как следствие, к снижению производительности и увеличению энергозатрат.

Недостаточный срок службы ковшей элеватора ведет к необходимости их частой замены, а следовательно, к остановке технологического цикла, что вызывает значительное снижение рентабельности производства за счет увеличения затрат связанных с ремонтом и простоями оборудования.

Исходя из этого, авторами [223] была поставлена задача - разработать на основе системы легирования Fe-C-Cr-V-Si, не содержащей дорогих легирующих элементов, сплав для защиты ковшей элеваторов. В процессе работы было проведено большое количество лабораторных испытаний различных сплавов (табл.2.3). В качестве абразивной массы использовали кварцевый песок Часов - Ярского (Украина) месторождения, физические и механические свойства которого представлены в таблице 2.4 Промышленные испытания проводились на натуральных образцах деталей. Для надежной сходимости результатов испытаний изготавливали пять натуральных образцов, упрочненных одним составом.

Производственные испытания проводили на элеваторе установки типа АСУ Д-597 при транспортировке смеси кварцевого песка (фракции до 1 мм) и 20-40% крошки гранита (фракции 0,5-2,5 мм), при температуре смеси 5-10°С и относительной влажности 25-30% в течение 360 часов машинного времени (что составляет в среднем 45-50 смен работы оборудования).

Относительную износостойкость определяли как отношение:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{\Delta L_{эт}}$$

где ΔL_0 - линейный износ образца, мм;

$\Delta L_{эт}$ - линейный износ эталона, мм;

Таблица 2.3 - Относительная износостойкость испытанных материалов

Испытанный материал (наплавка)	Агрегатная твёрдость HRC	Относительная износостойкость, ε	
		Лабораторные испытания по ГОСТ 23.208-79	Промышленное испытание в условиях эксплуатации ковшей элеватора АС Д-579
“Сормайт” ЦС-1 ГОСТ 21449-75 (Тип ЦрН – УЗОХ28Н4С3)	45-54	4,89	4,7
ЭН-Т590 ГОСТ 10051-75 (Тип Э-320Х25С2ГР0)	57-59	5,78	5,4
ПЛ-АН 170 ТУ 14-4-800-77 (Тип 80Х20Р3Т)	60-63	6,07	5,8
ЭН-ИТС-01 (Тип Э-350Х34Р)	59-62	5,45	5,03
ЭН-150Х13Р3Ф (А.С.1676174)	62-64	6,5	6,05
ЭН-240Х13С5Р2 (А.С.1731150)	60-62	6,9	6,65

• эталон сталь 45 отожженная HV 190-200

Линейный износ ΔL_0 , $\Delta L_{эм}$ определяли как среднее арифметическое значение, полученное из 8-10 измерений на рабочей кромке каждого натурального образца. В качестве эталона использовался ковш, изготовленный из стали 45 в отожженном состоянии.

Таблица 2.4 - Свойства абразивного материала.

Твердость H_{50} , ГПа	Твердость по Моосу	Плотность ρ , г/см ³	Гранулометрический состав, мм
10-13	7,0	2,5-2,6	не более 1,0

В результате математического планирования и оптимизации полученных уравнений регрессии влияния химического состава на свойства твердых покрытий, разработан новый оптимально - легированный сплав ЭН-240Х13С5Р2 (А.С.1731150 СССР) и технология изготовления ковшей элеваторов повышенной износостойкости, срок службы которых в 6,5 раза больше стандартных деталей.

Кроме этого, новый наплавочный материал может быть использован для увеличения срока службы не только ковшей элеваторов, но и других деталей, подверженных интенсивному абразивному изнашиванию без значительных ударных нагрузок (детали песковых насосов, лопатки дробебетных аппаратов, транспортировочные желоба, грохота и др.).

Для сплавов (Ti, W) С-WC-Co износостойкость при резании зависит от соотношения в размерах зерен карбидных фаз. При прочих равных условиях чем выше контраст в размерах зёрен С и WC, тем лучше режущие свойства сплавов [219].

Наплавленный металл, как правило, макронеоднороден, что проявляется в неравномерности его изнашивания в процессе эксплуатации. Исследованию макронеоднородности наплавленного металла посвящалось много работ, в которых использовались спектральный анализ (фактографический и фотоэлектрический), микрорентгеноспектральный, химический и другие методы анализа металлов [201-205]. Установлено, что конструкция порошковых лент их сварочно-технологических свойств, и техника наплавки оказывают заметное влияние на степень неоднородности распределения легирующих элементов по сечению наплавки [206,207].

Износ поверхностного слоя происходит неравномерно. Причиной этого служит наличие участков наплавленного металла с различной структурой и твёрдостью. Существенно снизить степень неоднородности наплавленного слоя по твёрдости можно посредством предварительного подогрева до температуры, близкой (или несколько превышающей температуру начала мартенситного превращения). В этом случае аустенитная структура сохраняется практически во всём наплавленном слое и последующее $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение происходит более замедленно, что способствует и более равномерному структурообразованию и распределению твёрдости [220].

Неравномерность химического состава наплавленного металла несколько усиливает избирательность процесса изнашивания особенно при взаимодействии с незакреплёнными абразивами, например в условиях работы асфальтосмесителей.

Для условий эксплуатации нефтепромыслового оборудования наиболее пригодны стали аустенитно-мартенситного класса с метастабильным аустенитом. Мартенситное превращение в процессе пластической деформации метастабильного аустенита вызывает дополнительное упрочнение металла [214].

Наиболее широкое применение в промышленности находят электроды, системы легирования углерод-хром-бор обеспечивающие получение в структуре наплавленного металла значительное количество упрочняющей фазы, содержащий бор в карбидах или боридах [66]: Т 590 с 1,5...4,0% углерода, 18,0... 27,0% хрома и 0,5... 1,5% бора; структура наплавленного ими металла, состоит из ледебурита и остаточного аустенита упрочнённых первичными карбидами Me_7C_3 и боридами $Cr_2(B;C)$.

Электроды Т-620, позволяющие получить металл состава: углерод 3,0...3,5%; хром 20..33%, бор 1,0..-1,6%, что обеспечивает получение первичных карбидов в ледебурите и остаточном аустените. Электроды БХ-2 с 0,55% углерода, 30...35% хрома, 7,6...8,0% бора, что обуславливает в структуре

металла образование крупных первичных карбидов в ледебурите.

Электроды ХР-19 с 3,0...4,8% углерода, 23...37% хрома, 1,0...1,6% бора и получение в структуре первичных карбидов Me_7C_3 , боридов $Cr(C;B)$ в ледебурите и остаточном аустените.

Электроды KBX-45 с 2,5...3,6% углерода, 23...27% хрома, 0,95...2,8% бора, наплавленный металл характеризуется ледебуритной структурой с равномерно распределёнными в ней первичными карбидами. Высокая активность бора по отношению к железу превышает преимущества боридов хрома [180].

В безборидных сплавах наиболее эффективны карбиды титана TiC и вольфрама W_2C .

Для деталей, работающих в условиях абразивного износа при нормальных температурах рекомендуется наплавленный материал следующего состава: C 2,25...4,5%; Si 0,2...0,4%; Mn 0,50...6,0%; Cr 24,0...35,0%, обладающий твёрдостью от 48 до 60 HRC и использующийся для наплавки деталей сельскохозяйственных машин, транспортёров, дробильно-размольного оборудования, бункеров, труб и пневмотранспорта, фрез глинофрезерных машин, валков углегибочных станков.

Для деталей, эксплуатирующихся в условиях абразивного износа при повышенных температурах используется наплавленный металл состава в зависимости от рабочей температуры.

Высокоуглеродистые и высокохромистые сплавы применяются для наплавки деталей, работающих при температуре до 500°C.

Для работы при температурах до 600°C рекомендуется [209] высокоуглеродистый и хромовольфрамовый сплав типа X10B14, содержащий 3,5...4,0% C ; 9...10% Cr ; около 14% W .

Механическая обработка такого сплава очень затруднена. Поэтому для работы при этой температуре детали, подлежащие механической обработке рекомендуется изготавливать из стали типа 3X2B8 и P18 [208].

Детали, подверженные абразивному износу при температурах до 800°C рекомендуется наплавлять твёрдыми сплавами типа стеллитов на основе кобальта (35...55%), содержащие углерод (1...4%), хром (15...45%), вольфрам (10...25%). Аустенитная структура таких сплавов упрочнена карбидами [115]. Стеллиты обладают значительной износостойкостью и прочностью, хорошим сопротивлением коррозии, эрозии и окалино-образованию при значительных температурах.

В композиционных материалах для наплавки деталей узлов трения, работающих на воздухе при температуре 20...1000°C целесообразно применение карбидов Cr_2C_2 и TiC [179].

В карбидах Cr_3C_2 растворяется 2...2,5% титана, что не снижает их микротвёрдость. Карбид Cr_3C_2 содержит углерода 39..40% ат (12,9... 13,3 мас.%). При увеличении углерода в карбидной составляющей с 12,4 до 13,2% мас.% происходит качественное изменение состава карбидов Cr_2C_2 и Cr_3C_2 до смеси Cr_3C_2 и графита [180].

Существенно отметить, что карбид титана TiC - сильно затрудняет рост зерна в сплаве, дополнительно способствует увеличению сопротивляемости разрушению рабочей поверхности детали при абразивном воздействии.

Сопротивление изнашиванию зависит от отношения в карбиде содержания легирующего элемента к углероду. Износостойкость тем выше, чем больше это соотношение [66].

При одновременном легировании износостойких наплавочных сплавов несколькими карбидообразующими элементами важно знать степень химического сродства этих элементов к углероду, и следовательно приоритетное образование одних карбидов перед другими при определённых температурных условиях. О величине этих сил можно судить по свободной энергии образования карбидов. При температуре в районе средней температуры сварочной ванны в процессе дуговой наплавки наибольшей силой химического сродства к углероду обладает титан (табл. 2.5), затем V , Cr , B , W , Mo , Fe .

При отношении титана к углероду $TiC = 4$ весь титан и углерод связаны в карбид TiC , который не переходит в твёрдый раствор; при $TiC > 4$ избыток титана переходит в раствор, при этом количество карбидов меньше и твёрдость сплава после закалки меньше, чем в первом случае. При $TiC < 4$, избыток углерода переходит в раствор, а при закалке при температуре выше 1200°C и часть карбида титана также может переходить в раствор.

Для однотипных условий изнашивания иногда применяют различные наплавочные материалы, поскольку достаточно обоснованных критериев их выбора пока нет [177]. Поэтому наплавочные

сплавы выбирают не под определённый вид изнашивания, а под конкретную деталь конкретной машины или оборудования. Большой перечень химического состава наплавочных сплавов свидетельствуют о том, что, как указывают Виноградов В. Н. и Сорокин Г.М. [177] нужны систематические исследования, учитывающие результаты изучения износостойкости сплавов разных структурных классов в условиях, максимально приближённых к реальным по всем параметрам характеристик этих условий.

В промышленности, строительстве, на транспорте и в сельском хозяйстве применяются практически все известные способы и разновидности наплавки. Непрерывно совершенствуются и внедряются в производство прогрессивные способы наплавки: порошковыми проволоками и лентами, электрошлаковый, индукционный, плазменный и др. На износостойкую и простую восстановительную наплавку расходуется более 5% всех электродов, 11% сварочной проволоки сплошного сечения и почти половину всей порошковой проволоки. В результате увеличения производства наплавочных работ достигается большая экономия металла, как за счёт восстановительной наплавки, так и за счёт повышения износостойкости.

Применение наплавочных процессов позволяет многократно восстанавливать изношенные детали оборудования, металлорежущий и штамповый инструмент, а также создавать новые биметаллические конструкции с требуемыми технологическими и эксплуатационными свойствами, которые во много раз повышают ресурс работы изделий, значительно сокращают расход конструкционных и легированных инструментальных сталей и снижают трудоёмкость их изготовления.

Благодаря этому удаётся достичь многократной экономии материальных, сырьевых, трудовых, топливно-энергетических и финансовых ресурсов за счёт существенного увеличения долговечности быстроизнашиваемых деталей, сокращения расходов на закупку запасных частей и "омертвления" по этой причине части оборотных средств [199].

Процесс износостойкой наплавки может осуществляться различными способами.

Постановка задачи наплавки, определяющая выбор способа осуществления этого процесса, начинается с чёткого формулирования задачи, которую необходимо решать и цели проведения этой работы - т.е. представления ожидаемого результата.

Эта работа не является тривиальной, т.к. необходимо обдумать всю программу планируемой работы [14].

Например:

Задача № 1 - решить поставленную проблему износа.

Цель - вернуть машину в работоспособное состояние.

Задача № 2- Предотвратить возникновение известной проблемы износа в новых условиях.

Цель - Обеспечить требуемую работоспособность машины.

Задача № 3 - Классифицировать материалы или виды обработки по износостойкости.

Цель - Дать исходные данные для выбора материала вида обработки, обеспечивающих оптимальную работоспособность.

Задача № 4 - Исследовать механизм изнашивания.

Цель - Создать материалы, стойкие против изнашивания в заданных условиях.

Задача № 5 - Разработать износостойкие материалы или виды обработки, повышающие износостойкость.

Цель - Извлечь прибыли при продаже материалов и технологии, или по до перестроечной технологии получить экономический эффект.

Руководствуясь такими подходами, мы строили свою работу по анализу износостойкости существующих материалов, полученных как из литературных источников, так и собственного опыта по исследованию сопротивляемости стали и сплавов абразивному воздействию в экспериментальных условиях.

Тщательное изучение большого числа результатов исследований, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе показало, что поиски состава износостойких материалов в большинстве данных по оценке влияния отдельных легирующих элементов и их комбинаций на износостойкость производились без учёта того, что процесс изнашивания включает действующие одновременно следующих три взаимосвязанных аспекта: изнашивающая среда, условия изнашивания и

изнашиваемый материал.

Разработка аналитической зависимости, учитывающей вклад каждой из этих составляющих единого процесса, задача весьма сложная, но и решение ее может обеспечить получение более полного представления о существе процесса изнашивания, химическом и структурном составе металла наиболее соответствующих оптимальному. Результаты теоретического анализа литературных данных проверялись в сопоставлении с экспериментальными исследованиями и производственным апробированием конкретного оборудования.

Износостойкие наплавочные материалы обычно являются высокоуглеродистыми. Введение в такой сплав легирующих элементов оказывают двойное действие. С одной стороны карбидообразующие элементы участвуют в образовании карбидной фазы, боридов, карбоборидов и т.д. С другой - легирующие элементы определяют строение и свойства матрицы, влияют на образование перлита, мартинита, аустенита стабильного или нестабильного.

Известно, что формирование структуры легированного металла зависит от содержания аустенито и ферритообразующих элементов, что иллюстрируется диаграммой Шеффлера. Однако эта диаграмма справедлива только для низкоуглеродистой легированной стали с содержанием углерода до 0,2% и в ней не учитывается наличие карбидов и при расчете эквивалента хрома феритообразования отсутствует ряд карбидообразующих элементов, таких, например, как V, W, Ti часто используемых в наплавочных сплавах. В работе [222] рекомендуется эквивалент хрома феритообразования рассчитывать по следующему соотношению:

$$C_{Г_{\text{экв}}} = Cr + Mo + 0,75W + 5V + 1,75Nb + 1,5Si.$$

Образование карбида данного элемента возможно, когда отношение количества карбидообразующего элемента к углероду равно некоторому критическому значению, определенному по стехиометрическому соотношению атомов в карбиде [115]. Так для Cr_7C_3 критическое значение $70 \times 0,83 = 65,1\%$; для $W_2C = 66,66 \times 3,23 = 215,33\%$; для $Mo_2C = 66,66 \times 1,27 = 114,67\%$; для $VC = 50 \times 0,11 = 45,5\%$; для $NbC = 50 \times 1,67 = 83,5\%$.

Авторы работы [222] разработали структурную диаграмму высокоуглеродистых наплавочных сплавов, учитывающую совместное воздействие всех карбидообразующих элементов по условному эквиваленту карбида хрома – Cr_7C_3 рис. 2.7. Ими предложен следующий хромовый эквивалент:

$$C_{Г_{\text{карб. экв}}} = Cr + 1,76Mo + 3,3 W + 0,71 V + 1,28Nb.$$

Из общего количества хрома в сплаве на образование карбидов затрачивается 60% [115]. Исходя из этого, определялось общее количество карбидов по следующей схеме [222].

1. Хромовый эквивалент, связанный в карбиде;

$$C_{Г_{\text{экв. в карб}}} = 60\% C_{Г_{\text{экв.}}};$$

2. Углерод, связанный в карбиде;

$$C_{\text{карб}} = C_{Г_{\text{экв. в карб}}} \times 1,07 \times 30\% \times 0,22/70\%;$$

3. Количество карбидной фазы. $K_{\text{карб}} = C_{Г_{\text{экв. в карб}}} + C_{\text{карб}}$

При совмещении структурной диаграммы матрицы и диаграммы карбидообразования анализ сплавов с разным содержанием Cr и C позволил нанести на диаграмму структурообразования матрицы линию критических значений количества карбидов (линия 1. рис. 2.17)

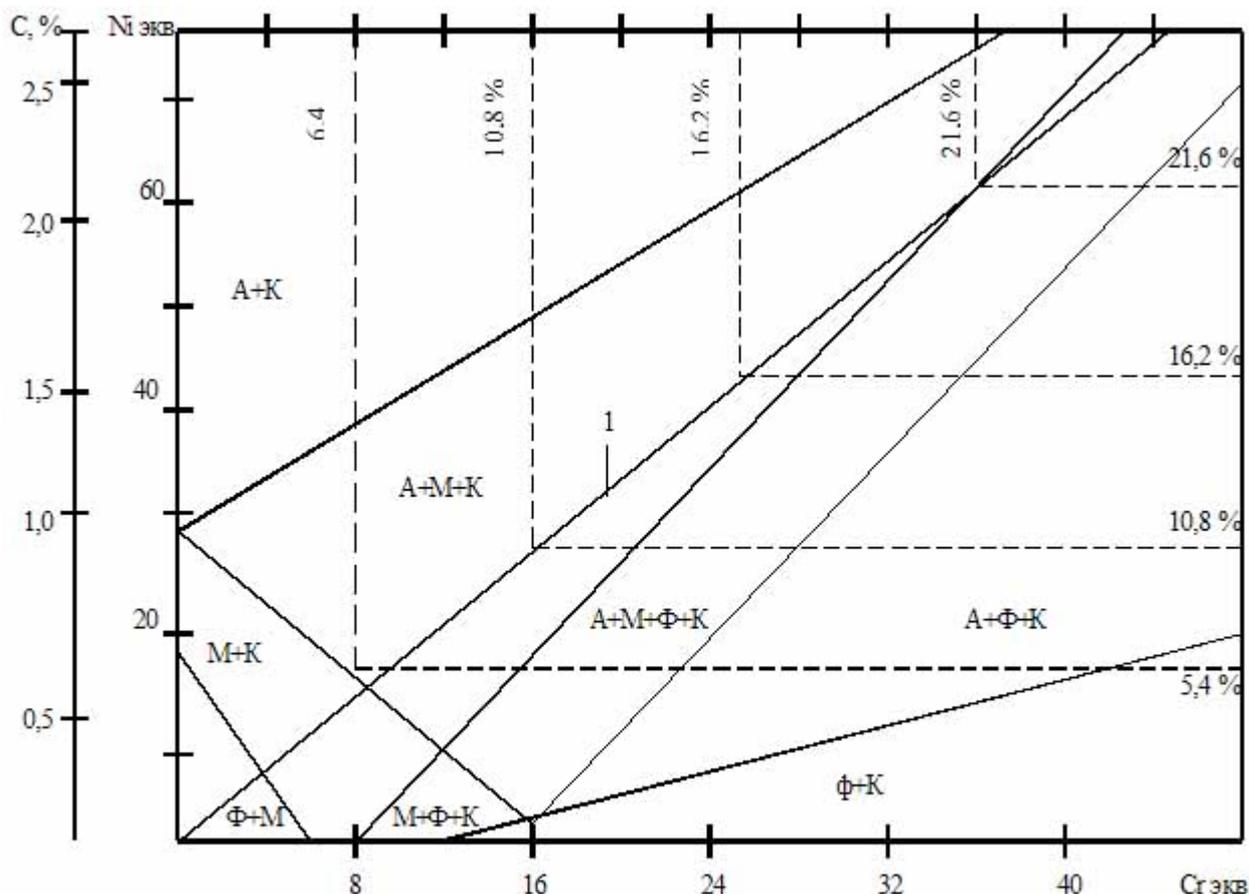


Рисунок 2.17 – Структурная диаграмма высокоуглеродистого наплавленного металла для двухслойной наплавки [115]

Положение начала линии 1 - точки А. Структурная диаграмма высоколегированных сплавов представляет собой группу диаграмм, каждая из которых объединяет сплавы с определённым содержанием Ni и Mn.

