

Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства –
филиал Федерального государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(ИАЭП-филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА
В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Санкт-Петербург

2021

УДК 631.17
ББК 40
И66

Инновационные технологии технического сервиса в агропромышленном комплексе / И. Н. Шило, Н. К. Толочко, Н. Н. Романюк, С. А. Войнаш, В. А. Соколова, С. А. Партко, А. А. Лучинович, Е. В. Тимофеев, А. Ф. Эрк. СПб.: ИАЭП. 2021. 260 с.

В монографии рассмотрены современное состояние и перспективы развития инновационных технологий технического сервиса в агропромышленном комплексе, включая информационные, интеллектуальные, высокоэнергетические, интегрированные, аддитивные и нанотехнологии.

Для научных, инженерных и производственных работников, специализирующихся в агропромышленной сфере, а также студентов технических учреждений высшего образования, магистрантов, аспирантов и преподавателей, интересующихся проблемами развития технического сервиса в агропромышленном комплексе.

Рецензенты:

Кокиева Г.Е. – доктор технических наук, профессор, декан Инженерного факультета, профессор кафедры «Информационных и цифровых технологий» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет»

Мельберт А.А. – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасности жизнедеятельности» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им.И.И.Ползунова»

Рассмотрено и рекомендовано к изданию Ученым советом ИАЭП- филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

(протокол № 1 от 26 апреля 2021 года)

ISBN 978-5-88890-097-0

© И.Н. Шило и др, 2021

© ИАЭП, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Информационные технологии	6
1.1. Информационные технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика	6
1.2. Информационные системы технического сервиса	22
1.2.1. Технический сервис тракторов	22
1.2.2. Технический сервис грузовых автомобилей	31
1.2.3. Дистанционный контроль технического состояния тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин	37
1.2.4. Контроль технического состояния ДВС по параметрам переходных режимов	44
Глава 2. Интеллектуальные технологии	46
2.1. Интеллектуальные технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика	46
2.2. Интеллектуальные системы технического сервиса	59
2.2.1. Сельскохозяйственные машины	59
2.2.2. Транспортные машины	65
2.3. Интеллектуальные материалы для технического сервиса	73
2.3.1. Интеллектуальные материалы для технической диагностики	74
2.3.2. Интеллектуальные материалы для деталей машин	80
Глава 3. Высокоэнергетические технологии	100
3.1. Высокоэнергетические технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика	100
3.2. Высокоэнергетические технологии очистки деталей машин	105
3.2.1. Лазерная очистка	105
3.2.2. Плазменная очистка	112
3.2.3. Термоабразивная очистка	115
3.2.4. Криогенный бластинг	115
3.2.5. Аэрогидродинамическая абразивная очистка	117
3.2.6. Кавитационная очистка	118
3.3. Высокоэнергетические упрочняющие технологии	122
3.3.1. Лазерное упрочнение	122
3.3.2. Электронно-лучевое упрочнение	123
3.3.3. Ионно-лучевое упрочнение	124
3.3.4. Плазменное упрочнение	125
3.3.5. Взрывное упрочнение	125
3.4. Высокоэнергетические технологии формоизменения	127
3.4.1. Высокоэнергетическая штамповка	127
3.4.2. Электроэрозионная обработка	132

Глава 4. Интегрированные технологии	137
4.1. Интегрированные технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика	137
4.2. Компьютерно-интегрированные технологии	139
4.2.1. Интегрированные технологии электронного документирования	139
4.2.2. Интегрированные логистические технологии	143
4.3. Интегрированные технологии обработки деталей машин	145
4.3.1. Интегрированные технологии резки и финишной обработки	145
4.3.2. Интегрированные упрочняющие технологии	156
Глава 5. Нанотехнологии	166
5.1. Нанотехнологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика	166
5.2. Конструкционные наноматериалы	167
5.3. Наномодифицирование поверхности	173
5.4. Нанопокрyтия	179
5.5. Смазочные наноматериалы	188
5.6. Топливные наноматериалы	197
Глава 6. Аддитивные технологии	199
6.1. Аддитивные технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика	199
6.2. Аддитивные технологии изготовления деталей	213
6.2.1. Прямое изготовление деталей	213
6.2.2. Изготовление технологической оснастки и инструмента	218
6.3. Аддитивные технологии ремонта деталей	223
Список литературы	231

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технический сервис в агропромышленном комплексе (АПК) представляет собой комплекс услуг по обеспечению сельскохозяйственных товаропроизводителей техникой, эффективному использованию и поддержанию ее в работоспособном состоянии в течение всего периода эксплуатации.

Важнейшим направлением развития технического сервиса является повышение его качества на основе применения инновационных технологий технического обслуживания и ремонта. Для их успешного продвижения в агропромышленную сферу необходимо обеспечить подготовку соответствующих специалистов. В связи с этим необходимо провести обобщение и систематизировать знания и опыт по вопросам применения данных технологий для технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники. Именно этому посвящена предлагаемая книга, в которой рассмотрено современное состояние развития инновационных технологий технического сервиса в АПК, включая информационные, интеллектуальные и аддитивные технологии, нанотехнологии, высокоэнергетические технологии очистки и интегрированные технологии обработки.

Монография адресуется, в первую очередь, специалистам в области агропромышленного производства. При этом главной ее целью является обратить их внимание на широкие возможности инновационных технологий технического сервиса и тем самым способствовать активизации их деятельности по эффективному применению данных технологий. Может быть полезна студентам технических вузов, магистрантам, аспирантам и преподавателям, интересующимся проблемами развития технического сервиса АПК.

ГЛАВА 1

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1.1. Информационные технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика

Информационные технологии и информационные системы

Под информационными технологиями (ИТ) в общем случае понимают процессы поиска, сбора, хранения, обработки, предоставления и распространения информации.

Информационные технологии реализуются с помощью информационных систем (ИС), представляющих собой упорядоченную совокупность документально оформленных данных, компьютерной и телекоммуникационной техники и программного обеспечения.

В информационных системах протекают следующие процессы:

- ввод информации из внешних или внутренних источников;
- обработка входной информации и представление ее в удобном для пользователей виде;
- вывод информации для представления пользователям или передачи в другие системы;
- процесс обратной связи, т.е. обработка полученной информации с целью коррекции новой входной информации.

Для более эффективной работы с разнообразной по содержанию информацией ее систематизируют и группируют в виде баз данных (БД), представляющих собой совокупности определенным образом взаимосвязанных данных, которые хранятся в памяти компьютера.