Естественно такая структурная диаграмма полезна для анализа износостойких сплавов, в том числе и для наплаваемых на лопатки асфальтосмесителей, однако необходимо учитывать то обстоятельство, что как диаграмма Шеффлера, так и предлагаемая авторами работы [222] справедлива только для равновесного состояния, которое не всегда достигается в условиях наплавки. Влияние легирующих элементов на износостойкость в результате изменения природы карбидов связано с изменением их твёрдости и сопротивления разрушению. Чем выше твёрдость карбида, тем сильнее они будут противодействовать влиянию абразивных тел и соответственно на рабочей поверхности детали будут появляться при их взаимодействии менее глубокие царапины. Твёрдость карбидов и их температура плавления представлены в таблице 2.6. Твёрдость и температура плавления упрочняющей фазы износостойких наплавочных материалов. Как видно из данных таблицы твёрдость карбида железа соизмерима с твёрдостью кварца ($\text{SiO}_2=10\text{-}11\text{ ГПа}$) абразивного материала наиболее часто встречающегося компонента изнашивающей среды и поэтому не может

[\(Просмотреть\)](#)

Таблица 2.5 – Свободная энергия образования карбидов некоторых износостойких сплавов [110] оказать активного сопротивления абразивному воздействию. Наиболее эффективно должно быть легирования бором в высокоуглеродистых наплавочных материалах, если оно приведёт к образованию карбида B_4C . При малом содержании углерода легирования бором менее эффективно, т.к. в этом случае могут образовываться бориды легирующих элементов, которые обладают менее высокой твёрдостью.

Таблица 2.6 - Твёрдость и температура плавления упрочняющей фазы износостойких наплавочных материалов.

Упрочняющая фаза	Fe ₃ C	Cr ₃ C ₂	WC	W ₂ C	VC	Mo ₂ C	TiC	NbC	CrB ₂	W ₂ B ₅	VB ₂	NbB ₂	TiB ₂	B ₄ C
Твёрдость Мпа	110500	112500	17500	30000	25000	16000	32000	20500	18000	26600	20800	25500	33700	55000
Температура плавления, °С	1923	2126	2998		31000		3450	3753						2623
Свободная энергия образования ΔF при T=2000°K	-3200 1900°K	-25850	-6000		-25600 1600°K	-5400 1100°K	-39400 1800°K							-12500 1500°K

3. ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И СРОК СЛУЖБЫ БЫСТРОИЗНАШИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.

В дорожном строительстве для производства битумоминеральных смесей широко используются двухвалковые смесители периодического действия [12,18,15,16]. К одним из наиболее быстроизнашиваемых деталей смесителя относятся лопатки роторов, которые в процессе эксплуатации подвержены интенсивному абразивному изнашиванию перемешиваемыми частицами гранитного щебня, микротвёрдость которых составляет 13,9-16,8 ГПа, а прочность 10-14 ГПа [17,18]. Высокая интенсивность изнашивания лопаток вызывает увеличение радиального зазора между её торцом и броней смесителя, что приводит к снижению качества приготовляемой смеси. Несмотря на значительное количество исследований по увеличению срока службы лопаток [19-23] проблема повышения их износостойкости остаётся актуальной вследствие того, что их приходится менять в 2-3 раза чаще, чем другие детали смесителя. Это значительно снижает производительность и технико-экономические показатели производства асфальтобетона. Так, по статистическим данным [12,15,19] в строительстве задействован парк машин общей стоимостью 18 млрд. рублей (в ценах 1991 г.), а расходы на техническое обслуживание и ремонт составляет 22,2% от стоимости основных фондов и равняются 4-м млрд. (в ценах 1991 г.), из которых около 5% приходится на затраты, связанные с заменой лопаток асфальтосмесителей.

3.1 КОНСТРУКЦИЯ, УСЛОВИЯ И МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ

Асфальтосмесительная установка ДС-117-2Е (рис. 3.1) представляет собой комплект технологического оборудования, предназначенного для приготовления различных асфальтобетонных и битумоминеральных смесей, основным технологическим процессом которого является смешивание гранитных частиц с органическим вяжущим битумом. Перемешивание осуществляется в лопастных смесителях периодического действия (рис.3.2) [20,21].

Технические характеристики двухвального смесителя периодического действия установки ДС-117-2Е:

Производительность, т/ч 25

Частота вращения вала, с-1 58

Количество лопаток, шт. 32

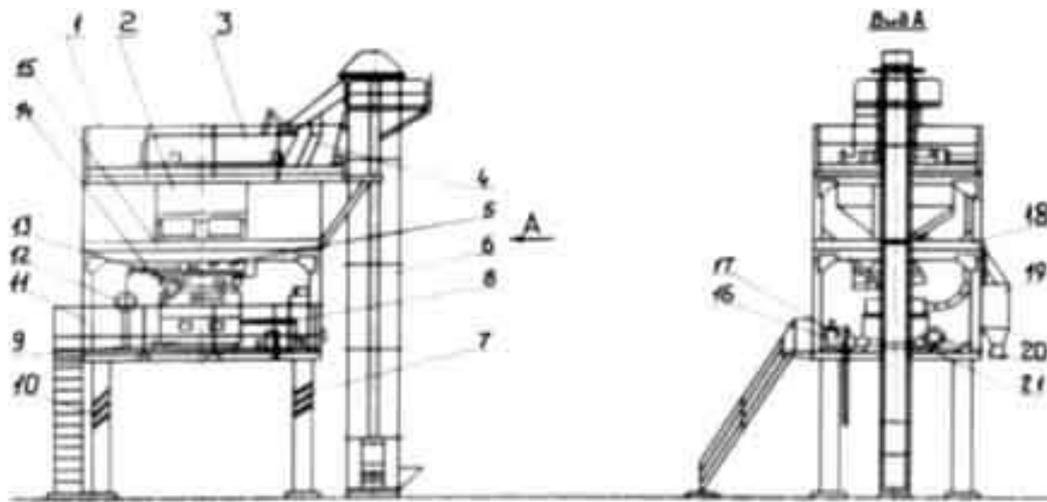
Мощность электродвигателя, кВт 22

Окружная скорость на рабочей кромке лопатки, м/с 2,4

Угол между плоскостью лопасти и осью вала 45°

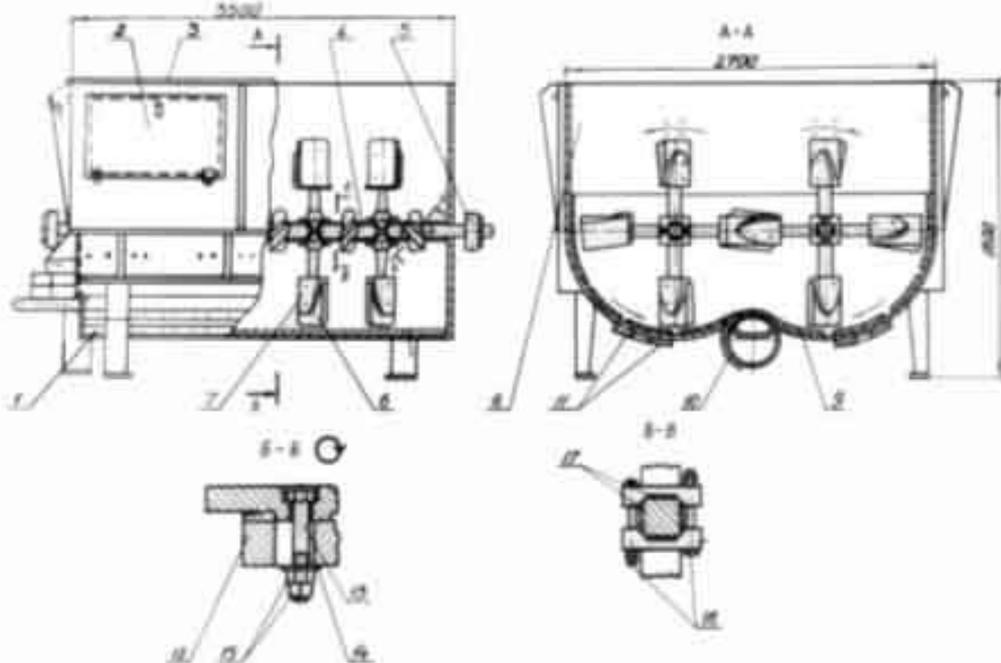
Начальный радиальный зазор между лопаткой и броней смесителя, 5-10 мм.

Минимальный допустимый износ лопатки в радиальном направлении, 5 мм.



1 - ограждение; 2,19- бункеры; 3- грохот; 4,18- лотки; 5,16 – элеватор; 7,10 - опоры; 8- бигумопровод; 9- двухвальный смеситель; 11,15-блоки; 12- циферблатный указатель; 13,17- дозаторы; 14- рычажная система; 20- электродвигатель; 21- редуктор.

Рисунок 3.1- Схема асфальтосмесительной установки ДС-117-2Е



1 - корпус; 2- смотровой люк; 3, 8- стенки; 4- вал; 5- подшипники; 6- лопатка; 7,12- стойка; 9- футеровочные листы (броневые листы); 10- затвор; 11- паровая рубашка; 13,16- болты; 14- шайба; 15- гайка; 17- закладные детали.

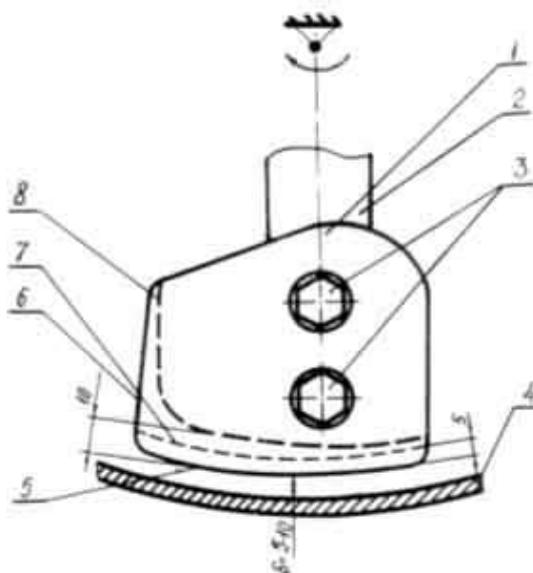
Рисунок 3.2- Двухвальный лопастной смеситель периодического действия

Корпус смесителя 1 (см. рис. 3.2) представляет собой ёмкость, внутренняя поверхность которой облицована сменными футерованными листами 9. С торцов корпус ограничен вертикальными стенками 8, а в днище находится разгрузочное отверстие, закрытое затвором 10. Лопатку 6 крепят к стойке 7 под углом 45° к оси вала и болтами 13 с потайной головкой. Стойки крепят на вал попарно и соединяют двумя болтами 16. Установленные таким образом лопатки образуют прерывистую винтовую поверхность, что обеспечивает смещение составляющих асфальтобетонной смеси как по направлению своего вращения, так и по продольной оси смесителя. В результате движения валов в противоположных направлениях происходит сложное движение смешиваемой массы, которая перемещается по днищу от стенок к центральной части корпуса, поднимается, перебрасывается из одной половины смесителя в другую и обратно, что способствует качественному перемешиванию.

Одной из основных технологических задач при производстве асфальтобетонных смесей является сохранение допустимого радиального зазора (см. рис.3.2) между лопаткой и корпусом смесителя. Однако, находясь в непосредственном контакте со смешиваемой массой, лопатка подвержена изнашиванию, в результате чего изменяются её геометрические размеры, что приводит к постепенному увеличению радиального зазора. Изнашивание различных участков лопатки не одинаково (рис. 3.3, а) из-за различных удельных давлений и скоростей скольжения абразивных частиц по поверхности трения [15,19]. Максимальная величина износа наблюдается на рабочей кромке лопатки, обращённой к днищу корпуса смесителя. Высокая интенсивность изнашивания в радиальном направлении приводит к снижению производительности и ухудшению качества выпускаемой продукции, поскольку на днище смесителя остаётся слой не перемешанной смеси. По этому, в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации срок службы лопаток определяется допустимым значением износа её в радиальном направлении и составляет 5 мм. Однако обычно при производстве асфальтобетона реальное увеличение величины допустимого износа рабочей кромки находится в пределах 10-15 мм [15,19,24].

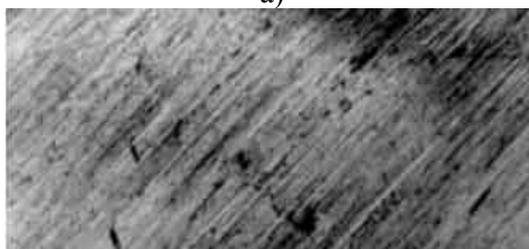
В связи с противоречивостью сведений о величине допустимого радиального зазора были проведены направленные исследования по определению допустимой величины износа лопаток в радиальном направлении с учётом условий начала заклинивания и дробления гранитных частиц, которое в значительной степени интенсифицирует процесс изнашивания поверхности трения и увеличивает нагрузки на валы и привод смесителя.

Многочисленными исследованиями, проведёнными отечественными и зарубежными учёными [29-43], установлены некоторые характеристики механизма абразивного изнашивания материалов. Однако особенности разрушения сталей и сплавов в условиях эксплуатации рабочих органов асфальтосмесителей этими характеристиками не охватывается. По данным [19] изнашивание лопаток, броней, стоек происходит вследствие режущего и царапающего действия гранитных частиц.



1- лопатка; 2- стойка; 3- крепежные болты; 4- броневой лист; 5- рабочая кромка; 6- торцевая кромка; 7- контур допустимого износа рабочей кромки лопатки; 8- контур реально допускаемого износа при длительной эксплуатации асфальтосмесителя.

а)



“натуральная величина”

б)

Рисунок 3.3- Величина износа лопатки (а) и поверхность рабочей кромки после эксплуатации (б):
(чугун 250Х5С2ГАТ, а.с. 429130)[19]

В других исследованиях [15,58] отмечается, что в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителей возможно наличие двух механизмов изнашивания - трения о полужагретый абразив и ударно-абразивное изнашивание, которое возникает в результате заклинивания и дробления абразивных частиц в зазоре между лопаткой и сектором брони смесителя. В то же время в литературе нет сведений о влиянии на характер разрушения поверхности трения жидкой битумной прослойки, образующейся между металлом и абразивными частицами, которая создаёт специфические особенности абразивного изнашивания в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителей. Поскольку взаимодействие абразивных частиц с изнашиваемой поверхностью может сопровождаться различными сопутствующими процессами - выделением тепла, увеличением плотности дислокаций в рабочем слое, структурными превращениями, то незнание особенностей протекания данных процессов в конкретных условиях эксплуатации не позволяет определить основные требования к повышению износостойкости сплавов.

Таким образом, разрозненность и недостаточность сведений о механизме изнашивания лопаток вынуждают, при выборе оптимального сплава для лопаток, основываться на данных других работ о механизме абразивного изнашивания в условиях, близких к эксплуатации лопаток асфальтосмесителей и результатах собственных направленных исследований.

Сложность явлений, протекающих в зоне взаимодействия металла с абразивным телом, обусловлена большим числом факторов, зависящих от свойств сплавов, характеристик абразивных частиц (твёрдость, прочность, форма и размер режущих граней, степень закреплённости), а также, условий нагружения и представляет собой совокупность различных элементарных процессов, непосредственно связанных с упрочнением и разупрочнением поверхностного слоя. Скорость их развития зависит от скорости ведущего процесса изнашивания, для протекания которого сложились наиболее благоприятные условия [30]. Специалисты в области изнашивания выдвигают различные гипотезы о механизме этого сложного процесса.

Так, например, Хрущёв М.М. и Бабичев М.А. [11,29] показали, что механизм абразивного изнашивания состоит из совокупности микрорезания и пластического деформирования. В то же время указывалось, что не все абразивные частицы способны производить микрорезание металла. Большинство зёрен оставляет на поверхности трения след в виде пластически выдавленных рисок и канавок.

Исследуя механизм изнашивания материалов о закреплённый абразив, Крагельский И.В. предложил считать главной причиной разрушения не микрорезание, а усталостное "передеформирование" одних и тех же микрообъёмов металла [31-33].

В работах Львова Н.Н. [34], при изучении разрушения рабочей поверхности строительных и дорожных машин, показано, что зарождение и развитие микротрещин в "навалах" выдавленной канавки является причиной сравнительно лёгкого отделения металла при повторном пластическом деформировании поверхности трения абразивными частицами.

Тененбаум М.М. [30] предложил комплексный механизм абразивного изнашивания, показав, что интенсивность изнашивания является функцией уровня контактных напряжений (G_k), величина которых главным образом зависит от нагрузки, свойств металла и абразивных частиц. Если величина контактных напряжений превышает предел прочности металла (G_b), то преимущественным механизмом будет прямое разрушение путём резания и царапания поверхности трения, обуславливающие наиболее интенсивный процесс изнашивания. Интенсивность полидеформационного разрушения на порядок ниже прямого и происходит когда величина контактных напряжений лежит между пределами текучести и прочности металла ($G_y < G_k < G_b$). Если величина контактных напряжений меньше предела текучести, но больше предела упругости (G_y) ($G_y < G_k < G_t$), то наблюдается усталостный, механизм, при этом интенсивность изнашивания уже на два порядка ниже по сравнению с резанием поверхности металла абразивом. При снижении величины контактных напряжений ниже предела упругости ($G_k < G_y$) чисто механического разрушения не происходит, и ведущее место занимает процесс механохимического разупрочнения.