Современные ИТ предусматривают создание автоматизированных рабочих мест (АРМ) – комплексов аппаратно-программных средств, располагающихся непосредственно на рабочем месте специалиста и предназначенных для автоматизации его работы. Отдельные АРМ объединяют в локальные вычислительные сети (ЛВС) предприятия, обеспечивающие возможности обмена информацией между специалистами различного профиля, использования единой БД предприятия, подключения к региональным БД, передачи информации руководству предприятия для оценки ситуации и принятия управленческих решений, коллективного использования оргтехники, прикладных программных средств и т.п.

В настоящее время в большинстве предприятий используются информационные системы управления предприятием (ИСУП), которые обеспечивают повышение эффективности решения различных производственных задач [1, 2].

Особенности информатизации предприятий технического сервиса

Анализ современного состояния технического сервиса в АПК показывает, что недостаточное наличие, а иногда и полное отсутствие необходимой информации, значительно усложняет, а в некоторых случаях делает

невозможным качественно проводить техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) сельскохозяйственной техники [3]. Кроме того, для поиска и обработки уже имеющейся информации затрачивается значительное время, причем из-за ряда субъективных причин эта информация может искажаться, быть не полной, поступать несвоевременно и не по адресу [3, 4]. В силу указанных причин становится весьма актуальным совершенствование технического сервиса на предприятиях АПК с использованием современных информационных технологий.

Несмотря на широкое распространение ИТ в целом, информатизация инженерных служб сельхозпредприятий находится только лишь в начальной стадии [5]. Главным препятствием здесь является отсутствие современных информационных коммуникаций у сельскохозяйственных инженерных служб, а также нехватка компьютерной техники и специализированных компьютерных программ для инженеров АПК. При этом в качестве базовой системы информационных коммуникаций рассматриваются персональные компьютеры, которые объединяются в локальную сеть инженерной службы предприятия, подключенную к Интернету. На каждый из компьютеров такой сети кроме основного программного обеспечения устанавливаются специализированные программы для решения инженерных задач управления механизированными процессами и автоперевозками в сфере технического сервиса машин.

Осуществляя оснащение предприятий ИТ-средствами, следует иметь в виду, что это оснащение будет целесообразным, если полученный экономический эффект превысит затраты на приобретение ИТ-средств, а также на содержание инженеров-аналитиков [5]. Величина этого эффекта связана в основном со снижением экономического ущерба от эксплуатации техники с ухудшенным техническим состоянием. Также следует принять во внимание, что контролирующая информационная система может помочь упорядочить работу на складе запасных частей, автоматизировать отчетность и документооборот инженерной службы, улучшить планирование сервисных работ и запасов комплектующих частей к машинам.

Применение ИТ в техническом сервисе в АПК имеет определенные особенности, связанные с характером организации ТОиР сельхозтехники [3].

Ремонтные предприятия для бесперебойной работы должны быть обеспечены необходимыми материально-техническими ресурсами, а также соответствующим обслуживающим персоналом, имеющим требуемую степень квалификации. Обычно ремонтные предприятия для решения вопросов материально-технического обеспечения используют торгово-проводящие сети централизованных организаций агрообеспечения. Существуют и другие организации, занимающиеся материально-техническим обеспечением и различающиеся по видам предлагаемых услуг, категориям обслуживаемых заказчиков и другим параметрам. Все эти организации объединяет общность сферы их деятельности, выражающейся в обработке потоков информации, которая поступает, как от предприятий, занимающихся

ТОиР, так и от предприятий, которые непосредственно производят запчасти к сельхозтехнике.

Основной объем работ по ТОиР техники должен выполняться ее владельцами. Поэтому даже в мелких хозяйствах следует создавать производственную базу для мелкого ремонта. Сложные виды ТОиР необходимо проводить в ремонтных мастерских крупных хозяйств и на ремонтных предприятиях.

Районные предприятия технического сервиса могут включать в себя станции ТОиР тракторов, сельхозмашин, автомобилей, мастерские общего назначения, технические обменные пункты и др. Они исследуют спрос и предложения на технику, снабжают хозяйства запчастями, а также другими материально-техническими средствами. Областные предприятия технического сервиса выполняют функции специализированных предприятий по ремонту техники. На базе областных предприятий организуются региональные центры технического сервиса. Они изучают конъюктуру рынка; организует рекламу, продажу и доставку машин, запасных частей и материалов; координирует деятельность сервисных предприятий и дилеров, а также выполняет ряд других функций.

Фирменный технический сервис проводится заводом-изготовителем через центры сервисного сопровождения. Главный центр технического сервиса – торгово-накопительное координирующее подразделение завода изготовителя, который организует работу по сбыту и проведению ТОиР, изучает конъюктуру рынка и т.д.

При рациональной организации технического сервиса время на ТОиР может быть сокращено на 8-12 %, наработка на трактор может быть увеличена на 20-28%, а его производительность – на 34-46% [3].

Функционирование рассмотренной структурной схемы технического сервиса осуществляется на следующих принципах:

- организация ремонта машин исходя из признания приоритета сельского товаропроизводителя, с учетом региональных особенностей их использования, а также особенностей их конструктивно-технологического исполнения;

- обеспечение экономической заинтересованности в ремонте машин всех участников сельскохозяйственного производства: владельцев машин, ремонтно-технических предприятий, а также заводов, производящих машины и запчасти к ним;

- соблюдение приоритета владельцев в выборе исполнителей ремонта своих машин;

- обеспечение оптимального распределения работ по ТОиР машин между подразделениями ремонтно-обслуживающей базы;

- обеспечение оптимальных пропорций между производством новых машин, запчастей к ним и ремонтно-обслуживающим производством;

- создание условий для экономической заинтересованности заводов-изготовителей в техническом сервисе своей продукции [3].

Для соблюдения указанных принципов возникает необходимость построения такой структуры управления системой технического сервиса, которая позволял бы всем элементам системы эффективно получать и перерабатывать весь требуемый объем данных в разрезе своей деятельности для повышения результативности своей работы, что невозможно обеспечить без применения современных ИТ.

Информационная среда предприятий технического сервиса

Информационная среда предприятий технического сервиса в АПК представляет собой совокупность разнообразных информационных потоков, схема формирования и движения которых показана на рис. 1.1 [3]. Основное содержание информации в этих потоках определяется особенностями функционирования предприятий технического сервиса.

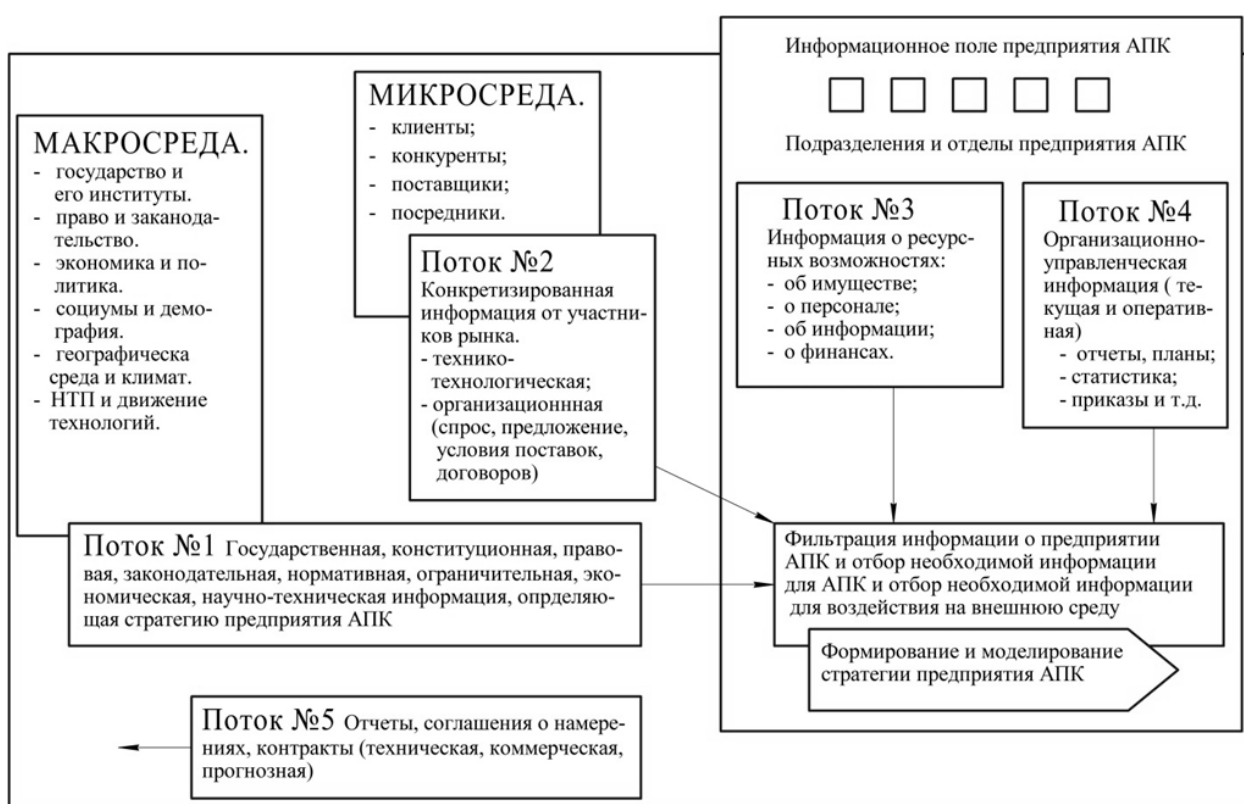


Рис. 1.1. Схема формирования и движения информационных потоков предприятий технического сервиса

Рассмотрим в качестве примера содержание информации, связанной с диагностированием – оценкой технического состояния отдельных деталей или сборочных единиц [3]. Диагностирование направлено на снижение трудоемкости обслуживания машин и эксплуатационных затрат и на повышение качества работ. Это достигается своевременным выявлением неисправностей машин и предотвращением их выходов из строя, сокращением простоев машин из-за технических неисправностей.

Задачи диагностирования – обнаружение причин отказов машин, определение характера и объема работ по текущему ремонту, прогнозирование сроков ремонта и остаточного ресурса машины или их составных частей и др.

Диагностирование проводят на основе технологических карт, в которых указываются его целевое назначение и трудоемкость, перечень оборудования и приборов, порядок выполнения операций, режим работы машины в процессе проверки, значения контролируемых параметров.

В зависимости от характера, объема и периодичности выполнения работ оно делится на непрерывное (ежедневное), общее и поэлементное (углубленное). Непрерывное диагностирование осуществляется перед началом и в процессе эксплуатации машин с помощью встроенных измерительных приборов, датчиков, указателей и т.п.

Диагностирование сборочных единиц включает три стадии: подготовительную, основную и заключительную. На подготовительной стадии выполняют очистку, внешний осмотр, отдельные операции ТО, устанавливают приборы и датчики; на основной стадии устанавливают требуемый режим работы машин и измеряют параметры технического состояния в целом или составных частей; на заключительной стадии сравнивают измеренные параметры с допустимыми значениями и делают заключение о необходимости проведения работ, их объеме для поддержания машин в работоспособном состоянии, прогнозируют остаточный ресурс деталей и сборочных единиц, снимают приборы и датчики.

Диагностирование может быть заявочным и ресурсным. При заявочном диагностировании определяют место, причину и вид дефекта или состояние машины в целом. Ресурсное диагностирование проводят в процессе эксплуатации машин, по результатам которого определяют остаточный ресурс составных частей. Если ресурс достаточен, то продлевают наработку, которая должна быть кратной чередованию видов ТО. Если дальнейшая эксплуатация машины невозможна, то устанавливают вид ремонта.

Ресурсное диагностирование включает проверку состояния отдельных частей машин: кривошипно-шатунной группы двигателя (по давлению масла в главной магистрали смазочной системы), цилиндропоршневой группы (по значению угара масла и количеству газов, прорывающихся в картер), трансмиссии (по суммарному зазору в механизмах, зазору в конечных и главной передачах).

Диагностические параметры выбираются на основании разработанных методов диагностирования с учетом вероятности и стоимости отказа диагностируемых частей машин, стоимости профилактических операций по предупреждению отказа и стоимости диагностирования.

При оптимизации последовательности поиска неисправностей основным критерием является минимальная стоимость контрольно-диагностических операций.

Как указывалось выше, результаты диагностирования заносятся в диагностические карты, которые в дальнейшем служат основным документом для мастеров-наладчиков и слесарей при выполнении ремонта.

Таким образом, при диагностировании требуется проводить анализ больших потоков информации. Поэтому внедрение в процесс диагностирования соответствующего информационного обеспечения позволяет повысить эффективность этого процесса.