По мнению Костецкого Б.И. [35,36], абразивное изнашивание материалов вызывает необратимые изменения микрорельефа, структуры, прочностных характеристик, в результате которых формируется своеобразное остаточное состояние поверхностных слоев после снятия нагрузки. Износостойкость определяется не только исходными свойствами металла, но и состоянием поверхностного слоя, образующегося в процессе изнашивания.

В работах [37,38] предложен энергетический анализ зависимости износостойкости, которая может оцениваться величиной расхода энергии, сообщённой металлу абразивным телом. Механизм абразивного разрушения представляется состоящим из двух элементарных актов:

- 1) внедрения абразивной частицы в поверхность металла;
- 2) срез микростружки и пластическое деформирование с образованием канавки и валиков при относительном перемещении абразива и детали.

Зная пути расхода энергии, можно оценить вклад каждого процесса в общий баланс энергетических затрат, что даёт возможность выбирать наиболее эффективные методы борьбы с разрушением. Механизм абразивного изнашивания в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителей представляет собой сложный, процесс, охватывающий комплекс явлений разрушения поверхности трения в результате механического воздействия абразивных частиц, обладающих высокой твёрдостью и прочностью. Определение наиболее существенных факторов, в значительной степени влияющих на характер взаимодействия в конкретных условиях изнашивания, невозможен без детального изучения самого процесса разрушения, исследования микрорельефа изношенных поверхностей, влияния структурного состояния и свойств сплавов на их способность к сопротивлению абразивному изнашиванию.

3.2 ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ НА ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ.

Несмотря на значительное количество попыток добиться увеличения ресурса работы лопаток асфальтосмесителей [18,58], проблема повышения их срока службы продолжает оставаться актуальной. В основном на асфальтобетонных заводах используют стандартные лопатки [19], выполненные из комплексно легированного белого чугуна 250X5C2ГАТ (А.С.429130), средний ресурс которых до замены, при радиальном износе рабочей кромки 15 мм, не превышает 16 тыс. тонн выпускаемой смеси или 850 часов машинного времени, что составляет примерно, учитывая работу в две смены по 8 часов, 2-2,5 месяца [19,44,58]. Микроструктура данного чугуна после термической обработки (t закалки=880-900°C), вследствие отклонения в технологическом процессе [44,58] может быть различной - мартенситной, троостомартенситной либо трооститной. Карбидная фаза представляет собой хромистый цементит, расположенный по границам зёрен. Поверхностная твёрдость составляет 60-62 HRC, а сердцевины, в связи с недостаточной прокаливаемостью, - 50-52 HRC.

Отдельные заводы применяют лопатки, изготовленные из серого чугуна, модифицированного теллуром (с массовой долей 0,03% - 0,05%), твёрдостью 420-480 НВ. Однако срок службы лопаток, изготовленных из такого чугуна по данным [22,23] составляет 7,5 месяца, что соответствует выпуску 90 тыс. тонн смеси (около 3600 часов машинного времени). При этом износ кромки не превышал 5 мм.

Противоположные данные получены на ПО "Дормашина" г. Кременчуг после проведения испытаний лопаток отлитых из низколегированного серого чугуна СЧ 20 ГОСТ 1412-79, модифицированного теллуром. При агрегатной твёрдости 45 HRC износ лопаток был на 20 % меньше, чем серийных [58].

Низкой износостойкостью обладают лопатки, отлитые из стали 35Л, недостаточная твёрдость которой вызывает необходимость их замены через 8-10 смен, что составляет примерно 2500-3000 тонн выпущенной смеси [22].

В работах [19,20] приведены данные, свидетельствующие о крайне противоположных рекомендациях по выбору материала для изготовления лопаток. Так, предлагается использовать аустенитную сталь 110Г13Л с твёрдостью 196 НВ и мартенситный никель хромистый чугун (нихард), имеющий агрегатную твёрдость 63-65 HRC. Значительное расхождение этих материалов

по структурному состоянию и механическим свойствам вызывает серьёзные противоречия при определении требований, предъявляемых к сплавам для работы в условиях рабочих органов асфальтосмесителей.

Для увеличения срока службы лопаток на ПО "Дормашина" [58] был рекомендован боромарганцовистый чугун со следующей массовой долей, %:

C = 3,2-3,6; Si = 1,3-1,5; Mn = 3,6-4,0; Cr = 0,6-1,0; Cu = 0,1-0,4; Ni > 0,12; Ti = 0,03-0,08; B = 0,025-0,03; P < 0,2; S < 0,12.

Твёрдость деталей, отлитых из предложенного материала, составляет 47-53 HRC, а износостойкость 1,5 раза выше, чем у серийно изготавливаемых лопаток по СТП-564-71.

Для восстановления и упрочнения лопаток асфальтосмесителей на Ростовском асфальтобетонном была осуществлена попытка применения наплавки рабочих поверхностей сплавом типа "Сормайт", имеющем агрегатную твёрдость 45-54 HRC и 60% карбидных включений в ледебуритной основе [16].

ВКТИ СТРОЙДОРМАШ была предложена опытная технология наплавки рабочей кромки лопаток из стали 45 и серого чугуна стандартной порошковой проволокой ПП-АН 125. Однако проведённые испытания показали, что из-за износа по толщине незащищённых участков рабочей поверхности, упрочнённые таким способом лопатки, имеют срок службы всего 145 часов машинного времени (3227 тонн выпущенной смеси) [45].

В литературе по увеличению износостойкости лопаток имеются отрывочные сведения об использовании в США карбида вольфрама [46], в Германии твёрдосплавных пластин [47] и в Украине наплавки порошковой проволокой ПП - АН 170 [44].

Таким образом, анализ литературных данных о материалах для изготовления рабочих органов асфальтосмесителей показал, что имеются немногочисленные крайне противоречивые рекомендации, касающиеся небольшого количества сплавов, которые существенно отличаются по степени легированности, исходной твёрдости и структурному – фазовому состоянию. Отсутствие обоснованных сведений относительно необходимых свойств материалов, а также наличие расхождений в оценке износостойкости одинаковых сплавов свидетельствует о бессистемном подходе при выборе металла для работы в условиях эксплуатации лопаток. Представленные данные отражают частные попытки в применении тех или иных материалов, по результатам испытаний которых невозможно определить связь между сопротивляемостью сплавов изнашиванию в указанных условиях эксплуатации и их химическим составом, структурой, физико-механическими свойствами.

3.2.1 СВЯЗЬ МЕЖДУ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ.

В процессе исследования сопротивляемости металлов и сплавов абразивному изнашиванию многие исследователи пытались установить взаимосвязь между износостойкостью и отдельными физико-механическими свойствами материалов [11,30,38,48-57,59-64]. Большое количество работ посвящено выявлению закономерностей между твёрдостью и износостойкостью материалов, работающих в абразивной среде [11,30,31,38,41,43,48,50]. Твёрдость при быстрых и доступных испытаниях для её определения позволяет судить о способности металла оказывать сопротивление пластической деформацией (реже хрупкому разрушению) при местных контактных воздействиях в поверхностном слое.

Для чистых металлов, а также сталей в отожжённом состоянии Хрущёв М.М. и Бабичев М.А. установили прямо пропорциональное увеличение износостойкости от повышения их твёрдости [11]. Однако после термообработки при одинаковой твёрдости сплавы с разным химическим составом отличаются по износостойкости [30,38,50].

Ткачёв В.Н. [51] предпринял попытку связать анатомически твёрдость и износостойкость испытываемого материала, предложив использовать выражение:

$$\varepsilon = BH^n \quad (3.1)$$

где ε - износостойкость материала;

B - коэффициент, зависящий от интенсивности изнашивания;

H - микротвёрдость сплава;

n - показатель, зависящих от соотношения твёрдости материала и абразивных частиц.

В соответствии с (3.1) зависимость износостойкости сплава может принимать нелинейный характер.

В сплавах с остаточным метастабильным аустенитом, упрочняющихся в процессе взаимодействия с абразивом, отмечена зависимость не от исходной твёрдости, а от твёрдости поверхности трения при установившемся процессе изнашивания [38].

В многочисленных исследованиях других авторов указывалось на связь износостойкости с некоторыми физико-механическими свойствами сталей и сплавов.

Так, для чистых металлов и сталей в отожжённом состоянии отмечалось наличие пропорциональной зависимости между износостойкостью и модулем упругости [11,52]. Ткачёв В. А. [51], изучавший интенсивность разрушения металла в почве, установил связь износостойкости с модулем сдвига (G) и показал, что эта зависимость справедлива во всех случаях, когда значение модуля возрастает пропорционально увеличению микротвёрдости сплава.

Другими исследователями обнаруживалась определённая корреляция между износостойкостью и величиной предела текучести (GT) при изнашивании незакреплённым абразивом [53,61]. Однако строгое соблюдение закономерности сохранялось только для определённых сплавов после термообработки. Известны также исследования, в которых указывается на взаимосвязь износостойкости с прочностью [56,57], касательным напряжением среза [53,54], функцией квадрата коэффициента жёсткости решётки (K), определяемого из зависимости:

$$K = \frac{4\pi H}{h^2 m Q^2}; \quad (3.2)$$

где H - постоянная Больцмана;

h - постоянная Планка;

m - масса частицы;

Q - характеристическая температура, величина постоянная для данного сплава.

Некоторые исследователи предпринимали попытки отыскать корреляционную связь износостойкости с величиной межатомных связей в решётке металла [62], а также на границе раздела между карбидной фазой и матрицей сплава [63,64].

Таким образом, взаимосвязь между износостойкостью металлов в условиях абразивного изнашивания и их физико-механическими свойствами, полученная в статистических условиях, является неоднозначной. Исходя из приведённых данных, следует, что причиной нарушения или несоблюдения зависимости износостойкости от физико-механических свойств материала является невозможность воспроизведения при стандартных испытаниях всей сложности схемы напряжённого состояния поверхности металлов и сплавов, возникающей при абразивном изнашивании. Естественно, износостойкость представляет собой комплексную характеристику, зависящую не только от набора физико-механических свойств сплава (твёрдости, прочности, степени искажения решётки и т.д.), но и от его химического состава, структуры, свойств составляющих абразивной среды и внешних условий трения.

3.2.2 ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ.

Для увеличения сопротивляемости сплавов абразивному изнашиванию в различных условиях эксплуатации, легирование является одним из наиболее эффективных путей повышения работоспособности деталей и срока их службы. [11,30,35,38,51,63,65]. Основным легирующим элементом, который определяет износостойкость материала, является углерод [38,62,66-72].

Влияние углерода на сопротивление металла изнашиванию существенно зависит от того, в каком виде он находится в сплаве, связан ли в специальные карбиды или растворён в твёрдом растворе [38,67,68]. Углерод является одним из главных компонентов влияющих на износостойкость сталей и сплавов, хотя в железе растворение его сопровождается уменьшением величины сил межатомной связи в феррите, аустените [115] и мартенсите [99].

С увеличением содержания углерода износ сталей уменьшается, однако только до эвтектоидной точки, дальнейшее его увеличение влечёт за собой снижение сопротивляемости металла абразивному воздействию за счёт ослабляющего влияния сетки карбидов. Высоколегированные, но

малоуглеродистые стали обладают меньшей износостойкостью чем менее легированные но содержащие большее количество углерода. Влияние легирующих элементов на износостойкость определяется их взаимоотношением с углеродом. Целесообразность легирования износостойких сплавов во многом определяется содержанием в них углерода, в сочетании с которым эффективность влияния легирующих элементов существенно возрастает. Поэтому повышение концентрации углерода в легированных сплавах увеличивает их износостойкость, т.к. позволяет полнее реализовать возможности легирующих элементов.

С увеличением содержания углерода в стали, растёт коэффициент упрочнения аустенита при деформации, что обуславливается, выделением дисперсных карбидов из аустенита, протеканием процессов взаимодействия атомов углерода с дефектами кристаллического строения и изменением плотности и распределения дислокаций. При этом углерод сильно снижает мартенситную точку и при соответствующем его содержании обуславливает получение матрицы, способной при комнатной температуре к превращениям в процессе изнашивания, с образованием по плоскостям скольжения мелкодисперсных карбидов, что вызывает диссипацию энергии абразивных тел. Кроме того, эти карбиды увеличивают твёрдость и способствуют более равномерному распределению плотности дислокаций в изнашиваемом слое, что значительно повышает энергоёмкость металла, а, следовательно, и сопротивляемость сплавов изнашиванию абразивами.

Выбор концентрации углерода для износостойких материалов определяется из условий получения карбидов с высокой прочностью и малым удельным объёмом [69], образования наиболее твёрдого карбида [62,66,70], или образования необходимого количества упрочняющей фазы [71,72].

Легирование карбидообразующими элементами (хромом, ванадием, титаном, молибденом и др.), обуславливающие при достаточном количестве углерода образование специальных карбидов, вызывает прямо пропорциональное увеличение износостойкости сплава в зависимости от количества упрочняющей фазы [38,66,71]. В то же время, легирование низкоуглеродистых сталей карбидообразующими элементами хотя и увеличивает их твёрдость, но повышением износостойкости не сопровождается [66,72].

Значительное повышение твёрдости и износостойкости можно достичь при легировании сплава бором [66,73,74,75]. Обычно бор вводится в конструкционные стали в очень небольших количествах для измельчения зерна и увеличения прокаливаемости. Растворимость бора 0,082% - в феррите, аустените - 0,021%, в карбидах - 40%. Бор образует очень твёрдые карбиды (микротвёрдость V_4C - 49,5 ГПа) [115] бориды и карбобориды.

Известно, что бор вызывает повышение твёрдости металла, главным образом за счёт интерметаллидов. Характерно, что исходная твёрдость сплавов, содержащих бор, сохраняется и при повышенных температурах.

При содержании бора в наплавленном металле свыше 0,4-0,5% наблюдается резкое уменьшение ударной вязкости и работоспособности. Наличие бора в сталях, имеющих ферритную структуру, сопровождается уменьшением сил межатомных связей и вследствие этого некоторым ослаблением способности металла противостоять абразивному воздействию. Бор, при его содержании в сплаве 0,4-0,5%, заметно повышает износостойкость, но одновременно в 6-9 раз снижает ударную вязкость.

На основе анализа влияния бора на строение и свойства износостойких сплавов в работе [66] указывается, что легирование хромистых, хромомарганцевых и хромовольфрамовых сплавов бором в количестве 0,15-0,25% нецелесообразно в связи со значительным уменьшением ударостойкости при относительно малом росте износостойкости.

Бор при его большом содержании, достаточно широко используется для повышения износостойкости наплавленного металла. Легирование бором в количестве до 1% применяется в промышленных наплавочных сплавах БХ, КБХ, Н8, а также Т-590, ХР-19, Т-620, КБХ-45.

Износостойкость наплавов согласно [66] повышается благодаря появлению твердых боридов и увеличению твердости хромистых карбидов. Влияние бора на свойства наплавленного металла зависит от содержания других легирующих элементов, в первую очередь, углерода и хрома.

Соотношение легирующих элементов и углерода в сплаве должно быть строго определенным.

Рекомендуемая массовая доля бора в металле колеблется в значительных пределах от 0,0015 до 6,0 % [66,73,78]. В одних работах указывается, что бор является активным аустенитизатором [79,80], в

других отмечается его ферритизирующая способность [66]. Влияние бора на износостойкость сплава связывают не только с образованием боридов, карбоборидов, интерметаллидов [62,68,71,72,81], но и с измельчением зерна [82], повышением твердости, структурных составляющих, получением отбелённой структуры [88]. Обладая низким пределом растворимости в твёрдых растворах α и γ - железа, бор значительно упрочняет их за счёт внедрения в кристаллическую решётку [84,85], однако приводит к сильному охрупчиванию металла [66,85,86]. Хром - один из базовых легирующих элементов, который широко используется в сплавах с углеродом и бором, существенным образом определяет их износостойкость [66,69,71,73,77,78,87,88]. Введение хрома в металл, обуславливает увеличение твердости карбидов типа Fe_3C [84], повышает силы межатомных связей в кристаллической решётке карбидов [90,81], способствует образованию боридов, карбидов, карбоборидов [66,68,71,73,76,78,81,89,91,92]. Хром применяется для легирования большинства конструкционных, инструментальных, жаропрочных и других сталей и сплавов специального назначения. Известно, что хром, растворяясь в феррите до 30 % и аустените до 13 %, повышает прочностные свойства и твёрдость матрицы сплавов; увеличивает стойкость карбидов типа Fe_3C , (в которых он может растворяться свыше 23 %) против коагуляции и задерживает процесс снижения механических свойств при нагреве. Он способствует уменьшению износа прокатных валков режущего инструмента и штампов [116]. Введение хрома в сталь повышает силы межатомных связей в кристаллической решётке карбидов и феррита, однако рост величины этих характеристик отмечается при увеличении содержания хрома только до 8%, а дальнейшее увеличение хрома (до 16 %) не приводит к усилению межатомных связей [99].

При содержании в стали более 1% C и 3,5% хрома образуется сложный карбид $(Cr, Fe)_7C_3$ тригональная решётка которого характеризуется параметрами $a = 13,89$ нм, $c = 4,53$ нм. Твердость такого карбида достигает 14,0 - 18,0 ГПа. Железо может замещать в Me_7C_3 до 40 % хрома, что влечёт за собой снижение твёрдости карбида. Me_7C_3 может растворяться в аустените, однако, в меньшей степени, чем Fe_3C . В стали, содержащей углерод (до 1 %), а также Mo или W наряду с Me_7C образуется $Me_{23}C_6$ твёрдость которого составляет 1000 - 1100 HV. В $Me_{23}C_6$ до 30 % хрома может замещаться железом, что сопровождается увеличением растворимости карбида в аустените при 950 - 1100°C. В стали типа X12VMБФР (0,25 % V, 0,37 % Nb) карбиды хрома типа $Me_{23}C_6$ растворяются полностью при закалке с температуры 1050°C.

В твёрдом растворе наиболее распространенных наплавочных материалов находится до 50 % хрома от общего его содержания в сплаве. Таким образом, влияние хрома в износостойких материалах может проявляться как за счёт карбидов, так и за счёт изменения свойств матрицы.

По комплексу технико-экономических факторов, которые приобретает сплав, содержащий хром, он является основным легирующим элементом износостойких наплавочных материалов. С целью обеспечения в наплавленном металле благоприятной для повышения износостойкости карбидной фазы, количество хрома должно выбираться в соответствии с содержанием углерода из условия $Cr/C > 2\%$ ат. или $Cr/C > 9\%$ по массе.

Хром способствует блокированию дислокаций, образующихся при мартенситных превращениях, т.к. образует на дислокациях прочные атмосферы из атомов углерода. Хром делает более дисперсными выделяющиеся карбиды, повышает предел прочности стали не только при испытании на растяжение, но и на изгиб и сжатие, а также увеличивает сопротивление различным видам изнашивания, однако по-разному в конкретных условиях. При ферритной структуре увеличение содержания хрома до 11 % приводит к некоторому возрастанию износостойкости твёрдого раствора. Дальнейшее повышение количества хрома в феррите (до 20 %) не изменяет способности твёрдого раствора к сопротивлению изнашиванию. Введение хрома до 12 % в марганцовистый аустенит при содержании углерода 0,02 - 0,12 % приводит к весьма незначительному увеличению износостойкости в абразивной среде.

Положительное влияние хрома в износостойких сплавах обуславливается возможностью образования карбидов, при высокой дисперсности которых и равномерном распределении в матрице, увеличивается как интегральная твёрдость сплава, так и степень равномерности распределения дислокаций в рабочем слое. Оба фактора приводят к увеличению энергоёмкости и износостойкости сплавов. Однако ещё большее значение имеет способность хрома придавать

матрице сплавов чувствительность к структурным превращениям при изнашивании. Известно, что хром является ферритизатором. В тоже время, сдвигая вправо линии с-образной кривой изотермического распада аустенита и понижая точку начала мартенситных превращений, хром создаёт возможность получения нестабильной аустенитной структуры, способной к превращениям под давлением абразивных тел в процессе изнашивания. Хром, стимулируя энергоёмкие процессы в сплавах при изнашивании, наиболее существенно влияет на износостойкость сплавов. Массовая доля хрома в металле определяется из отношения Cr/C, увеличение которого повышает сопротивляемость изнашиванию за счёт образования наиболее твёрдого карбида $M_{23}C_6$ [66,91 - 93]. Однако по данным работ [99,94], массовая доля хрома в сплаве более 15-20 % не приводит к повышению износостойкости.

Результаты исследований [66] показывают, что при массовой доле углерода больше 1,5 % и отношении В/С, равного 1,2 в наплавленном металле обычно образуется карбоборид $M_{23}(CB)_6$, имеющий меньшую износостойкость, чем карбоборид $M_2(BC)$, который появляется при массовой доле бора более 2 %. Дальнейшее увеличение количества бора в металле приводит к образованию карбоборида $M(BC)$. При малой массовой доле бора (до 1,5 %) и высокой массовой доле углерода (около 2,1-2,6 %) преимущественно избыточной фазой является карбид M_7C_3 [6673,92]. Наличие в основе сплава карбидов, боридов и др., обладающих высокой твёрдостью, которая равна или превышает твёрдость абразивных частиц, вносит определяющий вклад в повышение износостойкости материала [30,42,67,74,89,92]. Положительное влияние твёрдой фазы связано с полной или частичной потерей абразивными частицами режущих свойств [95,96]. Кроме этого, вокруг карбидов возникает локальное поле напряжений, которое тормозит перемещение дислокаций, что увеличивает сопротивление пластической деформации и разрушению микрообъёмов металла [38,81,92,96].

С позиции дислокационной теории, износостойкость сплава можно связать со следующим выражением [38,97,98,99,101]:

$$\sigma = \frac{GB}{Z} \quad (3,3)$$

где G- напряжение, необходимое для осуществления движения дислокации;

G- модуль сдвига;

B - вектор Бюргера;

Z- расстояние между частицами твёрдой фазы в плоскости скольжения.

Простой анализ представленной зависимости (3.3) показывает, что чем меньше расстояние между частицами упрочняющей фазы, тем выше напряжение, необходимое для движения дислокаций и, следовательно, меньше интенсивность изнашивания материала. Поэтому с повышением дисперсности и количества твёрдой фазы усиливается эффект торможения дислокаций, что вызывает рост износостойкости металла. В большинстве работ [30,42,63,94,102,103], отмечается наличие зависимости износостойкости сплава от количества, формы и характера распределения упрочняющей фазы. Так, крупные избыточные включения, одновременно с положительным влиянием, оказывают существенное снижение пластичности материалов, что вызывает выкрашивание металла в процессе эксплуатации [30,38,71]. При равномерном распределении мелкодисперсных карбидов происходит повышение механических свойств без снижения износостойкости, что обеспечивает достаточную эксплуатационную надёжность [63,66,81,87]. Существенное значение имеет и микротвёрдость карбидов и карбоборидов, их состав и свойства. Наименьшей износостойкостью обладают сплавы с карбидами цементитами типа M_3C . Образование комплексного карбида M_7C_3 ведёт к значительному росту износостойкости металла [93]. Переход от M_7C_3 к карбиду $M_{23}C_6$ приводит к дополнительному увеличению способности металла сопротивляться изнашиванию [66,93,95,102,99]. В работе [77] показано, что максимальная способность металла противостоять абразивному воздействию достигалась при получении в виде избыточной фазы комплексных боридов $(Fe; Cr)_2B$ и $(Fe; Cr)B$ с микротвёрдостью 23-26 ГПа. Такая зависимость износостойкости сплава от типа упрочняющей фазы прямопропорционально связана с её твёрдостью. Так, микротвёрдость цементита 8-9 ГПа, а карбидов M_7C_3 и $M_{23}C_6$ 16-18 ГПа [99,104]. Высокой твёрдостью обладают специальные карбиды TiC, VC, WC, NbC, наличие

которых в структуре металла способствует снижению интенсивности изнашивания [102,105,107]. Однако, применение таких дефицитных и дорогих элементов, как вольфрам, ниобий, ванадий и титан в больших количествах нерационально из-за высокой стоимости сплавов. Поэтому для материалов, работающих в условиях абразивного изнашивания, наиболее целесообразным является получение в структуре карбидов, боридов и карбоборидов хрома.

Увеличение количества углерода эффективно повышает износостойкость только в случае увеличения содержания карбидной фазы в структуре сплавов. Если основа стали является достаточно прочной и вязкой, то при одинаковой её твёрдости износостойкость будет тем выше, чем больше карбидов в её структуре. Отмечается, что оптимальное количество карбидов в износостойких сплавах должно составлять 20-30% [66]. При отсутствии ударных воздействий высокое сопротивление абразивному изнашиванию может наблюдаться при увеличении карбидной фазы до 45%. Дальнейшее повышение содержания карбидов приводит к снижению износостойкости, что связывается с недостаточным объемом матрицы, которая должна удерживать карбиды или бориды от выкрашивания в процессе эксплуатации.

Тип карбидов, их форма, размеры и характер распределения среди других составляющих играют значительную роль в способности сплавов к сопротивлению разрушению при абразивном изнашивании. С увеличением дисперсности карбидной фазы повышается твёрдость и износостойкость наплавленного металла.

Структура наплавочного карбидно-хромового сплава представляющая собой смесь мелких и крупных карбидов игольчатой и шестигранной формы, расположенных изолированными включениями в основе, позволяет получить хорошее сочетание свойств, обеспечивающих высокую твёрдость и износостойкость. Значительной сопротивляемостью изнашиванию обладают наплавки КХБ-45 с равномерным распределением карбидов средней величины в ледебурите.

Расположение карбидов по осям дендритов, а также скопление крупных карбидов в отдельных участках матрицы обуславливает уменьшение сопротивляемости изнашиванию и ударам наплавленного металла, т.к. при динамическом воздействии крупные карбиды выкрашиваются из-за недостаточной связи с матрицей.

Уменьшение количества и твёрдости карбидов, а также твёрдости основы, снижает способность металла к сопротивлению изнашиванию. Кроме этих характеристик имеет значение природа образования и вязкость карбидов. При одинаковом количестве карбидной фазы, хромистые стали, содержащие в структуре кубический карбид $(Cr, Fe)_{23}C_6$ проявляют большее сопротивление. Образование специальных карбидов способствует снижению износа металлов. Стали, содержащие ниобий и ванадий, образующие в поверхностном слое карбиды NbC и VC существенно превосходят по износостойкости хромистые стали с кубическими карбидами $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Дополнительное легирование наплавки крошкой литых карбидов вольфрама, феррохрома или боридов цементированных соответствующей эвтектикой, приводят при эксплуатации в тяжёлых условиях абразивного изнашивания к значительному увеличению износостойкости и срока службы деталей. Лучшей сопротивляемостью изнашиванию из наплавки, легированных хромом, обладают те, которые содержат наибольшее количество первичных карбидов хрома.

Способность карбидосодержащих сплавов хорошо противостоять изнашиванию связана с тем, что карбиды, обладая большими силами межатомной связи, затрудняют внутренне скольжение при деформации.

Увеличение содержания карбидов в структуре сплавов целесообразно лишь в определённых пределах, т.к. чрезмерное количество карбидов меняет механизм изнашивания и в некоторых случаях, карбиды начинают выкрашиваться. В результате количество карбидообразующего элемента должно быть таким, чтобы весь углерод сверх предельной растворимости в матрице сплава был связан в наиболее износостойкий тип включений. Увеличение количества легирующего элемента сверх этого содержания не приводит к заметному повышению износостойкости.

В углеродо-боро-хромистых сплавах обнаружено образование различных видов твёрдой фазы: $M_2(BC)$; $M_{23}(CB)_6$; $M(BC)$; MB ; M_2B ; M_7C_3 и др., в тоже время выработать единое мнение о роли конкретного типа упрочняющих включений на износостойкость сплава не удалось [66,105,106,108]. Трудность в оценке влияния упрочняющей фазы на способность сплава сопротивляться изнашиванию, связаны с тем, что углерод и бор могут сравнительно легко растворяться (как фазы

внедрения) соответственно в карбидах или боридах, или образовывать карбобориды или борокарбиды [66,73,74,85,109]. Идентификация подобных соединений весьма сложна и требует специальных методик рентгеноспектрального анализа "осадков"[66]. Поэтому трудно разграничить боридные или карбидные соединения с указанием дополнительно внедренных в нем элементов. При выборе типа упрочняющей фазы следует отметить, что необходимо ориентироваться не на все возможные модификации карбидов и боридов, существующих в природе, подходящих по твердости, параметрам решетки и другим свойствам, а на те, которые термодинамически выгодны для образования в углеродистых сплавах [110]. Так, например, карбид хрома Cr_3C_2 с орторомбической решеткой имеет высокую микротвердость $H_{50}=22,8$ ГПа, практически в металле не образуется и при введении с шихтой переходит в карбид Cr_7C_3 [106].

Сложность прогнозирования процесса кристаллизации твердой фазы заключается и в том, что избыточные включения образуются как правило из пересыщенного твердого раствора на базе железа и других элементов, которые в некоторых карбидах способны растворяться до 55-60%, изменяя его начальные свойства [66,106,111]. Однако сведения о свойствах комплексных фаз в литературе практически отсутствует, что вызывает настоятельную необходимость в проведении дополнительных исследований, раскрывающих влияние легирования твердых включений на износостойкость сплавов. Поэтому важным резервом в повышении стойкости материалов, по нашему мнению, является возможность изменения свойств карбидной, боридной и карбоборидной фазы за счёт их легирования другими карбидообразующими элементами.

Наиболее подходит для этих целей ванадий, который при легировании в небольших количествах является относительно доступным элементом.

Ванадий обычно применяется в инструментальных и теплоустойчивых сталях, где используется его способность к измельчению зерна и, главным образом, увеличение стойкости против снижения твердости при отпуске, что важно для наплавленного металла, предназначенного для деталей, работающих при повышенных температурах. Способность ванадия образовывать специальные карбиды в сочетании с повышением сил межатомной связи в карбидах железа, где он может растворяться до 0,1 %, в феррите при высокой температуре сильно повышает износостойкость штампов и режущего инструмента [116].

Ванадий способствует образованию прочных атмосфер из атомов углерода на дислокациях, возникших при мартенситных превращениях, и делает более дисперсным выделяющиеся карбиды. Это должно положительно отражаться на способности сталей с ванадием к сопротивлению абразивному воздействию при изнашивании.

Несмотря на благотворное влияние ванадия на многие свойства сталей, его содержание обычно ограничивается 2 %, хотя известно, что при большем его количестве сильно повышается износостойкость инструмента. Это связано со снижением технологичности сталей, легированных ванадием, в присутствии которого сильно ухудшается ковкость и шлифуемость [116].

Ванадий уже при содержании 0,1 % образует карбид типа VC, который присутствует в стали наряду с цементитом. Карбид ванадия обычно не растворим в аустените, однако при наличии в сплаве 1 - 2 % марганца и хрома VC может в нём растворяться.

Карбид ванадия VC имеет кубическую кристаллическую решетку типа NaCl и содержит 19 % C. Микротвердость карбида ванадия составляет 18,0-20,0 ГПа, что значительно больше, чем Me_6C и $Me_{23}C_6$. В работе [66] указывается, что содержание ванадия и углерода в износостойких сплавах, обеспечивающее образование наиболее твердых карбидов, должно соответствовать отношению $V/C = 0,24 - 0,45$ ат. %. По другим данным V/C около 1 % ат. образуют устойчивый карбид VC.

Применение ванадия для легирования сплавов, работающих в абразивной среде, показало, что износостойкость при этом увеличивается.

Изменение износостойкости ванадиевых сплавов с аустенитной матрицей обязано главным образом карбидам, так как растворимость ванадия в аустените составляет 1,5 % при 1150°C. В безуглеродистых аустенитных сплавах повышение износостойкости отмечается только при содержании ванадия до 0,5 %.

Ванадий образует устойчивый карбид VC с высокой микротвердостью (29 ГПа) и температурой кристаллизации $T_{кр} = 2830^\circ C$. Образуюсь первым, он служит центром кристаллизации для других включений, что вызывает увеличение количества и дисперсности упрочняющей фазы. По данным

ряда работ [66,71,112-114] введение ванадия в сплав в небольших количествах (до 3%) вызывает увеличение износостойкости и пластичности металла, повышает плотность наплавки, измельчает избыточную фазу. Легирование хромистых сплавов ванадием качественно улучшает упрочняющую фазу за счёт образования кроме карбида VC также комплексных соединений типа (Cr; Fe; V)₇C₃; (Cr; Fe; V)₂₃C₂₆; (Cr; Fe; V)B и др. Влияние ванадия в этих соединениях на повышение износостойкости металла должно играть положительную роль, поскольку он уменьшает в них содержание железа, которое, растворяясь в карбидах, значительно снижает их твёрдость [66,71,112-114]. В то же время способность металла к сопротивлению абразивному изнашиванию зависит не только от типа и количества карбидов или боридов, но и от способности основы прочно удерживать твёрдые включения. Так, при неблагоприятной структуре, сплавы с большим количеством упрочняющей фазы могут оказаться весьма малоизносостойкими вследствие как недостаточной твёрдости, так и чрезмерной хрупкости металлической матрицы. При отсутствии достаточной связи на границе раздела фаз, происходит выкрашивание твёрдых включений, которые не успевают реализовать свои потенциальные возможности.

По результатам работ [29,30,38,68,72,81] ферритокарбидная структура обладает наименьшей способностью противостоять абразивному изнашиванию, что связано с низкой твёрдостью, прочностью и способностями кристаллографического строения феррита, которое обуславливает лёгкое выкрашивание карбидов из матрицы, снижая тем самым работоспособность материала. По мнению ряда исследований [50,117,118], высокой износостойкостью обладают стали с мартенсито-карбидной структурой, которые характеризуются значительной твёрдостью и повышенным сопротивлением мартенсита сдвигу. Другие авторы [119] считают, что мартенсит может уступать по сопротивляемости изнашиванию сплавам, матрица которых состоит из троостита и сорбита. Недостатком сплава с мартенситной структурой является хрупкость, которая ограничивает область применения, вследствие растрескивания и сколов металла [38,66,120,121]. Широкое распространение для работы в условиях ударных нагрузок получили материалы с аустенитной структурой. Легированный аустенит по прочности занимает промежуточное место между ферритом и мартенситом, обладает значительной вязкостью, имеет близкие параметры решётки с карбидной фазой, что обуславливает лучшее закрепление карбидов в основе материала. В тоже время недостаточная износостойкость стабильного аустенита приводит к необходимости применения комплексной матрицы, содержащей аустенит и мартенсит. Определение оптимального соотношения фаз M/A, зависит от количества и свойств твёрдой фазы, а также от условий изнашивания.

Значительного увеличения износостойкости можно добиться при использовании сплавов, с остаточным аустенитом, который под воздействием абразивных частиц, а тонком поверхностном слое превращается в мартенсит деформации [38]. Поверхность такого материала обладает высокой сопротивляемостью абразивному изнашиванию, а наличие вязкой аустенитной сердцевины обеспечивает отсутствие трещин и отколов металла. Однако степень упрочнения сплавов с метастабильным аустенитом в значительной степени зависит от свойств металла, а также внешних условий, давления и температуры, при которых происходит взаимодействие с абразивом. Изложенное выше показывает, что за всё время изучения сопротивляемости большого числа металлов и сплавов изнашиванию в широком диапазоне условий - давления, температуры, скоростей наработан обширный объём знаний о взаимодействии металлов деталей машин и изнашивающих сред. Мы попытались использовать весь этот богатый научный опыт многих исследователей к изучению проблемы срока службы конкретных деталей машин, интенсивно изнашивающихся и не имеющих однозначных решений.

1. К наиболее быстроизнашиваемым рабочим органам, в частности асфальтосмесителей относятся лопатки роторов, срок службы которых не превышает 2-2,5 месяца работы установки, что снижает технико-экономические показатели производства. Приведённый выше анализ большого числа исследований металлов и сплавов в различных условиях эксплуатации показывает, что имеющиеся данные использовать непосредственно для увеличения износостойкости и срока службы лопаток, невозможно без дополнительных направленных исследований. Поэтому проблема повышения их долговечности остаётся крайне актуальной. В целом по стране расходы, связанные с изготовлением и заменой лопаток составляет 200 млн. рублей в год (в ценах 1991 г.)

2. Разрушение материала лопатки происходит при циклическом ударно-скользящем характере воздействия абразивных частиц, обладающих высокой твёрдостью и прочностью.
3. Отсутствует единое мнение о механизме абразивного разрушения и критериях оценки износостойкости материала в условиях аналогичных тем, в которых работают лопатки асфальтосмесителей.
4. Недостаточность и противоречивость сведений о влиянии структуры и химсостава на способность сплавов сопротивляться изнашиванию в условиях эксплуатации лопаток вызывают необходимость в проведении направленных исследований для существенного повышения срока службы лопаток асфальтосмесителей.

Поэтому мы поставили перед собой задачу разработать и внедрить на предприятиях износостойкие экономно легированные материалы для рабочих органов оборудования по производству дорожно-строительных материалов, с целью получения научного, производственного и экономического эффекта.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие конкретные вопросы:

- 1) изучить условия эксплуатации, характер разрушения, а также влияние свойств перемешиваемых материалов на интенсивность изнашивания металла в условиях работы лопаток асфальтосмесителей;
- 2) разработать методику испытаний материалов для условий эксплуатации лопаток;
- 3) исследовать связь между структурным состоянием и износостойкостью сплавов в условиях работы лопаток;
- 4) определить наиболее приемлемый тип сплава и исследовать влияние легирующих элементов на его износостойкость в условиях эксплуатации лопаток;
- 5) на базе статистических методов планирования эксперимента описать математически зависимость влияния химического состава металла на его износостойкость и разработать оптимальный экономно легированный наплавочный сплав, позволяющий значительно повысить срок службы лопаток;
- 6) разработать технологию наплавки лопаток оптимальными сплавами и внедрить результаты работы в производство.
- 7) комплексная многокритериальная оценка.

4. ИЗНАШИВАНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СМЕСИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

При безусловной актуальности, проблема увеличения срока службы лопаток за счет применения более износостойких материалов не нашла заслуживающего внимания исследователей. Имеющиеся в литературе немногочисленные сведения [15,16,19,20,22,58] касаются небольшого количества испытанных материалов (сталь 35Л [22]; чугуны, модифицированные теллуром [12,22,58], никелем и хромом [19,20], бором и марганцем [58], сталь Г13Л [20], наплавка "Сормайтом" [16] и порошковой проволокой ПП-АН125 [45]), не имеют системного подхода и содержат даже противоречивые рекомендации. Например, оценка различными авторами износостойкости чугуна, легированного теллуром, отличается более чем в 3 раза [22,23,58]. В связи с этим совершенно очевидна необходимость в проведении направленных исследований, включающих изучение условий эксплуатации и характер разрушения лопаток асфальтосмесителей и определения для этих условий изнашивания влияния как металла лопатки на его износостойкость, так и свойств изнашивающей среды и внешних условий изнашивания - давления, температуры. Разработка износостойкого материала для лопаток асфальтосмесителей связана с последовательным решением комплекса взаимосвязанных вопросов, в которые включены основные этапы исследований.

В начале изучались изнашивающая среда, условия изнашивания, характер разрушения рабочей поверхности лопаток и разрабатывалась методика испытаний материалов, которая позволила бы получить достоверные результаты. Затем были проведены исследования изнашиваемого материала, включающие тип металлической матрицы и количества упрочняющей фазы и их взаимосвязь с износостойкостью металла в условиях эксплуатации лопаток. По результатам этого этапа исследований сформулированы требования, предъявляемые к износостойким сплавам в реальных условиях изнашивания, что позволило выбрать для дальнейшего изучения из существующих

стандартных материалов наиболее перспективные и разработать технологию наплавки ими рабочих поверхностей лопаток. Однако эти материалы, не могут оцениваться как оптимальные, хотя и имеют сравнительно высокую износостойкость, так как содержание легирующих элементов в них нельзя признать окончательно рациональным ни по набору легирующих добавок, ни по количеству каждого из них, поскольку создавались эти сплавы для других условий эксплуатации. Поэтому мы были вынуждены разрабатывать новый сплав для конкретных условий изнашивания лопаток, химический состав и структура которого, оптимизировались с использованием математических методов планирования эксперимента, и проверялись в производственных условиях работы асфальтосмесителей.

Изыскание износостойкого материала для лопаток смесителей требует проведения всесторонних испытаний различных материалов. Однако использование при исследованиях только лабораторных установок, механизм изнашивания, на которых не строго адекватен изнашиванию в реальных условиях эксплуатации лопаток, может привести не только к недостаточно достоверным, но и противоположным результатам [122].

Применение биметаллических материалов позволяет не только повысить надежность и долговечность деталей и оборудования, но и значительно снизить расходы на изготовление за счет экономии дорогостоящих легирующих элементов. Для получения износостойких композиций в качестве плакирующего рабочего слоя применяют стали и сплавы, обладающие высокой стойкостью против абразивного износа, а основным слоем обычно служит низкоуглеродистая сталь.

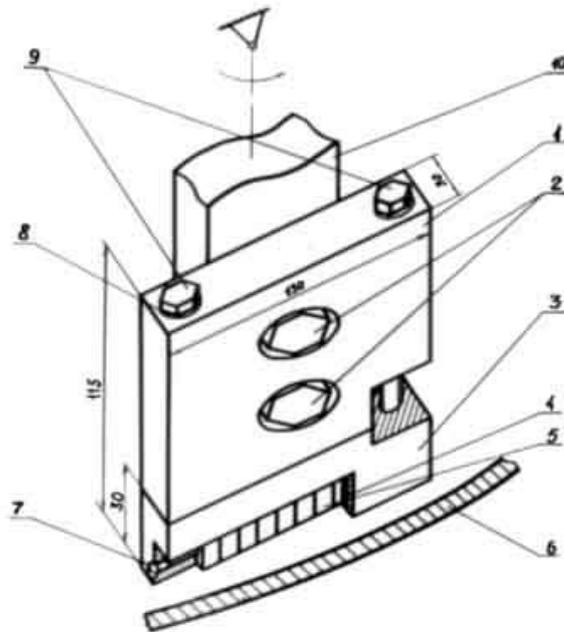
Основная задача создания слоистых биметаллических композиций заключается в обеспечении высокой износостойкости рабочего покрытия и прочного соединения составляющих по всей поверхности контакта. Недостаточные и противоречивые сведения о механизме получения твердых слоев при соединении металлов в твердой и жидкой фазах не позволяют выявить аналитические зависимости, необходимые для практических расчетов. Поэтому, разработки теоретических основ по созданию высокоизносостойких экономно - легированных биматериалов и технологий их нанесения на различные типы подложек требуют более детального рассмотрения и тщательного изучения.

Известно, что при проведении исследований по увеличению срока службы конкретных деталей наиболее достоверные данные по износостойкости материалов можно получить на основании испытаний в реальных условиях эксплуатации. При этом сравнительные испытания значительного количества опытных натуральных деталей из различных материалов требуют больших материальных расходов и занимает много времени.

Нами разработана методика испытания образцов, которая позволяет при небольших затратах времени и средств оценить износостойкость широкого ряда материалов в реальных условиях изнашивания лопаток роторов асфальтосмесителей.

Образцы крепятся в теле сборных лопаток (рис. 4.1), которые попарно устанавливаются на центральной стойке ротора в районе выгружающего люка, где отмечена максимальная интенсивность изнашивания [16,19,44]. Выбор места установки сборных лопаток с образцами связан с тем, что в средней части смесителя траектории движения соседних лопаток не перекрывают друг друга, что исключает возникновение "теневого эффекта", искажающего результаты испытаний.

Сменная обойма 3 (см. рис. 4.1) крепится к корпусу 1 двумя болтами 9. Такая конструкция обеспечивает быструю замену обойм с образцами, чем достигается высокая мобильность при проведении испытаний в промышленных условиях на асфальтосмесительной установке, находящейся в производственном цикле. Корпус 1 сборной лопатки защищается износостойкими наплавочными материалами (Т-590, ИТС-01) и не демонтируется в течение всего срока испытаний. Сменная обойма имеет паз, в который устанавливаются

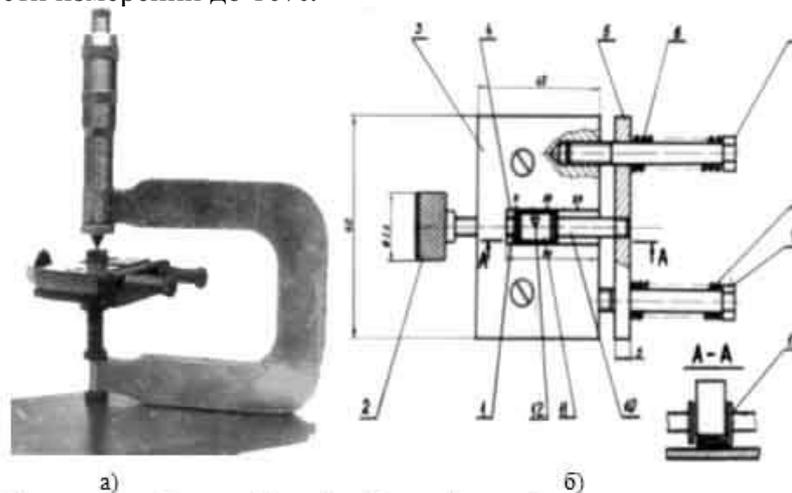


1-корпус; 2- болт крепежный; 3- сменная обойма; 4- медная прокладка;
5- образцы; 6- броневой лист смесителя; 7- винт прижимной; 8- пружинная шайба; 9- болт соединительный; 10- стойка.

Рисунок 4.1- Сборная лопатка с закрепленными образцами

образцы 5 (размер 8x10x15 мм³), которые с тыльной стороны прижимаются крышкой (на схеме не показана). Для предотвращения смещения в продольном направлении образцы прижимаются винтом 7 с потайной головкой.

Замену сменных обоек производили в зависимости от необходимого количества выработанной смеси, а способность сплавов сопротивляться изнашиванию определяли по изменению линейного размера образца (ΔL мм) за цикл испытаний. Для измерения абсолютной величины линейного износа образцов использовали специальное приспособление (рис 4.2). Образец 2 изношенной поверхностью вверх устанавливается на скобу 13 и поджимается к толкателю 1 при помощи пружин 6 и 8 упором 10. Изменение положения образца относительно микрометра 12, осуществляется вращением винта 2. Линейный износ определяется как среднее арифметическое значение, полученное из 4-5 измерений, что обеспечивало, при доверительной вероятности 0,85 получение погрешности измерений до 10%.



1 – толкатель; 2 – винт; 3 – рабочий стол; 4 – паз; 5 – поджимная планка;
6,8 – пружина; 7,9 – направляющая ось; 10 – упор; 11 – образец;
12 – микрометр; 13 – скоба.

Рисунок 4.2 – Приспособление для замера линейного износа образцов

Интенсивность изнашивания материалов вычислялась по отношению:

$$I_L = \frac{L}{Q}, \quad (4.1)$$

где I_L - интенсивность изнашивания, мм/т;

L - изменение линейного размера образца за время испытаний, мм;

Q - масса выпущенной смеси, т.

Сравнение износостойкости испытанных материалов производилось по значению относительной износостойкости:

$$\varepsilon = \frac{L_{LЭТ}}{I_{L0}}, \quad (4.2)$$

где $I_{LЭТ}$, I_{L0} - соответственно линейная интенсивность изнашивания стали 45 в отоженном состоянии принятой за эталон и испытанного образца.

По представленной методике проводились испытания различных материалов в условиях Запорожского Областного Объединенного асфальтобетонного завода на установке ДС-117-2Е в процессе приготовления асфальтобетонной смеси из гранитного щебня фракции 10-25 мм, микротвёрдостью Н50= 12-14 ГПа и прочностью 12 ГПа при начальном радиальном зазоре между торцом лопатки и броней смесителя 5 мм.

Статистическая обработка результатов испытаний показала, что погрешность измерений при доверительной вероятности 0,85 не превышает 10%.

Анализ результатов изнашивания в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителей и данных, полученных при испытаниях на различных лабораторных установках [66], свидетельствует не только о значительном расхождении уровней износостойкости испытанных материалов, но и явной инверсии рядов износостойкости (табл. 4.1). Так, в условиях изнашивания на установках "вращающаяся чаша" и Х4-Б износостойкость металла, наплавленного электродами ЦС-1 "Сормайт" в несколько раз ниже износостойкости металла, наплавленного электродами Т-590 и порошком КБХ. В тоже время, проведенные испытания на установке ВНИИСТОММАШ показали практически одинаковую износостойкость этих материалов.

Одним из главных противоречий при выборе материалов для лопаток, основанным на испытаниях образцов в лабораторных условиях, является то, что при использовании результатов изнашивания на установке "вращающаяся чаша" можно было рекомендовать наплавку рабочей части лопаток смесью КБХ, а результаты испытания на машине Х4-Б и установке ВНИИСТОММАШ свидетельствуют о необходимости применения для этой цели наплавочных электродов ЭН-Т590, имеющих максимальную износостойкость. Однако в действительности в реальных условиях изнашивания лопаток асфальтосмесителей, металл, наплавленный порошком КБХ и электродами ЭН-Т 590, более чем в 2 раза ниже по износостойкости, чем наплавки Релитом (табл. 4.1).

Столь существенные различия в уровне износостойкости материалов при испытаниях на различных лабораторных установках не только не могут помочь в выборе наиболее износостойкого металла для лопаток асфальтосмесителей, но и приводят к противоположным выводам о приемлемости того или иного сплава. Поэтому при проведении исследований по увеличению износостойкости конкретной детали следует с осторожностью относиться к результатам испытаний в лабораторных условиях. Различие в механизме изнашивания на лабораторных установках и в реальных условиях эксплуатации может явиться причиной получения недостаточно обоснованных выводов и рекомендаций по увеличению срока службы деталей.

Таким образом, разработанная нами методика испытаний образцов, включающая конструкцию экспериментальной лопатки и способ замера величины износа образцов после изнашивания, обеспечивает при небольших затратах времени и средств надёжное определение уровня износостойкости большого количества различных материалов в реальных условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителей [24]. Использование этой методики позволило определить закономерности изнашивания лопаток, на основе этих знаний разработать износостойкие материалы, а также технологические процессы изготовления из них рабочих органов машин с высоким сроком службы. В результате увеличения срока службы лопаток асфальтосмесителей было достигнуто повышение производительности установки, а также снижение ремонтно-эксплуатационных затрат.

4.1 МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ, ДЮРОМЕТРИЧЕСКИЕ И РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проводилось комплексное изучение выбранных материалов, включающее металлографические исследования структуры сплавов, определение агрегатной твёрдости и микротвёрдости структурных составляющих: основы металла и упрочняющей фазы, рентгеноструктурные исследования поверхности трения до и после изнашивания, использовались рентгеноспектральные методы, позволяющие оценить распределения легирующих элементов между фазами сплавов.

Металлографические исследования микрошлифов сплавов проводили на микроскопах МИМ-8М, "НИОФОТ" при увеличениях 100-2000. Для выявления структуры образцов применяли химическое травление поверхности 4-х процентным раствором азотной кислоты.

Микротвёрдость структурных составляющих определялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,5Н, за истинное значение микротвёрдости принимались среднеарифметические значения, полученные от 10-15 измерений. Доверительные интервалы при надёжности 0,95 по генеральной средней X_0 составили от 2,3 до 4,5%, а по генеральной квадратичной - 1,8 до 3,9 %.

Рентгеноструктурный анализ испытанных материалов осуществлялся на дифрактометре " ДРОН-3" в кобальтовом излучении по методу градуировочной кривой [124]. Для повышения точности съёмку выполняли при прямом и обратном вращении образца и счётчика гониометра.

При изготовлении шлифов с целью исключения влияния изменений фазового состава при шлифовании, с поверхности образца электролитически удалялся слой толщиной 30-40 мкм (упрочнение от шлифования не превышает 25 мкм 38). В качестве электролита использовался следующий состав: $H_3PO_4=400$ мл; $H_2SO_4=100$ мл; $Cr_2O_3=50$ г; $H_2O=50$ мл. Глубина электролитически удалённого слоя контролировалась с точностью ± 1 мкм.

Распределение легирующих элементов между фазами изучали на энергодисперсионном спектрометре системы "ЛИНК-860", раствором сканирующем микроскопе "КАМЕКА MS - 47" и микрорентгеноспектральном анализаторе "КОМИБАКС". Качественный микрорентгеноспектральный анализ проводили в хромовом, железном, ванадиевом $K\alpha$ излучениях [125]. Выделение карбидных и боридных осадков для рентгеноструктурных исследований упрочняющей фазы выполняли по методике [66,126].

После проведения исследований осуществляли математическую обработку результатов прямых измерений. По данным параллельных опытов вычисляли: среднее измеряемой величины (X_0), погрешность отдельных измерений (ΔX_i) среднеквадратическую погрешность измерений (G_0), величину доверительного интервала (ΔX), а окончательный результат записывали в виде: $X = X_0 + \Delta X$ [127].

Таблица 4.1 – Относительная износостойкость материалов, испытанных в различных условиях изнашивания

Испытанный Материал	Твёрдость HRC	Относительная износостойкость ε			
		Установка "вращающаяся чаша"	Машина Х4-Б	Установки ВНИИСТОММАШ	Условия работы лопаток асфальтосмесительной установки
		По данным работы [66]			
Сталь Х12 ($t_3=975$ °С)	65	--	--	--	5,0
Износостойкий чугун По СТП-564- 71 ПО "Дормашина"	45-50	--	--	--	2,9
Наплавка "Сормайт" ЦС-	45-54	2,3	2,2	3,35	5,1

1					
Наплавка ЭН-Т590	50-55	6,4	4,7	4,9	5,4
Наплавка Релит	90 HRA	7,1	4,0	--	13,5
Наплавка КБХ	66-68	8,2	4,1	4,3	6,2

- эталон – сталь 45 отожженная, 166 HV

4.2 МАТЕРИАЛЫ

Создание износостойкого материала для лопаток асфальтосмесителей основывается на исследовании влияния на износостойкость структурного состояния металлической матрицы сплава, а также количества и распределения в ней упрочняющей фазы.

Для определения влияния основы сплава на его износостойкость испытывали сталь Х12Ф1 (ГОСТ 5950-73), позволяющую в результате термической обработки получить все типы структурного состояния матрицы сплава, от ферритной до мартенситной.

Для исследования влияния количества карбидной фазы на способность металла сопротивляться изнашиванию, испытывались образцы из стали Х12 (ГОСТ 5950-73), в которой после термической обработки можно обеспечить то же структурное состояние основы, что и у стали Х12Ф1, но при большем в 1,5 раза содержании карбидов.

Для исключения влияния химического состава сталей, для каждого варианта термической обработки изготавливались по семь образцов из кованных полос одной плавки (сталь Х12Ф1с массовой долей, % : 1,4 С; 0,32 Si; 0,3 Mn; 12,2 Cr; 0,95V; сталь Х12 с массовой долей, % : 2,03 С; 0,29 Si; 0,31 Mn; 12,41 Cr).

Нагрев под закалку осуществляли в соляной ванне в расплаве ВаС13, охлаждение - в масле.

Температура в ванне контролировалась платинородиевой термопарой и потенциометром типа КСП.

Исследование влияния износостойкости сплавов в зависимости от типа, количества и распределения упрочняющей фазы проводили на образцах, наплавленных стандартными и экспериментальными износостойкими материалами. Выбор стандартных материалов для испытаний производился преимущественно на базе систем Fe-C-Cr с легированием в небольшом количестве другими элементами: ванадием, титаном, молибденом, вольфрамом, никелем, марганцем и др. Данная система легирования при различном содержании элементов позволяет получить широкий ряд сплавов, обладающих разнообразным структурным состоянием, типом и количеством упрочняющей фазы. В число исследуемых наплавочных материалов вошли стандартные, которые условно можно разбить на несколько групп:

- наплавочные материалы, обеспечивающие получение наплавленного металла с ферритной (ПП-3Х2В8), мартенситной (ЭН-Н60), аустенитной (ПП-АН105) основой;
- наплавочные материалы, образующие в наплавленном слое аусте-нитно - мартенситную основу с различным по количеству и дисперсности карбидов (ПП-АН104, ПП-АН125, ПП-АН101);
- наплавочные материалы с за эвтектической структурой, состоящей из ледебуритной эвтектики с избыточными комплексными карбидами, боридами и карбоборидами (ЦС-1 “Сормайт”, ЭН-Т620, ЭН-ИТС 01, КБХ-45, ПП-160Х14Р4 , Релит-Т3).

Экспериментальные наплавочные материалы изготавливались в виде порошковой проволоки, в состав которой до 43-45% может быть введено порошкообразной шихты из легирующих элементов, что позволяет изменять химический состав наплавленного в достаточно широких пределах.

Известно, что структурная гетерогенность оказывает значительное влияние на процессы повреждаемости при трении. Фрактографическим анализом изнашиваемых поверхностей установлено, что трещины зарождаются, как правило, на макродефекте как на концентраторе напряжений и распространяются до следующего ближайшего включения или поры, где замыкаются в них [217].