При решении задач информатизации предприятий технического сервиса важная роль отводится разработке эффективных методик создания и использования БД [3]. Во время проведения ТОиР специалистам необходима справочно-нормативная и статистическая информация об обслуживаемом объекте. Для быстрого поиска требуемой информации необходимо иметь достаточно полную и удобную в использовании базу данных, которая должна постоянно пополняться результатами проведенных работ, отражаемыми в соответствующих рабочих документах. Каждый документ должен иметь свои реквизиты для удобства поиска документа, которые необходимо сохранять в базе данных вместе с текстом документа. Обычно реквизиты присваиваются документу работником информационного отдела при вводе документа в базу данных. Типичными реквизитами документов предприятия являются: наименование предприятия – автора документа, название вида документа, заголовок к тексту документа – название документа, дата документа, индекс (номер) документа, текст документа, тематика документа.

В информационной системе предприятия технического сервиса особое место занимает подсистема сбора, хранения и первичной обработки текстовой информации, с которой могут работать следующие группы пользователей: специалисты подразделения технического сервиса предприятия; специалисты информационного отдела, осуществляющие ввод входящей информации в подсистему; администратор подсистемы [3].

При работе с данной подсистемой каждая группа пользователей выполняет определенные функции. Специалисты подразделения технического сервиса осуществляют: просмотр тематик, на которые каждый из специалистов имеет права доступа; добавление и изменение документов в этих тематиках, если есть права доступа на выполнение данной задачи; поиск документов по их реквизитам в тематиках, в которые разрешен доступ; устанавливание закладок и ссылок на документы и др. В свою очередь, специалисты информационного отдела просматривают все документы в подсистеме; добавляют в подсистему входящую информацию; изменяют документы в подсистеме; добавляют новые и удаляют ненужные тематики; добавляют новые и удаляют ненужные виды документов; поиск документов по реквизитам и др. Наконец, администратор подсистемы может изменять настройки подсистемы сбора, хранения и первичной обработки текстовой информации, назначать права доступа специалистам подразделения технического сервиса и информационного отдела. Также он может выполнять все функции этих специалистов.

Организация информационного обеспечения технического сервиса

Решение задач по информационному обеспечению работы предприятий технического сервиса требует проведения определенных изменений в их организационной структуре. В частности, признано целесообразным введение в структуру управления инженерной службой предприятия информационно-аналитического отдела, что может позволить руководству и специалистам предприятия эффективно получать и перерабатывать весь необходимый объем данных по вопросам технического сервиса [3].

Создание необходимого информационного обеспечения возможно при использовании современных методов управления, базирующихся на применении компьютерной и организационной техники, а также экономико-математических методов. Компьютеризация производственной и управленческой деятельности становится наиболее эффективной при создании АРМ.

Эффективность использования АРМ повышается при объединении их в единую вычислительную сеть. Функционирование таких сетей целесообразно на основе иерархической структуры управления. На нижнем уровне (на предприятиях) устанавливаются персональные компьютеры, имеющие локальный банк данных и подключаемые к ЛВС районного уровня. В свою очередь, районная сеть АРМ имеет выход на высший уровень управления.

Для выработки общей методологии совершенствования организации технического сервиса перспективно применять системный подход, согласно которому предприятие технического сервиса рассматривается как обособленная структура, состоящая из различных элементов, взаимодействующих между собой и с внешней средой.

На рис. 1.2 представлена организационная система технического сервиса на уровне района, разработанная с учетом современных особенностей, перспектив развития и требований к ТОиР [3]. Эта система состоит из ряда подсистем, совокупность взаимодействия которых на основе информационного обеспечения позволяет в итоге повысить эффективность использования машин и уровень их надежности.

На рис. 1.3 представлена подсистема задач технического сервиса, на решение которых существенное влияние оказывает разработанное информационное обеспечение [3].

Поскольку ТОиР – одна из основных составляющих общей системы технического сервиса, то особое значение имеет внедрение информационного обеспечения в систему ТОиР.

В системе ТОиР можно выделить собственно деятельность, представляющую собой ремонтно-обслуживающее воздействие и управление, и информационное обеспечение этой деятельности. Доля информационного обеспечения во всем ремонтно-обслуживающем воздействии составляет около 15%, в то время как доля информационного обеспечения в процессе принятия решения – не менее 80% [3]. За счет рационального использования информационных потоков можно сократить

время ремонтно-обслуживающего воздействия и процесса принятия решения на 20-25% и при этом повысить качество эксплуатируемой техники.

Информационные службы технического сервиса

По мере развития рыночных отношений у работников АПК возникает потребность в получении информации о новой технике, технологиях, передовом производственном опыте и т.п. При этом в условиях постоянно возрастающих информационных потоков сельхозпроизводители сталкиваются с проблемами поиска, отбора и использования необходимой им информации об инновациях. Для решения этих проблем создаются специальные информационно-консультационные и информационно-маркетинговые службы [7].