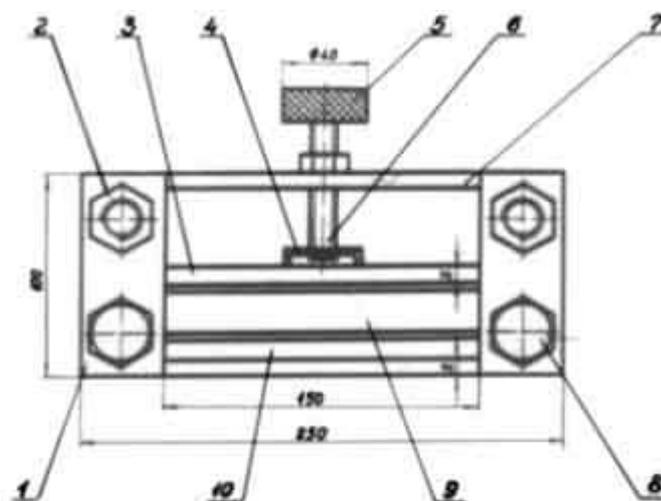
Определение склонности наплавленного металла к образованию холодных трещин осуществляли па основе метода технологических проб, который заключается в том, что на жестко закреплённую пластину из малоуглеродистой стали, установленную в специальном кристаллизаторе (рис. 4.3),

наплавляются валики одинаковой длины. Размеры пластин, режимы наплавки, а также температура подложки оставались постоянными. Жёсткое закрепление пластин необходимо для моделирования процесса наплавки на массивную деталь, при котором затрудняется свободное деформирование металла и возможное количество образующихся трещин максимально.

Количество холодных трещин определяли визуальным осмотром, а для получения достоверных результатов при проведении каждого опыта наплавляли 5-7 пластин.

Использование рассмотренных выше подходов в проведении исследований, а также указанных оборудования и приборов позволили определить для лопаток роторов асфальтосмесителей наиболее приемлемый тип сплава и его оптимальное структурное состояние, обеспечивающее значительное повышение срока службы лопаток. Проведенные испытания образцов различных металлов для условий изнашивания лопаток асфальтосмесителей, по предложенной программе включающей конструкцию экспериментальной лопатки и способ замера величины износа образцов после изнашивания, позволили получить достоверные данные об износостойкости материалов при наименьших затратах времени и средств.

Сравнение износостойкости материалов, полученных при испытаниях на различных лабораторных установках и в реальных условиях работы лопаток асфальтосмесителя, показали, что различие в механизме изнашивания в лабораторных и реальных условиях эксплуатации является причиной недостаточно обоснованных выводов по выбору материала для конкретных деталей. Исследование энергии разрушения абразивных частиц, по разработанной методике с использованием усовершенствованной установки имитирующей условия заклинивания и дробления гранитных зёрен в зоне радиального зазора между рабочей кромкой и броней смесителя позволяет получить достоверные результаты о характере взаимодействия поверхности лопатки и абразивных частиц и полнее оценить вклад изнашивающей среды в процесс изнашивания детали. Таким образом, анализ данной проблемы показал, что только учёт всех обстоятельств изнашивания, включающих свойства абразивных тел, внешние условия изнашивания характер воздействия изнашивающих сред, величины их давления на рабочую поверхность детали, температуру в месте их контакта, скорость перемещения и степень коррозионного воздействия на металл позволяет сформулировать требование по химическому составу и структуре, которым должен удовлетворять износостойкий материал.



1 – прижимная накладка; 2 – неподвижная гайка; 3, 10 – медные пластины;
4 – кронштейн; 5 – ручка; 6 – винт; 7 – корпус; 8 – прижимной болт;
9 – наплавляемая поверхность

Рисунок 4.3 – Кристаллизатор для наплавки образцов

4.3 МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

В двухвальном асфальтосмесителе нижняя часть корпуса, образуемая при пересечении поверхностей двух цилиндров (см. рис. 3.2) покрыта броневыми плитами из износостойкого чугуна. При сборке смесителя между броней и рабочими кромками лопаток ротора устанавливают гарантированный радиальный зазор 5мм (рис. 4.4). При соприкосновении рабочей кромки лопатки с абразивом грани частиц образуют с поверхностью днища смесителя угол γ . Если угол γ больше

(канавок) (см. рис. 4.5 сеч.А-А), начинающихся сразу за крепежными отверстиями может привести к разрушению болтового соединения и возникновению аварийной ситуации. Анализ механизма образования шлейфов показал, что он обусловлен различной интенсивностью изнашивания металла лопатки и крепежных болтов. Так, износ болтов, выполненных из закалённой стали 45 (28-32 HRC), значительно выше металла, из которого изготовлена лопатка (55-65HRC). Проведенные исследования показали, что при одинаковом (или близким по свойствам) материале крепежных болтов и лопатки и шлейфы в процессе изнашивания не образуются. Поэтому для исключения возникающего утонения лопатки за крепежным отверстием необходимо предусмотреть возможность упрочнения шляпок болтов износостойкими материалами.

Таким образом, исследование условий эксплуатации и анализ профиля износа лопаток асфальтосмесителя позволило установить, что в зоне радиального зазора происходит сложный процесс перемещения, заклинивания и дробления абразивных частиц, вызывающий интенсивное изнашивание лопатки в зоне рабочей кромки. Величина радиального зазора является одним из основных эксплуатационных параметров, в значительной степени определяющих механизм разрушения.

Рассмотрение механизма разрушения с энергетических позиций показывает, что абразивное изнашивание можно представить как процесс, при котором энергия абразивной частицы E_a расходуется на насыщение металла энергией для зарождения и развития трещин. Расход энергии на трение, тепловой эффект и процессы, происходящие в соевой частице, можно принять постоянными [35]. Тогда величина интенсивности изнашивания тем меньше, чем больше энергии может поглотить сплав до разрушения - E_m и чем меньше величина энергии разрушения абразивного тела - E_a . Знание реальной величины энергии разрушения абразивных частиц в конкретных условиях эксплуатации рабочей кромки лопатки, позволит более обосновано подойти к разработке износостойкого материала для данных условий изнашивания и выработать рекомендации относительно режимов работы, при которых достигаются минимальные значения энергии разрушения абразивных частиц, а, следовательно, менее интенсивное изнашивание поверхности трения.

Для выявления взаимного влияния величины радиального зазора (δ), диаметра (D_{cp}) и прочности ($G_{сж}$) абразивных материалов на энергию разрушения частиц, был спланирован и проведён полнофакторный эксперимент.

Для оценки энергии разрушения абразивных частиц был усовершенствован прибор (см. рис. 2.8) и разработана методика расчёта, описанная в разделе [2.2.2].

Таблица 4.2 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Показатель	Факторы		
	$D_{cp}, мм$	$\delta, мм$	$G_{сж}, ГПа$
Основной уровень	23	10	12
Интервал варьирования	7	4	2
Верхний уровень	30	14	14
Нижний уровень	16	6	10
Кодовое обозначение	X_1	X_2	X_3

При реализации матрицы планирования было осуществлено три серии экспериментов, включающих по 25 опытов. Обработка результатов эксперимента при вычислении коэффициентов регрессии проводилась на персональном ЭВМ NOTEJET 486 фирмы "Canon" с использованием метода наименьших квадратов. Оценка статической зависимости найденных коэффициентов и проверка адекватности уравнения регрессии осуществлялась по методике [36,37].

Полученное адекватное уравнение имеет вид:

$$A=523-27,17X_1-10,1X_2-46,7X_3+0,12X_1X_2+1,31X_1X_3+0,15X_2X_3+0,36X_1^2+0,39X_2^2+1,1X_3^2,$$

где X_1 – средний диаметр частиц $D_{cp}, мм$;

X_2 – величина радиального зазора $\delta, мм$;

X_3 – предел прочности частиц гранита на сжатие $G_{сж}, ГПа$.

Таблица 4.3 – Результаты статистической проверки уравнения регрессии

Критерий Кохрена		Критерий Фишера		Доверительный интервал $\pm \Delta B_i$	Дисперсия воспроизводствa S_V^2	Дисперсия адекватности $S_{ад}^2$
G Расчетный	G Табличный	F расчетный	F Табличный			
0,141	0,6602	0,872	1,8	0,0107	0,217	6,38

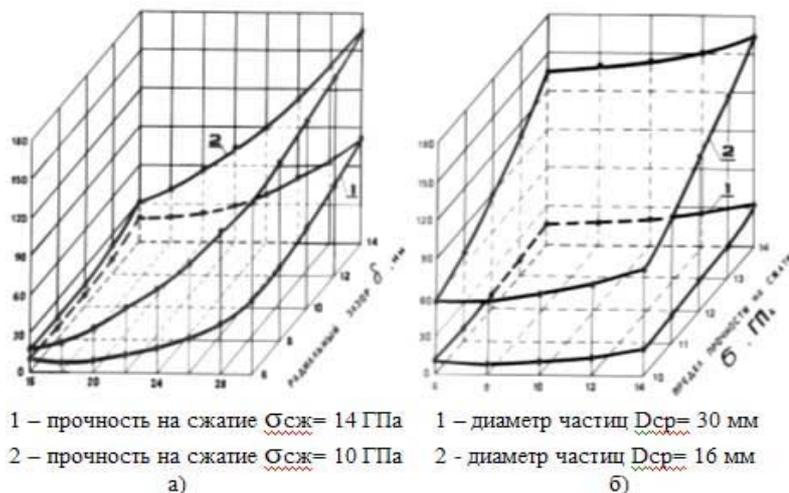
*уровень значимости $\alpha=0,05$

Таблица 4.4 – Результаты реализованной матрицы полнофакторного эксперимента 3^3

	Дср, мм	δ , мм	$\sigma_{сж}$, ГПа	Аср, Дж	A ₁	A ₂	A ₃	*S _i
1	30	6	10	54,7	56,0	53,5	54,5	1,26
2	30	14	10	81,3	81,5	81,1	81,0	0,26
3	30	6	14	139,3	137,1	141,5	139,2	2,20
4	30	14	14	169,5	167,8	171,3	169,5	1,75
5	16	6	10	9,5	9,5	9,4	9,5	0,03
6	16	14	10	21,8	21,1	22,4	21,8	0,65
7	16	6	14	15,5	16,2	14,8	15,6	0,71
8	16	14	14	32,4	32,2	31,5	32,5	0,85
9	23	14	14	80,4	78,8	81,9	80,4	1,55
10	23	14	10	31,9	31,1	32,7	31,9	0,80
11	23	6	14	59,6	58,2	61,1	59,6	1,45
12	23	6	10	15,8	16,7	14,9	15,8	0,90
13	30	10	10	63,3	62,4	64,3	63,3	0,95
14	16	10	14	18,2	17,8	18,6	18,2	0,40
15	16	10	10	8,4	7,6	9,1	8,4	0,71
16	30	10	14	145,4	145,0	145,3	145,8	0,40
17	16	6	12	8,3	8,4	8,2	8,3	0,12
18	30	14	12	117,5	117,1	117,9	117,5	0,40
19	16	14	12	22,8	21,2	24,3	24,3	1,55
20	30	6	12	92,4	91,1	93,8	92,4	1,35
21	23	10	12	37,3	36,2	38,5	37,2	1,15
22	23	10	10	17,5	16,8	18,2	17,6	0,07
23	23	10	14	64,6	63,2	66,1	64,6	1,45
24	23	6	12	32,9	31,7	34,2	32,9	1,25
25	23	14	112	52,3	51,2	53,4	52,4	1,10
26	30	10	12	98,5	96,9	100,2	98,4	1,64
27	16	10	12	9,4	9,0	9,9	9,4	0,47

*S_i – дисперсия проведенного опыта

Планирование эксперимента проводили на трёх уровнях [134,135]. Выбор уровней и интервалов варьирования величины радиального зазора и диаметра частиц (табл. 4.2) осуществляли при условии, что при любом сочетании уровней факторов выполняется заклинивание и дробление частицы. Интервал варьирования и основной уровень предела прочности абразивного материала на сжатие взяты на основании требований, предъявляемых к минералам, используемых для изготовления асфальтобетона [12,20]. Пространственная модель (рис. 4.6) характеризует взаимосвязь радиального зазора, среднего диаметра и прочности частицы с энергией её разрушения.



1 – прочность на сжатие $\sigma_{сж}=14$ ГПа 1 – диаметр частиц $D_{ср}=30$ мм
 2 – прочность на сжатие $\sigma_{сж}=10$ ГПа 2 – диаметр частиц $D_{ср}=16$ мм

Рисунок 4.6 – Зависимость энергии разрушения абразивных частиц от величины радиального зазора δ (мм), среднего диаметра $D_{ср}$ (мм) и прочности $\sigma_{сж}$ (ГПа) гранитных зерен

Анализ полученных зависимостей показал, что в исследованном интервале факторного пространства энергия разрушения абразивных зёрен возрастает с увеличением их $D_{ср}$ и $G_{сж}$. Такой характер зависимостей согласуется с известной формулой работы разрушения [136]:

$$A = \frac{\sigma^2_{сж} \cdot V}{2 \cdot E}, \quad (4.5)$$

где V - объём дробимого материала, m^3 ;

$G_{сж}$ - предел прочности материала на сжатие, Па;

E - модуль упругости первого рода.

Заменяя действительные формы дробимых частиц шаровой поверхностью, получаем:

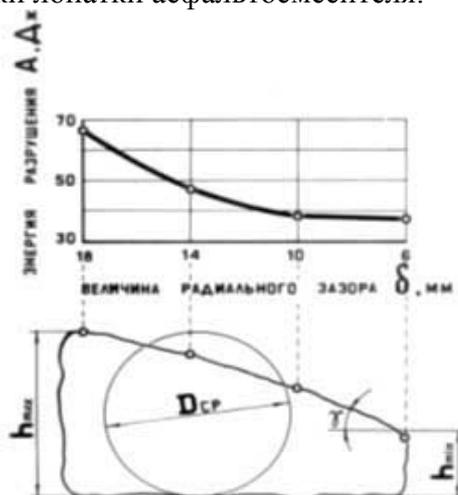
$$V = \frac{\pi \cdot D^3_{ср}}{6}, \quad (4.6)$$

тогда выражение (4.5) примет вид:

$$A = \frac{\pi \cdot \sigma^2_{сж} \cdot D^3_{ср}}{12 \cdot E},$$

Из формулы (4.8) видно, что $G_{сж}$ и $D_{ср}$ входят в числитель и их увеличение связано с ростом энергии разрушения абразивной частицы. Энергия разрушения частиц гранита, согласно приведённых исследований, изменяется в широких пределах от 8,3 до 169,5 Дж.

Минимальный интервал энергии соответствует величине радиального зазора в пределах $\delta = 6-10$ мм (рис. 4.6; рис. 4.7). Дальнейшее увеличение величины радиального зазора неоправданно, т.к. повышение энергии разрушения частиц будет способствовать более интенсивному изнашиванию поверхности трения рабочей кромки лопатки асфальтосмесителя.



Предел прочности гранитной частицы на сжатие $\sigma_{сж} = 12$ ГПа;
Средний диаметр частиц $D_{ср} = 23$ мм

Рисунок 4.7 – Влияние величины радиального зазора (δ) на энергию разрушения (A) абразивной частицы

Рост энергии разрушения при увеличении радиального зазора можно объяснить следующим. Значение энергии, при которых разрушаются заклинившие частицы одного диаметра и прочности, неодинаковы по сечению гранитных зерен. Энергия разрушения зависит от размера частицы в сечении, где произошло заклинивание и дробление, что в свою очередь определяется углом наклона γ и величиной радиального зазора δ (см. рис. 4.3 и рис. 4.6). Поскольку угол наклона грани каменного материала изменяется в узком интервале от 44° до 54° , то его значение можно принять постоянным [131]. Следовательно, энергия разрушения заклинившей частицы (при $D_{ср} = \text{const}$ и $G_{сж} = \text{const}$) практически полностью определяется величиной радиального зазора.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что энергия разрушения абразивных частиц в значительной степени зависит от их диаметра и прочности. Однако данные параметры регламентируются рецептом приготовляемой смеси и в процессе смешивания остаются постоянными. Поэтому уменьшить размер дробимых частиц можно только регулированием

радиального зазора между рабочей кромкой лопатки и броней асфальтосмесителя, который по технологическим условиям не должен превышать 10 мм.

Таблица 4.5 – Термообработка фазовый состав и свойства образцов из стали X12Ф1 и X12, испытанных в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителя

Марк иров- ка образ цов	Темп ерату ра закал ки, °С	Исходн ая твёрдо сть HRC _a	Массовая доля аустенита, %		Количес тво карбидо в, % [35]	Микротвёрд ость поверхности после изнашивани я H ₅₀ , ГПа	Интенсив ность изнашива ния I _L , мм/т*10 ⁻³	Относит ельная износо стойкость ε
			До испыта ний	После испыта ний				
СТАЛЬ X12Ф1								
01	900	35	-	-	15,0	5,96	6,25	1,39
02	1025	60	10	-	14,0	7,79	3,09	2,82
03	1050	64	20	5	13,0	8,82	2,53	3,45
04	1070	62	30	10	12,5	8,35	2,90	3,00
05	1100	54	40	20	12,0	8,05	3,48	2,51
06	1130	48	50	28	10,0	7,16	4,26	2,05
07	1150	41	65	45	8,0	6,19	5,29	1,65
08	1180	35	85	74	6,0	5,65	6,71	1,30
09	Отож	215HV	-	-	16,0	5,08	7,62	1,15
СТАЛЬ X12								
10	850	52	15	10	23	7,43	3,63	2,46
11	895	58	20	15	22	7,86	2,81	3,10
12	935	64	30	15	21	8,12	2,05	4,25
13	975	65	40	10	19	9,85	1,74	5,01
14	1000	64	46	10	18	9,54	1,89	4,61
15	1025	63	50	20	166	8,71	2,00	4,36
16	1075	51	72	55	11	7,55	3,25	2,68
17	1100	43	87	80	9	6,22	4,02	2,17
18	Отож	218HV	-	-	25	5,54	4,60	1,80

*эталон – сталь 45 отожженная, 166 HV

Таблица 4.6 – Фазовый состав и свойства наплавочных материалов и сплавов, испытанных в условиях работы рабочих органов асфальтосмесителей

[\(Просмотреть\)](#)

4.4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И КОЛИЧЕСТВА КАРБИДНОЙ ФАЗЫ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЛИТЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ СМЕСИТЕЛЯ.

Проблема разработки износостойкого материала для конкретных условий абразивного изнашивания является чрезвычайно сложной и поэтому даже при целенаправленных работах по ее изучению до настоящего времени не получила своего полного решения. С одной стороны еще недостаточно накоплено фактического экспериментального материала о влиянии структурного состояния, количества карбидной фазы металла на его способность к сопротивлению абразивному разрушению, а с другой почти все исследования влияния химического состава сталей и сплавов на их износостойкость проводились для конкретных частных условий, поставленных перед каждым исследователем, как правило, не охватывают проблему в целом.

Очевидно, что более глубокие представления о повышении работоспособности сталей и сплавов, срока службы быстроизнашиваемых деталей машин и об их свойствах, контролирующей способность материалов к сопротивлению изнашиванию, может быть получено только при системном подходе к изучению зависимости от химического состава сплава, его структурного состояния, механических свойств в общей проблеме: абразивная среда, внешние условия и изнашиваемый материал.

Однако имеющиеся в литературе сведения, еще не позволяют достаточно обосновано выбрать структурное состояние материала для работы в заданных условиях эксплуатации.

В настоящем разделе работы мы поставили задачу последовательно исследовать все факторы участвующие в процессе изнашивания, начиная с выявления зависимости между износостойкостью и структурным состоянием различных сталей и сплавов для условий изнашивания лопаток асфальтосмесителей, и попытаться сформулировать некоторые общие положения для решения этой проблемы.

В работе [35] показано, что в большинстве случаев карбидная фаза является одним из основных факторов, повышающих сопротивляемость сплавов разрушению при изнашивании. При этом отмечается, что не меньшее значение имеет металлическая матрица, в которой расположены карбиды или другие твёрдые включения. В случае неблагоприятного типа основы сплава даже в сочетании со значительным количеством упрочняющей фазы в их структуре могут оказаться весьма малоизносостойкими.

Считается, что изнашивание стали с ферритно - цементитной структурой под воздействием закреплённых и не жестко закреплённых абразивных частиц определяется морфологией и дисперсностью цементитной составляющей. Так скорость изнашивания стали 48 с карбидами пластинчатой формы меньше, чем с карбидами глобулярной формы [218].

Для выяснения наиболее приемлемого типа металлической матрицы сплава в условиях изнашивания лопаток, необходимо было выбрать сталь, которая позволяет после соответствующей термической обработки получить весь диапазон типов структурных составляющих основы от перлита до 100% остаточного аустенита (перлит, промежуточные структуры, мартенсит, остаточный аустенит). При этом состав стали, особенно количество углерода выбирают таким образом, чтобы после закалки на преимущественно аустенитное состояние количество карбидов было минимальным с целью меньшего влияния на показатели уровня износостойкости металлической матрицы.

Из стандартных сталей наиболее приемлемой для этих целей оказалась сталь X12Ф1, в структуре которой после закалки на 100% остаточного аустенита, содержится не более 5% карбидной фазы.

Для выявления влияния количества карбидной фазы были испытаны в различном структурном состоянии образцы из стали X12, имеющей близкий со сталью X12Ф1 химический состав и отличающиеся практически только большей массовой долей углерода.

Испытание образцов (табл. 4.5) проводили в производственных условиях Запорожского Областного объединенного асфальтобетонного завода на установке ДС-117-2Е.

В результате испытаний установлена пропорциональная зависимость между твёрдостью и износостойкостью (рис. 4.8; рис. 4.9).

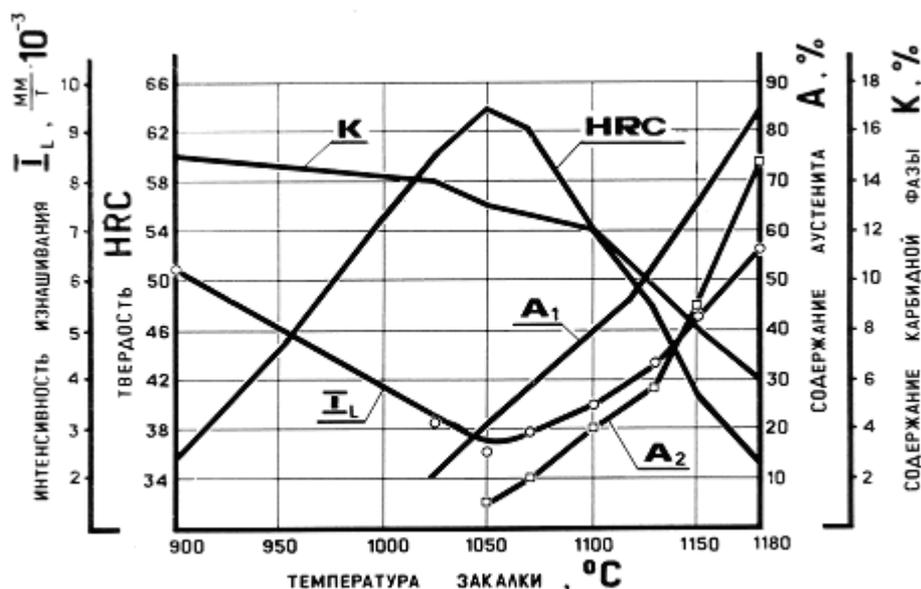
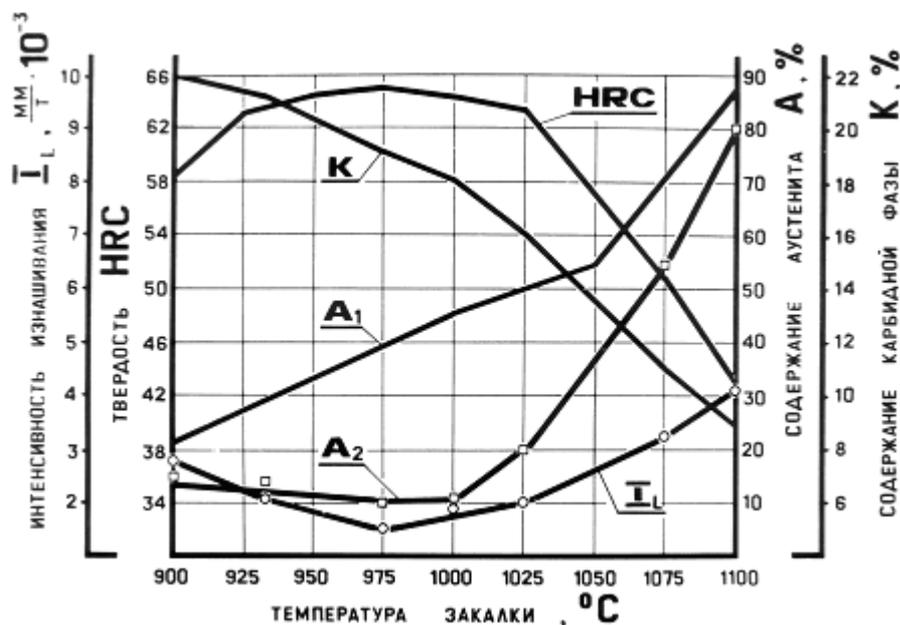


Рисунок 4.8 – Изменение интенсивности изнашивания (I_L), твердости (HRC_3), содержания карбидной фазы (K) и количества остаточного аустенита (A) стали X12Ф1 в зависимости от температуры закалки

В обеих сталях минимальная интенсивность изнашивания достигается после закалки на максимальную твердость, когда структура состоит из комплексных карбидов железа и хрома, расположенных в мартенситной матрице с небольшим количеством остаточного аустенита.



A1 – до испытаний; A2 – после испытаний

Рисунок 4.9 – Изменение интенсивности изнашивания (I_L), твердости (HRC_3), содержания карбидной фазы (K) и количества остаточного аустенита (A) стали X12Ф1 в зависимости от температуры закалки.

Анализ микрорельефа поверхности трения образцов из сталей X12Ф1 (рис. 4.10), испытанных в условиях работы лопаток асфальтосмесителя, показал, что характер и количество повреждений полностью отражают полученные значения интенсивности изнашивания данных сталей в различном структурном состоянии.

Так, при испытании сталей X12Ф1 в преимущественно мартенситном состоянии, на поверхности образцов образуется характерный рельеф с малым количеством рисок и царапин. Как снижение, так и повышение температуры закалки приводит к падению твердости (в первом случае за счёт появления в структуре ферритной составляющей в составе троостита, во втором за счёт увеличения количества остаточного аустенита) и увеличению интенсивности изнашивания (см. рис. 4.8; рис. 4.9). Однако замечено, что интенсивность изнашивания образцов со структурой остаточного аустенита несколько ниже, чем образцов с той же исходной твердостью, но с ферритной составляющей структуры (см. табл. 4.6, образцы 01 и 08 из стали X12Ф1; 10и16из стали X12). Причём, важно отметить, что хотя износостойкость отличается незначительно, но образцы с остаточным аустенитом содержат в структуре 2,5 раза (X12Ф1) и в 2,1 раза (X12) меньше карбидной фазы, чем образцы с той же исходной твердостью, но содержащие феррит, что связано с некоторым упрочнением аустенита в процессе изнашивания (см. табл. 4.5) [38]. Недостаточная степень упрочнения аустените, повидимому, связана с наличием жидкой битумной связки асфальтобетонной смеси. Разогретый битум образует

Таблица 4.5 – Термообработка фазовый состав и свойства образцов из стали X12Ф1 и X12, испытанных в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителя

Маркировка образцов	Температура закалки, °С	Исходная твердость HRC _c	Массовая доля аустенита, %		Количество карбидов, % [35]	Микротвердость поверхности после изнашивания Н ₅₀ , ГПа	Интенсивность изнашивания I _L , мм/т*10 ⁻³	Относительная износостойкость ε
			До испытаний	После испытаний				
СТАЛЬ X12Ф1								
01	900	35	-	-	15,0	5,96	6,25	1,39
02	1025	60	10	-	14,0	7,79	3,09	2,82
03	1050	64	20	5	13,0	8,82	2,53	3,45
04	1070	62	30	10	12,5	8,35	2,90	3,00
05	1100	54	40	20	12,0	8,05	3,48	2,51
06	1130	48	50	28	10,0	7,16	4,26	2,05
07	1150	41	65	45	8,0	6,19	5,29	1,65
08	1180	35	85	74	6,0	5,65	6,71	1,30
09	Отж	215HV	-	-	16,0	5,08	7,62	1,15
СТАЛЬ X12								
10	850	52	15	10	23	7,43	3,63	2,46
11	895	58	20	15	22	7,86	2,81	3,10
12	935	64	30	15	21	8,12	2,05	4,25
13	975	65	40	10	19	9,85	1,74	5,01
14	1000	64	46	10	18	9,54	1,89	4,61
15	1025	63	50	20	166	8,71	2,00	4,36
16	1075	51	72	55	11	7,55	3,25	2,68
17	1100	43	87	80	9	6,22	4,02	2,17
18	Отж	218HV	-	-	25	5,54	4,60	1,80

*эталон – сталь 45 отожженная, 166 HV

устойчивую плёнку [12,17] между поверхностью трения и изнашиваемыми частицами гранита, что и не позволяет аустениту реализовать свои потенциальные возможности к упрочнению. Поэтому твердость поверхности трения не возрастает, в результате чего наблюдается прямое ее разрушение со значительным числом рисок, канавок, следов пластического оттеснения микрообъемов металла (см. рис. 4.10).

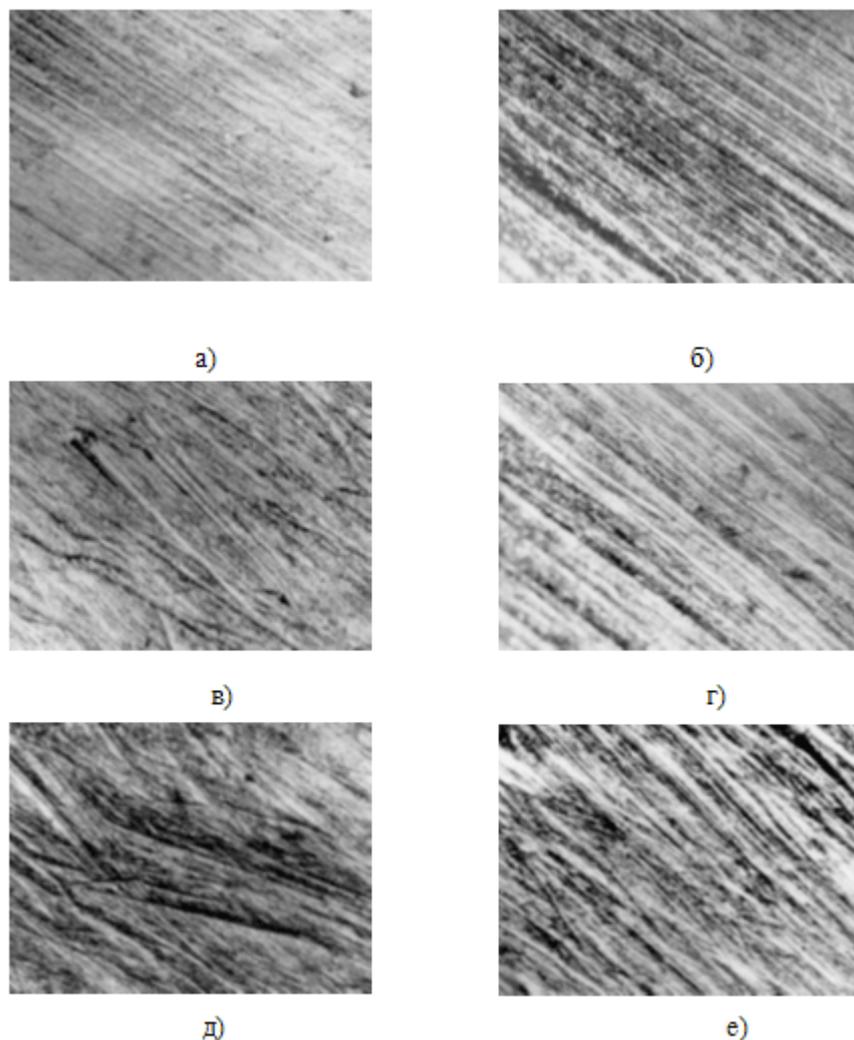


Рисунок 4.10 – Поверхность трения образцов из сталей X12 и X12Ф1 после изнашивания x25

Таким образом, испытания образцов обеих сталей во всём возможном диапазоне структур металлической матрицы позволило установить, что в условиях эксплуатации лопаток роторов асфальтосмесителей потенциальные возможности остаточного аустенита к упрочнению обеспечивающие в других условиях [38] существенное повышение поверхностной твёрдости и износостойкости в нашем случае практически не реализуются. Максимальная износостойкость сплавов достигается при их наивысшей исходной твёрдости, а снижение твёрдости как, за счёт увеличения в структуре феррита, так и аустенита приводит к увеличению интенсивности изнашивания. Влияние количества карбидной фазы на износостойкость сплавов в условиях лопаток выявлено при сравнении интенсивности сталей X12 и X12Ф1 (рис. 4.11), которые аналогичны по химическому составу и практически отличаются только количеством карбидов (в 1,5-1,6 раза) из-за различной массовой доли углерода (1,20-1,45%С в стали X12Ф1 и 2,00-2,20%С в стали X12). Эти исследования показали значительное влияние количества карбидной фазы на износостойкость сталей. Повышение износостойкости за счёт увеличения количества карбидной фазы настолько существенно, что интенсивность изнашивания отожженной стали X12 при твёрдости 218 HV (образец 18) меньше интенсивности изнашивания сталей X12Ф1 в преимущественно аустенитном состоянии (образцы 08, 07) и находится на уровне износостойкости X12Ф1 с аустенитно-мартенситной структурой при твёрдости 46-47 HRC.

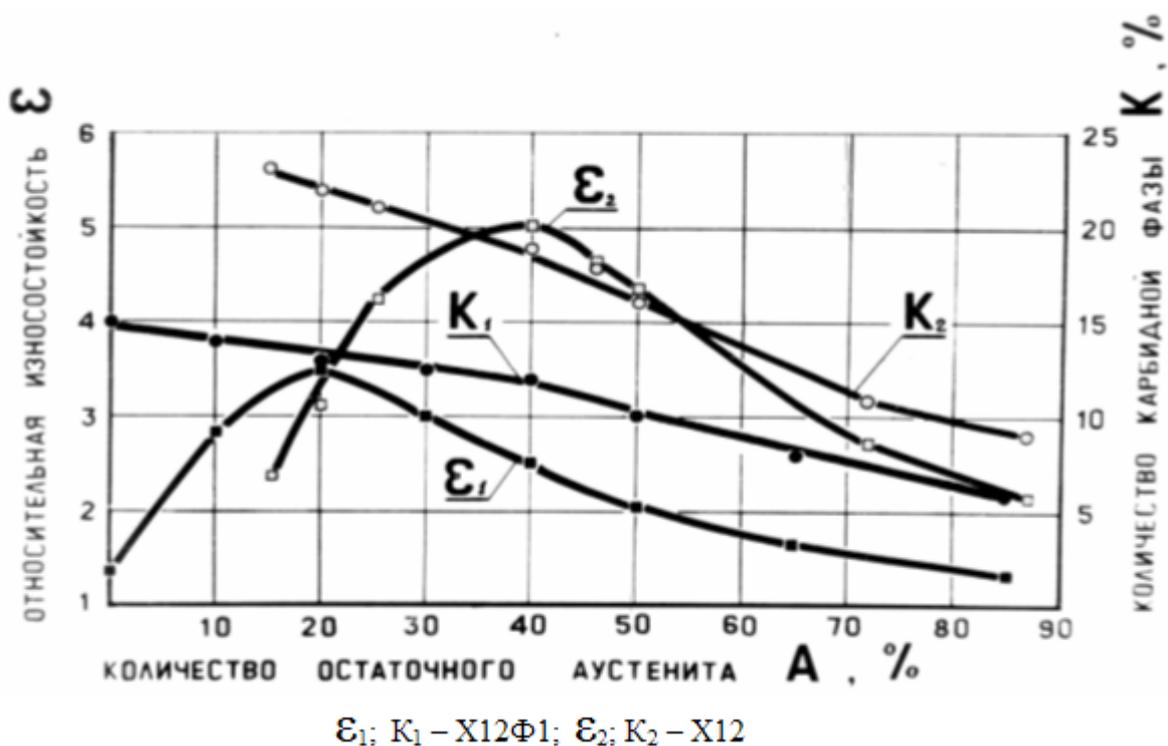


Рисунок 4.11 – Изменение относительной износостойкости (ϵ) и количества карбидной фазы (K) в зависимости от содержания в структуре сталей остаточного аустенита (A)

Износостойкость сталей в нашем случае существенно зависит не только от общего содержания упрочняющей фазы в их структуре но и от ориентации карбидных и боридных зёрен по отношению к рабочей поверхности.

Для защиты деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного, и гидроабразивного изнашивания, широкое применение получили наплавочные материалы системы Fe-C-Cr-B с высоким (3-6 %) содержанием бора кристаллизующиеся с боридной упрочняющейся фазой типа $(Fe; Cr)_2; (Fe; Cr)B$, микротвёрдость которой составляет 22-26 ГПа. Однако в конкретных условиях изнашивания высокая износостойкость таких сплавов определяется не только значительным количеством (50-80%) и твёрдостью включений, но и зависит также от пространственного расположения упрочняющей фазы относительно поверхности изнашивания. Это связано с особенностями формирования избыточной боридной фазы имеющей форму игл, ориентация которых совпадает с направлением теплоотода, что обеспечивает им максимальную скорость роста и подавляет тем самым рост кристаллов, ориентированных под углом к градиенту теплоотода. В то же время известно, что максимальное увеличение способности сплава к сопротивлению абразивному разрушению достигается при ориентации боридных игл перпендикулярно плоскости изнашивания. Поэтому главной особенностью при наплавке данной группы сплавов является необходимость учёта конкретных условий эксплуатации деталей, заключающихся в изменении их конструкции, которая обеспечит условия для направленной кристаллизации твердых включений под углами, близкими к 90° по отношению к плоскости изнашивания, что позволит в максимальной степени реализовать потенциальные возможности, заложенные в износостойких материалах. Исходя из этого, была усовершенствована конструкция лопаток асфальтосмесителей (А. С. 1675103) с канавкой на рабочей кромке детали, при наплавке которой сплавом 150X13P3Ф (А. С. 1676174), обеспечивается получение структуры металла с избыточной фазой, ориентированной под углами $\alpha=80-100^\circ$ к плоскости изнашивания. Производственные испытания асфальтосмесителей показали, что упрочнённые лопатки по разработанной технологии имеют срок непрерывной работы в 2-2,5 раза выше, чем серийно выпускаемые лопатки из чугуна по СТП 561-71 ПО "Дормашина" г. Кременчуг [142].