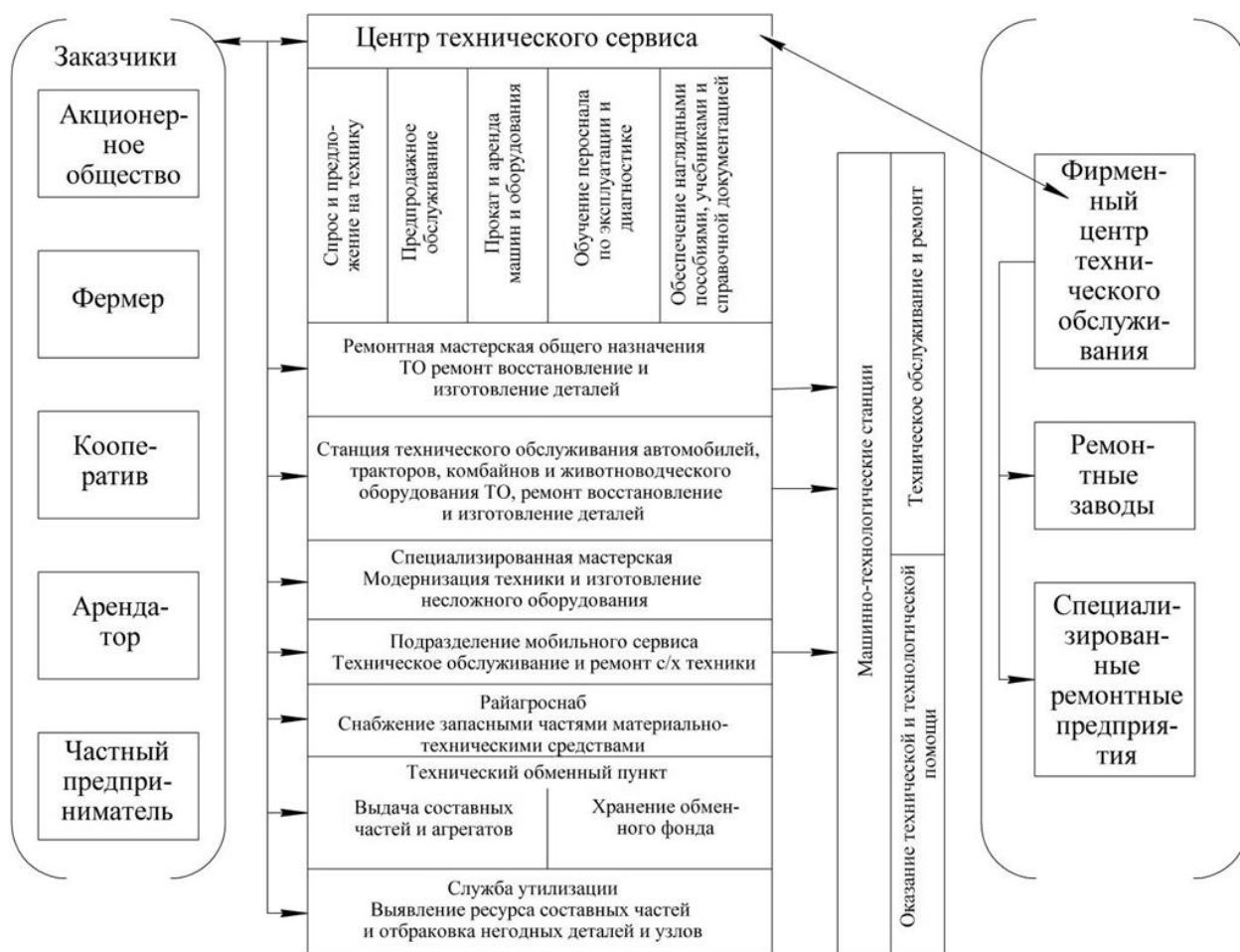


Рис. 1.2. Организационная система технического сервиса районного уровня

Информационные службы технического сервиса

По мере развития рыночных отношений у работников АПК возникает потребность в получении информации о новой технике, технологиях, передовом производственном опыте и т.п. При этом в условиях постоянно возрастающих информационных потоков сельхозпроизводители сталкиваются с проблемами поиска, отбора и использования необходимой им

информации об инновациях. Для решения этих проблем создаются специальные информационно-консультационные и информационно-маркетинговые службы [7].

Задачи информационно-консультационной службы по техническому сервису заключаются в следующем:

- повышение эффективности технического сервиса на основе использования достижений научно-технического прогресса, передового производственного опыта и оказание консультационных услуг по техническим, технологическим и организационно - экономическим вопросам;
- оказание содействия сельхозпроизводителем в освоении новой техники и технологий, передового опыта в техническом сервисе;
- сбор, обработка и доведение до сельхозпроизводителей интересной для них технической информации;
- повышение уровня знаний и практических навыков сельхозпроизводителей и сельского населения по новой сельскохозяйственной технике и технологиям;
- информационное обеспечение органов государственного регулирования технического сервиса.

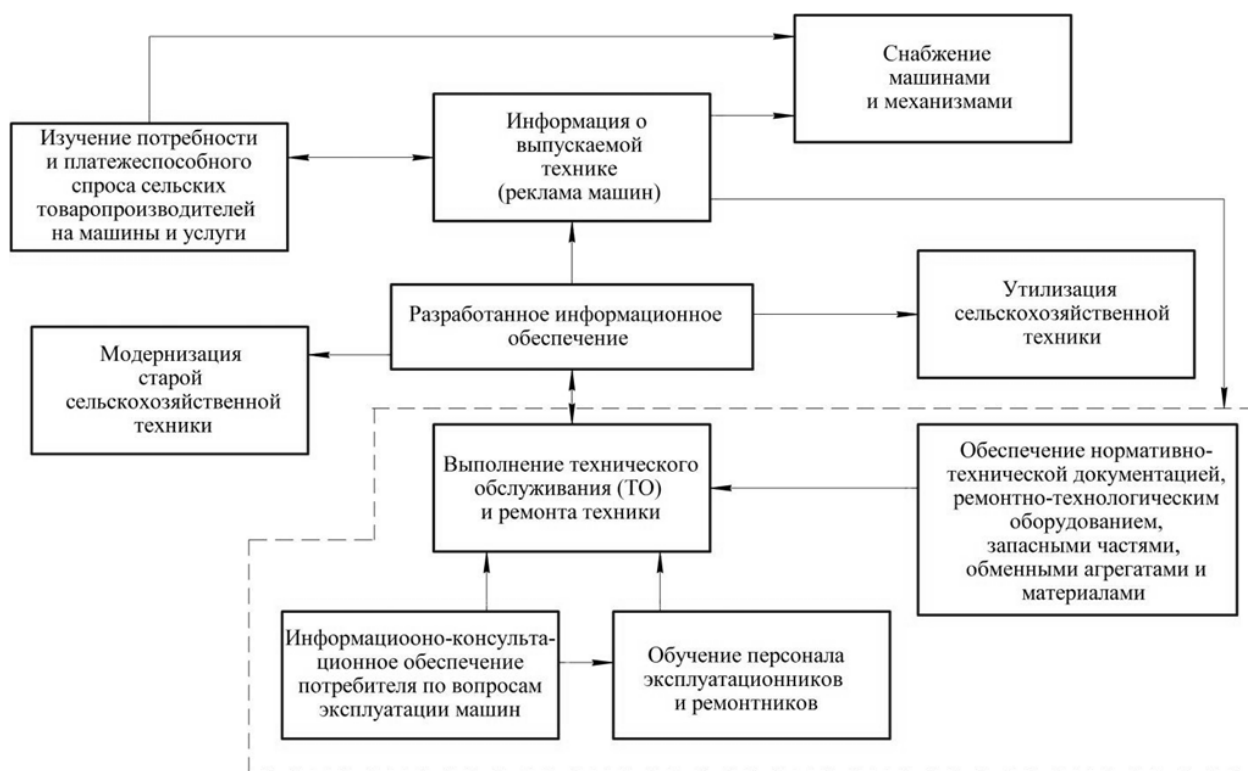


Рис. 1.3. Взаимосвязь информационного обеспечения и задач технического сервиса

На основе анализа опыта организации консультативных служб по вопросам технического сервиса можно сделать вывод и необходимости иметь две группы консультантов: 1) консультанты общего профиля, непосредственно контактирующие с сельхозпроизводителями, и 2)

консультанты, специализирующиеся по различным направлениям технического сервиса сельхозтехники. Консультанты первой группы изучают финансово-экономическое состояние и производственную деятельность хозяйства, вырабатывают рекомендации по улучшению его деятельности. В свою очередь, консультанты второй группы специализируются на отдельных вопросах организации сельскохозяйственного производства, в частности, на вопросах развития системы технического сервиса и повышения эффективности эксплуатации сельхозтехники.

Таким образом, рассмотренные информационно-консультационные службы позволяют решать проблемы интеллектуальной технической поддержки сельхозпроизводителей, руководителей и специалистов предприятий технического сервиса сельхозтехники, поднять их профессиональный уровень и на этой основе повысить эффективность использования сельхозтехники.

Наряду с информационно-консультационными службами в системе технического сервиса сельхозтехники создаются и эффективно функционируют информационно-маркетинговые службы, учредителями которых являются заводы-изготовители, дилерские предприятия и др.

Маркетинг в АПК отличается от других видов маркетинга, что связано с такими особенностями сельского хозяйства, как зависимость его результативности от природных условий, роль и значимость товара, разнообразие форм собственности, несовпадение рабочего периода и периода производства, сезонность производства и получения продуктов и т.д.

В сфере АПК имеется два вида маркетинга:

- маркетинг средств производства и услуг, участниками которого являются заводы-изготовители, фирмы-посредники, дилерские центры, предприятия технические сервисы, а также предприятия-потребители машин, оборудования, ГСМ и т.д.;

- маркетинг сельхозпродукции, в котором участвуют сельхозпроизводители, заготовительные, перерабатывающие и торговые предприятия, а также потребители сельхозпродукции.

В задачи маркетинга в АПК входит определение спроса на сельхозтехнику с учетом ее вида, количества, технико-экономических показателей; оценка качества ТООиР; изучение платежеспособности потребителей.

Для повышения эффективности деятельности предприятий технического сервиса могут быть реализованы следующие маркетинговые подходы по управлению спросом на оказываемые ими производственные услуги:

а) сезонное изменение профиля и поля деятельности отдельных подразделений предприятия;

б) применение дифференцированных и гибких цен на услуги технического сервиса, что позволяет сместить определенную часть растущего спроса на них с середины периода полевых работ на его начало или конец;

в) совмещение профессий и функций производственно-технического и инженерного персонала предприятия для выполнения наибольшего объема услуг в периоды максимального спроса на них;

г) активизация мероприятий, направленных на повышение спроса на производственные услуги;

д) формирование нормальной конкурентной среды.

Таким образом, информационно-маркетинговые службы способствуют повышению эффективности технического сервиса сельхозтехники.

Программно-информационная поддержка принятия решений по планированию технического сервиса

Известны различные системы информационной поддержки технического сервиса, однако большинство их не обладает достаточной достоверностью при сравнении с реальными планами работ по ТОиР. Они являются преимущественно системами программного сопровождения процессов ТОиР, в них реализовано планирование либо на основе регламентных работ, либо на метрических методах поддержки принятия решений и поэтому не подходят для решения задач качественной оценки постановки оборудования на предупредительное обслуживание [8].

Для устранения указанных недостатков разработана система информационной поддержки принятия решений при планировании ТОиР, основанная на многокритериальном планировании, которое наряду с экспертным формированием целевых постановок высококвалифицированными специалистами, способно к объективному и формализованному решению задач, т.е. установлению очередности постановки однородных групп оборудования на ТОиР по заранее принятым критериям оценки состояния оборудования [8]. Критерии включают конструктивные и эксплуатационные показатели оборудования и сформированы на основании обобщенных экспертных мнений. Построение очередей ТОиР ведется на основе предварительного установления порядка указанных показателей для однородных объектов. С учетом принятых критериев разработана информационная модель паспорта оборудования, учитывающая мнения экспертов с использованием балльных оценок. Кроме того, с использованием информационной модели паспорта оборудования разработано математическое и алгоритмическое обеспечение системы принятия решений по выводу оборудования на ТОиР.

Информационная поддержка определения очередности ТОиР осуществляется с помощью программной системы, для которой входными данными и соответствующими источниками внешних данных являются:

1) информация по обслуживаемому оборудованию: его тип, производственное назначение, технические характеристики, нормативные данные, время ввода в эксплуатацию и наработку;

2) данные по организационной структуре эксплуатирующего предприятия, по имеющимся трудовым и техническим ресурсам, позволяющие оперативно решать вопросы по загрузке ремонтных служб;

3) экспертные оценки ремонтпригодности оборудования, на основании которых проводится сравнение критериев с последующим формированием очереди на ТОиР.

На основании входных данных программная система формирует паспорта оборудования, содержащие информацию по идентификации (наименование, инвентарный и заводской номера и т.п.), техническим характеристикам и значениям его коэффициентов ремонтпригодности, задаваемым экспертами. Выходными данными является очередь на ТОиР, сформированная на основании имеющихся паспортов оборудования и отобранных критериев ремонтпригодности, необходимых для оценки.

Разработанная программная система готовит экономико-технические отчеты и заявки, применяемые предприятием для последующего информационного сопровождения ремонтных работ. Данные оцениваются сотрудниками предприятия, анализирующих результаты расчета и формирующих график плановых работ по ТОиР на основании данных полученных системой.

Программно-информационная поддержка технического сервиса

Повышению эффективности работ по ТОиР способствует их автоматизация, для осуществления которой предложена методика [9], призванная решать следующие задачи:

- выделение объекта ТОиР;
- выделение направлений ТОиР;
- выявление субъектов ТОиР, должностных обязанностей и функций служб ТОиР;
- исследование документации по ТОиР;
- исследования состава оборудования и объектов ТОиР;
- выявление видов и состава работ по ТОиР;
- описание процессов ТОиР.

Основными показателями системы ТОиР являются:

- объекты ТОиР;
- структура работ по ТОиР;
- сроки выполнения работ по ТОиР;
- затраты на производство работ по ТОиР;
- объем платежных средств необходимых для производства работ по ТОиР.