Представленные результаты позволяют утверждать, что для рассматриваемых условий эксплуатации лопаток количество карбидной фазы, а также её ориентация относительно рабочей поверхности вносят более значительный вклад в повышение износостойкости сплава, чем структурное состояние матрицы. Поэтому главным резервом при разработке износостойкого материала для этих условий изнашивания является получение сплава с максимально возможным количеством упрочняющей фазы и её благоприятной ориентацией к поверхности изнашивания. При этом важно отметить, что тип металлической матрицы выбирается из условий конструкционной прочности лопаток и технологичности их изготовления.

4.5 ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАНДАРТНЫХ НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учитывая размеры рабочих органов строительного оборудования, а также величину допустимого износа рабочих поверхностей можно считать наиболее экономически целесообразным методом повышения их срока службы электродугую наплавку слоем износостойкого материала. Поэтому с целью определения приемлемости стандартных наплавочных материалов с различным типом, количеством упрочняющей фазы, а также структурой сплава, обеспечивающих максимальную износостойкость лопаток асфальтосмесителей, были проведены промышленные испытания в условиях Запорожского Областного Объединённого асфальтобетонного завода на установке ДС-117-2Е.

Исследование изнашивания образцов из сталей Х12 и Х12Ф1 позволило установить, что в условиях эксплуатации лопаток сплавы характеризуются максимальной износостойкостью при наивысшей исходной твёрдости, когда в их аустенитно - мартенситной структуре содержится наибольшее количество мартенсита. Кроме этого, довольно чётко показана связь между содержанием карбидной фазы и износостойкостью сталей, указывающая на то, что карбиды значительно увеличивают способность сплавов к сопротивлению абразивному разрушению. Исходя из этого для условий изнашивания лопаток асфальтосмесителей наиболее перспективными следует считать сплавы с аустенитно-мартенситной основой и значительным содержанием упрочняющей фазы. Поскольку сплавы с мартенситной основой имеют повышенную хрупкость, а материалы с преимущественно аустенитной структурой, не претерпевающей структурных превращений при изнашивании, отличаются низкой износостойкостью. Для испытаний были отобраны материалы, позволяющие получить в наплавленном металле различное сочетание аустенитно - мартенситной основы и упрочняющей фазы. Включение в число исследуемых сплавов материалов с высоким и низким содержанием упрочняющей фазы необходимо для выяснения границ возможного повышения количества карбидов, при котором сохраняется достаточная эксплуатационная надёжность. Для сравнения испытывали наплавки с аустенитной, ферритной и мартенситной структурой кроме того, определяли износостойкость чугуна 250Х5С2ГАТ (А.С. 429130), применяемого на ПО "Дормашина" г. Кременчуг для изготовления стандартных лопаток асфальтосмесителей.

Проведенные испытания показали (табл. 4.6), что низкой износостойкостью ($\epsilon = 1,32$) обладает сплав 3Х2В8 (№11), структура которого состоит из перлитной основы с незначительными выделениями по границе зёрен карбидной фазы (рис. 4.11). Небольшую износостойкость имеют также материалы, обеспечивающие в наплавленном металле чисто аустенитную (ПП-АН105) и мартенситную (ЭН-Н60) структуры. Так, металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН105, имеет структуру марганцовистого аустенита и в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителей имеет крайне малую износостойкость ($\epsilon = 1,6$), что можно объяснить низкой микротвёрдостью стабильного аустенита ($H_{50} = 3,8-4,5$ ГПа) и отсутствием упрочняющей фазы.

Низкой износостойкостью ($\epsilon = 2,1$) в данных условиях изнашивания обладает металл, наплавленный электродами ЭН-Н60, имеющий мартенситную структуру с незначительным количеством карбидов (5,3%). Таким образом, наплавочные материалы данной группы (ПП-3Х2В8; ЭН-Н60; ПП-АН 105) имеют хорошую технологическую и эксплуатационную надёжность, однако вследствие практически полного отсутствия в структуре карбидной фазы имеют износостойкость в 1,3-2.1 раза

ниже, чем чугун 250X5C2ГАТ, применяемой для изготовления лопаток (см. табл. 4.7), что обуславливает их полную непригодность для использования в данных условиях эксплуатации. Наплавочные материалы II группы (ПП-АН140; ПП-АН125; ПП-Х12Ф1; ПП-АН101) обеспечивают в наплавке металл с аустенито - мартенситной основой и 10-15% карбидов. Анализ результатов испытаний (см. таб. 4.6.) показал, что при примерном равенстве карбидной фазы износостойкость этой группы сплавов определяется твёрдостью матрицы, характеризующей количество в ней, α фазы. Так, при соотношении α/γ равном 50/50 (ПП-Х12Ф1) износостойкость составляет 2,15, а при соотношении 60/40 (ПП-АН140) и 90/10 (ПП-АН125) соответственно равна 3,60 и 3,86. Однако количество карбидной фазы оказывает более существенное влияние, чем агрегатная твёрдость, повышенная только за счёт увеличения микротвёрдости основы металла. Так, увеличение количества упрочняющей фазы до 35% (ПП-АН101) даже при соотношении α/γ равном 25/75, наблюдается увеличение износостойкости до 4,2. Сплавы данной группы мало склонны к трещинообразованию, обладают хорошей технологической и эксплуатационной надёжностью. В то же время недостаточное количество карбидной фазы в структуре наплавленного металла не обеспечивает им достаточного уровня износостойкости.

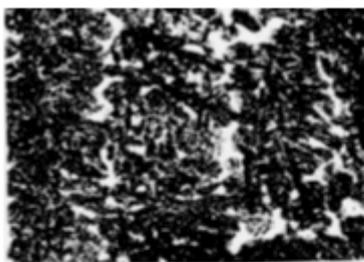
Наибольшей сопротивляемостью изнашиванию обладают сплавы III группы (табл. 4.6) со значительным содержанием (50-80%) избыточной фазы (рис. 4.11). Самую низкую износостойкость ($\epsilon = 5,1$ см. табл. 4.6) в данной группе имеет металл, наплавленный электродами ЦС-1 (Сормайт), имеющий 60% избыточных карбидов. Недостаточная износостойкость данного материала связана с малой микротвёрдостью карбидов Cr_7C_3 ($H_{50} = 12,25-13,4$ ГПа) по сравнению с микротвёрдостью абразивных частиц ($H_{50} = 13,9-16,8$ ГПа), что вызывает малоцикловое разрушение поверхности трения (рис. 4.12). Более высокой износостойкостью обладает металл, наплавленный электродами ЭН-Т590 ($\epsilon = 5,4$) и ЭН-Т620 ($\epsilon = 5,6$). Увеличение износостойкости данных материалов вызвано дополнительным легированием металла бором, что способствует повышению твёрдости карбидной фазы и основы сплава. Так, микротвёрдость избыточной фазы в этих материалах повышается до $H_{50} = 14,3-16,5$ ГПа, а матрицы сплава до $H_{50} = 6,2-7,9$ ГПа [71]. Высокой износостойкостью в условиях эксплуатации рабочих органов смесителя обладают стандартные наплавочные материалы ЭН-ИТС 01 ($\epsilon = 5,9$), КБХ-45 ($\epsilon = 6,2$), ПП-АН170 ($\epsilon = 6,5$), опытный сплав ЭН-180 Х14Р4Т ($\epsilon = 7,1$). Увеличение способности данной группы материалов сопротивляться изнашиванию связано с тем, что микротвёрдость избыточных включений сравнима или больше ($H_{50} = 15-18$ ГПа) микротвёрдости абразивных частиц. Металлографические исследования изношенной поверхности (рис. 4.12) показали, что при таком соотношении микротвёрдости, абразивная частица сталкиваясь с упрочняющей фазой разрушается частично или полностью. В результате этого она теряет свои режущие свойства и практически прекращает разрушительное действие. При этом длина образующегося следа от пластического деформирования металла или снятия микростружки ограничивается расстоянием между двумя твёрдыми включениями.

В процессе изнашивания за счёт многократного повторения актов разрушения микрообъёмов металла в пространстве между избыточной фазой поверхность матрицы имеет более глубокие следы пластического деформирования, что вызывает выход твёрдой фазы над поверхностью основы сплава. Следовательно, в условиях эксплуатации рабочих органов асфальтосмесителей высокая износостойкость гетерогенных сплавов, содержащих значительное количество упрочняющей фазы, связано с избирательным характером в полной степени отвечающим принципу Шарпи [71], т.е. в первую очередь разрушается более мягкая структурная составляющая (основа сплава).

В тоже время, имеющиеся стандартные сплавы с большим количеством крупных избыточных включений мало приемлемы для использования их в данных условиях изнашивания, поскольку они обладают высокой склонностью к трещинообразованию и чрезмерной хрупкостью, что приводит к отколам наплавленного металла в процессе эксплуатации. Максимальной износостойкостью из всех исследованных наплавочных материалов обладает металлокерамический сплав ТЗ "Релит" ($\epsilon = 13,5$),

микроструктура которого состоит из твёрдого раствора с крупными частицами дробленного монокарбида вольфрама WC (рис. 4.13). Интенсивность изнашивания этого сплава значительно меньше, чем у рассмотренных выше наплавочных материалов вследствие значительной твёрдости карбида вольфрама ($H_{50}=24-30$ ГПа), которая в 1,6-2 раза выше твёрдости абразивных частиц. Однако, применение релита в качестве защитного материала несмотря на его значительную износостойкость, ограничено его недостаточной эксплуатационной приемлемостью, высокой стоимостью, малой производительностью и трудоёмкостью газопламенной наплавки.

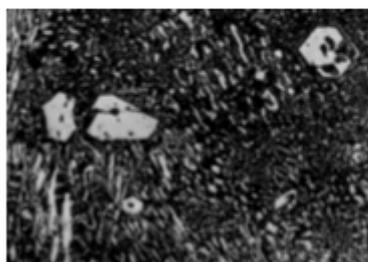
Проведенными исследованиями установлено, что износостойкость наплавленного металла в условиях работы асфальтосмесителей зависит от микротвёрдости матрицы и упрочняющей фазы сплава (рис. 4.14 и рис. 4.15). При примерном равенстве карбидной фазы, износостойкость определяется микротвёрдости основы. Однако даже при самом высоком значении микротвёрдости $H_{50}=9,5$ ГПа (табл. 4.5) основа сплава не может обеспечить высокую сопротивляемость изнашиванию, т. к. микротвёрдость абразивных частиц ($H_{50}=13,9-16,8$ ГПа) в 1,40-1,76 раза выше микротвёрдости матрицы.



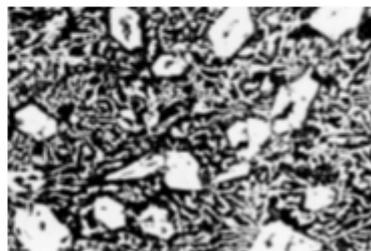
ПП – 3ХВ8



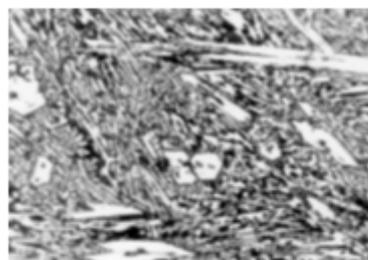
ПП – АН125



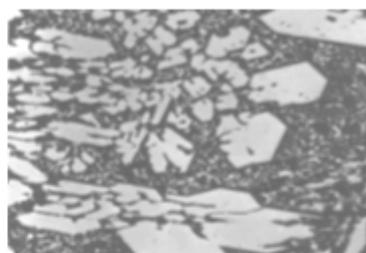
ЭН – ЦС1 "Сормайт"



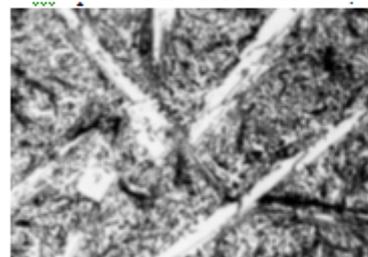
ЭН – Т590



ЭН – ИТС – 01



КВХ - 45



ПП – АН170



Релит Т3

Рисунок 4.12 – Микроструктура наплавленных сплавов, испытанных в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителей x300

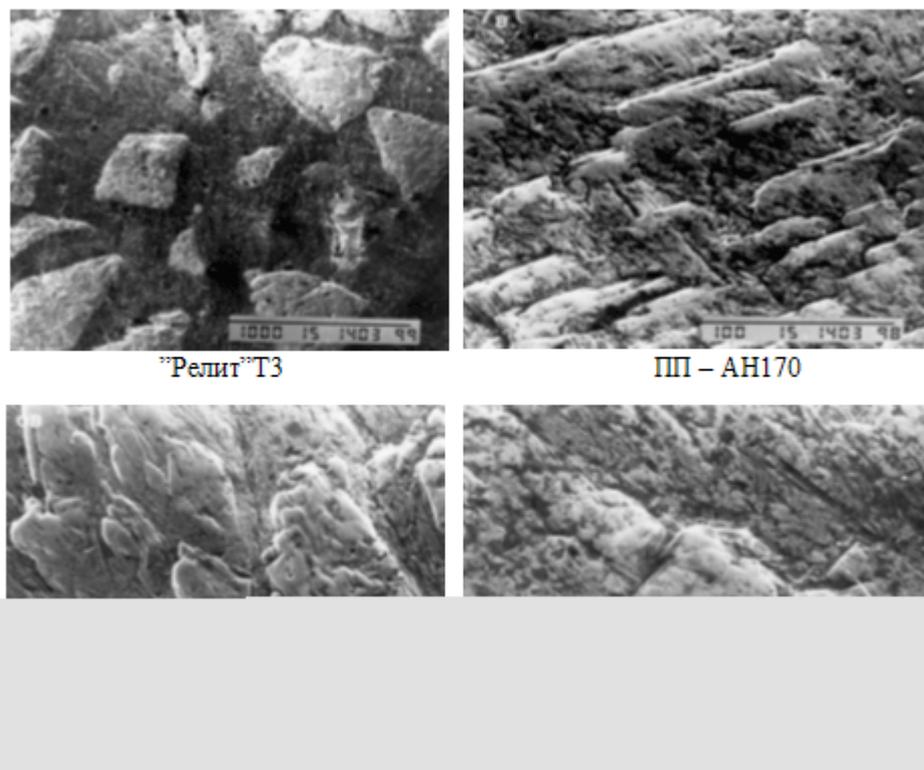


Рисунок 4.13 – Поверхность трения после изнашивания материалов, испытанных в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителей x500x2

Анализ зависимостей влияния количества и микротвёрдости упрочняющей фазы на способность металла сопротивляться изнашиванию в условиях эксплуатации лопаток (рис. 4.15) показал, что значительное увеличение износостойкости наступает при количестве твёрдых включений не менее 50% и отношении микротвёрдости избыточной фазы и абразива H_m/H_a равном или больше 1.3, т.е. с микротвёрдостью карбидов (боридов) около 19-22 ГПа.

В тоже время, при разработке износостойкого материала с высоким содержанием карбидов выбор металлической матрицы должен заключаться в получении основы несколько с высокой микротвёрдостью, что может стать причиной значительной хрупкости, сколько со способностью матрицы сплава прочно удерживать упрочняющую фазу. Таким образом, результаты испытаний стандартных и опытных наплавочных материалов показали, что в условиях эксплуатации лопаток асфальтосмесителей сплавы, имеющие в структуре малое количество карбидов, хотя и менее склонны к образованию трещин,

- 1 – сплавы с содержанием упрочняющей фазы менее 16%
- 2 – сплавы с содержанием упрочняющей фазы менее 30%

Рисунок 4.14 – Изменение относительной износостойкости исследованных наплавочных материалов в зависимости от микротвердости основы сплава

Рисунок 4.15 – Изменение относительной износостойкости исследованных наплавочных материалов в зависимости от количества и микротвердости упрочняющей фазы

имеют низкую износостойкость и их использование не позволяет в конкретных условиях изнашивания увеличить срок службы деталей. Уровень износостойкости сплава ЦС-1 "Сормайт", а также металла, наплавленного электродами ЭН-Т590, ЭН-Т620, ЭН-ИТС 01 в 1,8-1,0 раза выше, чем у материала, применяемого для изготовления лопаток (чугун 250Х5С2ГАТ, ТЗ=8600С), поэтому их можно использовать для износостойкой наплавки рабочих поверхностей лопатки. В то же время, износостойкость данных материалов не является предельно возможной для системы легирования Fe-C-Cr-V. Этому свидетельствует высокий уровень сопротивляемости изнашиванию наплавочных материалов ПП-АН170, КБХ-45, ЭН-180Х12Р4, микротвёрдость упрочняющей фазы которых достигает 18-22 ГПа. Однако такие сплавы неприемлемы для наплавки лопаток, поскольку склонны к трещинообразованию и чрезмерной хрупкости, что приводит к выкрашиванию металла в процессе работы.

В результате исследования условий эксплуатации и характера изнашивания лопаток асфальтосмесителей, установлено что, лопатки подвержены интенсивному абразивному

изнашиванию. Показано, что величина радиального зазора между лопаткой и броней смесителя является одним из основных эксплуатационных параметров, который определяет сложный процесс перемещения, заклинивания, и дробления абразивных частиц в зоне рабочей кромки лопатки, в которой отмечена максимальная интенсивность изнашивания. Увеличение величины радиального зазора более 10мм вызывает значительное повышение числа и энергии дробимых абразивных частиц и вызывает повышение износа лопатки. В условиях работы лопаток асфальтосмесителей не наблюдается существенного упрочнения поверхности трения и максимальной износостойкостью обладают сплавы при высокой исходной твёрдости.

Определена роль упрочняющей фазы и её ориентация относительно рабочей поверхности детали лопаток асфальтосмесителей. Показано, что количество карбидной фазы вносит более значительный вклад, чем структурное состояние матрицы сплава. При одинаковой структуре основы увеличение карбидов в 1,5 раза (для стали типа X12) обеспечивает повышение износостойкости материала 1,6 раза.

Анализ результатов исследования изнашивания наплавочных сплавов показал, что для эксплуатации в условиях лопаток наиболее перспективными являются высокоуглеродохромбористые износостойкие материалы. Для обеспечения высокой износостойкости сплав должен содержать 50-60% упрочняющей фазы, с микротвёрдостью не менее $H_{50}=19-22$ ГПа.