В системе автоматизации ТОиР предусматривается следующий набор функций программно-информационной поддержки:

- ведение информации о ремонтных службах и объектах ТОиР в электронном виде (паспорт оборудования, история работы с оборудованием, технологическая и организационная структура, информация о материальных ресурсах, информация о сотрудниках);
- ведение электронного журнала проведенных работ по ТОиР (информация о составе проведенных плановых и внеплановых работ по ТОиР, затраченных ресурсах и трудозатратах);
- автоматизированное составление планов проведения работ по ТОиР в электронном виде (добавление в электронный план работ, ресурсов и трудозатрат, автоматизация процесса составления планов с помощью заготовок-шаблонов работ, формирование документов "план работ");

- автоматизированный расчет стоимости работ по ТОиР [9].

Предложенная методика программно-информационной поддержки технического сервиса может быть использована ремонтными предприятиями при проведении ТОиР.

Принципы сбора и обработки информации о надежности машин

Надежность машины – это ее свойство сохранять во времени в установленных пределах значения параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции при определенных условиях применения, технического обслуживания и ремонта, хранения и транспортирования. Надежность машин закладывается при их проектировании, обеспечивается в процессе изготовления и реализуется при эксплуатации.

Надежность является основным показателем качества машин, поэтому необходимо уделять повышенное внимание вопросам сбора и обработки информации о надежности (СОИН) машин.

Ниже рассмотрены принципы СОИН машин, изложенные в работе [10] применительно к автомобилям.

СОИН проводят для получения данных, необходимых при совершенствовании конструкции автомобилей, технологии их изготовления, правил и методов эксплуатации и ремонта, контроля показателей надежности.

Задачами СОИН являются: выявление конструктивных и технологических недостатков изделия, снижающих его надежность, а также недостатков в организации эксплуатации и ремонта; установление элементов и составных частей, лимитирующих надежность изделия; уточнение критериев отказов, предельных состояний и норм расхода запчастей; оценка эффективности мероприятий по повышению надежности изделий.

СОИН проводят в соответствии с требованиями отраслевой нормативно-технической документации (НТД), которая устанавливает: структуру системы сбора и обработки информации в данной отрасли; методы планирования наблюдений и обработки информации, определение значений показателей (объективность собранной информации), надежность сбора информации; требования к программам наблюдений по видам изделий; техническое обеспечение сбора и обработки информации; порядок разработки мероприятий, оценки эффективности использования информации на предприятиях отрасли; правила передачи и обмена информации; способы автоматизации работ.

СОИН организуют в рамках одной отрасли или между несколькими отраслями. Для организации СОИН министерства (ведомства) назначают головные организации, перед которыми стоят следующие основные задачи: разработка структуры СОИН; разработка НТД по сбору и обработке информации в соответствии с установленными требованиями; научно-методическое руководство при решении задач планирования наблюдений и

обработки информации; контроль за внедрением системы; ведение банка данных о надежности изделий.

При организации СОИН в рамках отрасли головная организация разрабатывает проект приказа по министерству (ведомству), которым определяется состав базовых организаций (по видам техники), ответственные за сбор и обработку информации по данному виду техники, а также правовая и юридическая ответственность всех звеньев системы. Информацию собирают и обрабатывают с участием организаций-разработчиков изделий, предприятий-изготовителей изделий, эксплуатирующих и ремонтных организаций.

Организации-разработчики изделий проводят: сбор и обработку информации о надежности опытных (экспериментальных) образцов изделий; анализ причин отказов и предельных состояний изделий; обработку информации о надежности изделий, поступающей от ремонтных, эксплуатирующих организаций и предприятий-изготовителей; формирование массивов данных итоговой информации. Итоговая информация периодически направляется в головную организацию по сбору и обработке информации в виде итоговых документов (отчетов, сводных форм итоговой информации и т.д.), содержащих обобщенные данные о надежности изделий за отчетный период.

Предприятия-изготовители изделий проводят сбор и обработку первичной информации о надежности серийно изготавливаемой продукции и анализ причин отказов изделий в период гарантийного срока. Эксплуатирующие и ремонтные организации осуществляют сбор первичной информации о надежности изделий (после гарантийного срока эксплуатации). Типовая схема СОИН показана на рис. 1.4 [10].

Программы наблюдений для конкретных изделий составляются в соответствии с техническим заданием на проведение сбора и обработки информации. Программа наблюдений определяет: цели и задачи сбора информации; перечень наблюдаемых изделий; число изделий; продолжительность наблюдаемых изделий; номенклатуру показателей, по которым собирают информацию; периодичность обследований и сроки проведения работ; количество и территориальное расположение мест сбора информации; требования к методам сбора и обработки информации, а также к методам учета воздействий внешних возмущающих факторов и режимов эксплуатации; периодичность обобщения первичной информации, подготовки итоговых данных и рассылки их заинтересованным организациям и предприятиям; периодичность и формы отчетности; перечень предприятий и организаций, от которых поступает информация и в которые следует направлять собранные и обработанные данные.

Периодичность обследований зависит от решаемой задачи и должна предотвращать потери информации. Количество и территориальное размещение мест сбора информации устанавливаются с учетом типа, назначения и объема производства изделий; условий и режима эксплуатации изделий; количества изделий в эксплуатационном предприятии.



Рис. 1.4. Типовая схема организации сбора и обработки информации о надежности автомобилей

1 – первичная информация о надежности изделий в эксплуатации; 2 – обработанная информация для разработки мероприятий по повышению надежности; 3 – обратная информационная связь.

Сбор информации должен предусматривать проведение постоянных, периодических и (или) разовых наблюдений за изделиями во время эксплуатации. Его осуществляют на основании: данных учета, проводимого эксплуатационными и ремонтными предприятиями; результатов наблюдений за изделиями в эксплуатации; применения опросных листов (экспертных методов).

В ходе сбора информации обследуют техническое состояние изделия на месте его эксплуатации (в т. ч. ремонта), осматривают и при необходимости исследуют отказавшие составные части, изучают и анализируют эксплуатационные и ремонтные документы, акты расследования аварий и рекламаций. Результаты обследования отражают в документах первичной информации о надежности, таких как: донесения об отказах, журналы технического состояния, учета простоев оборудования, технического обслуживания и ремонта и т.д. Дополнительно используются научно-технические отчеты по результатам анализа технического состояния и надежности изделий, которые находятся в эксплуатации и поступают в капитальный ремонт на ремонтные предприятия, а также материалы (протоколы, отчеты) о результатах эксплуатационных испытаний в испытательных центрах. Выбор эксплуатационных предприятий проводят исходя из того, что они должны обеспечивать получение данных для типичных условий эксплуатации, предусмотренных НТД.

Первичная информация о надежности изделия включает: сведения о месте и условиях эксплуатации; общие сведения об изделии; характеристику отказов. Сведения о месте и условиях эксплуатации регистрируют один раз в начале наблюдений и при изменении отдельных характеристик уточняют в процессе наблюдений. В этих сведениях указывают: название и адрес предприятия; внешние условия (дорожные покрытия, температурные условия, влажность среды, химическую активность и т.д.); условия использования изделия (загрузку, непрерывность или цикличность работы и т.п.); характеристику ремонтной и обслуживающей базы, системы технического обслуживания и ремонта; условия хранения изделий.

Общие сведения об изделии включают: марку (модель) изделия; заводской номер; год выпуска и проведения последнего ремонта; дату и наработку на начало наблюдений и по окончании наблюдений; причину прекращения наблюдений; конструктивные особенности изделия.

Характеристика отказов содержит следующую информацию: дату возникновения отказов; наработку изделия, при которой произошёл отказ; наработку до отказа составной части; наименование отказавшей составной части, ее заводской номер и номер по каталогу или по ведомости комплектации, место установки и порядковый номер (если таких составных частей в изделии несколько); внешнее проявление (признак) отказа; причину возникновения отказа; способ устранения, число и наименование заменённых составных частей; продолжительность и трудоёмкость поиска и устранения отказа; условия, при которых произошёл отказ; фамилию и должность лица, заполнившего документ первичной информации, дату.

Формы сообщений о надежности должны обеспечить возможность кодирования всех данных для машинной обработки, они подразделяются на первичные, формы-накопители информации и формы записи результатов количественного и качественного анализа надёжности.

Обработка информации включает: классификацию и кодирование исходных данных; контроль полноты, достоверности и однородности информации; внесение уточнений в исходные данные; копирование исходной информации; перевод содержания исходной информации на машинные носители; оценку показателей надежности; классификацию причин отказов и предельных состояний по видам, связанным с изготовлением, ремонтом и эксплуатацией, и их анализ; подготовку исходных данных для разработки мероприятий, направленных на выявление недостатков и повышение надежности изделий в эксплуатации.

В ходе анализа причин отказов и предельных состояний проводят: систематизацию первичной информации по принятым признакам (условиям эксплуатации, наработке, виду отказавших составных частей и т.п.); выявление составных частей, лимитирующих надежность изделия; установление причин отказов; оценку эффективности конструкторско-технологических и (или) организационных мероприятий; определение законов распределения и оценку показателей надежности по статистическим данным; обработку информации о расходе запасных частей; выявление и

систематизацию причин и продолжительности простоев изделий; сопоставление полученных данных с нормативами и данными по изделиям-аналогам; анализ и систематизацию данных об отказах комплектующих составных частей; выявление случаев нарушения требований эксплуатационной документации; разработку рекомендаций по устранению выявленных недостатков и дальнейшему повышению надежности изделий.

Информация о надежности автомобилей должна удовлетворять следующим требованиям: полнота информации, достоверность информации, своевременность информации, непрерывность информации, простота учетных форм для сбора информации. Также следует отмечать режимы работы автомобиля и условия его эксплуатации, учитывая квалификацию обслуживающего персонала, условия хранения, транспортировки и эксплуатации автомобилей, качество применяемых эксплуатационных материалов и т.п.

Статистическую информацию о надежности изделий можно получить и другими путями: посещением мест эксплуатации изделий инженерами-испытателями предприятий-изготовителей; рассылкой на места эксплуатации листов, карт и иной документации, которую заполняют эксплуатационники и высылают предприятию-изготовителю; проведением ресурсных испытаний и др.

1.2. Информационные системы технического сервиса

1.2.1. Технический сервис тракторов

Практика показывает, что время простоев тракторов, вызванное техническими причинами, составляет 25-30% от общего рабочего времени, вследствие чего удлиняются сроки выполнения полевых работ, увеличиваются потери сельскохозяйственной продукции, снижаются показатели эффективности производства [11]. Один из путей сокращения таких простоев – поддержание тракторов в работоспособном состоянии.

Техническое состояние тракторов во многом определяется качеством технического обслуживания (ТО). При выполнении ТО используются довольно сложные технические средства, разнообразные инструменты и материалы, сами же операции ТО характеризуются высокой сложностью и информационной насыщенностью. Все это требует от исполнителей работ по ТО умения оперировать большими объемами постоянно изменяющейся информации.

Система ТО состоит из совокупности средств, документации по организации и выполнению операций технического обслуживания и исполнителей. К документам, используемым при проведении ТО, относятся «Руководство по эксплуатации», «Технологические карты технического обслуживания», «Технологические карты технического диагностирования» и др. Затраты времени при проведении ТО, связанные с получением задания,

инструктажем и ознакомлением с технической документацией, составляют 25% от общего времени ТО.

Обычно используемая нормативно-техническая документация по ТО тракторов разрабатывалась без учета возможностей современных информационных технологий. В работе [11] предложена система информационного обеспечения ТО тракторов (СИОТОТ). Комплекс информационных компонентов, а также программно-алгоритмические средства этой системы обеспечивают повышение качества ТО тракторов, сокращение времени поиска и обработки необходимой информации, снижают трудоемкость и затраты на ТО.

Краткое описание этой системы, а также порядок ее разработки представлены ниже.

В качестве основных исходных предпосылок к разработке СИОТОТ были определены следующие:

- 1) повышение доступности имеющихся разработок по проведению ТО;
- 2) систематизация информации, связанной с ТО, интеграция всех необходимых информационных информации в единую систему;
- 3) обеспечение возможности регулярной корректировки информационных компонентов; многоуровневое представление информации с описанием операций ТО;
- 4) взаимная увязка выполнения операций по техническому диагностированию (ТД) и ТО;
- 5) реализация программно-алгоритмических средств и информационных компонентов в прогнозировании остаточных ресурсов основных узлов и агрегатов трактора;
- 6) учет и автоматизированная фиксация индивидуальных параметров технического состояния тракторов;
- 7) учет оснащенности пункта ТО необходимыми техническими средствами;
- 8) обеспечение пункта ТО необходимой нормативно-технической информацией;
- 9) актуализация сведений о предприятиях, располагающих ресурсами для проведения ТО;
- 10) обеспечение простоты работы с информацией, имеющейся в системе.

К СИОТОТ в ходе ее разработки были установлены следующие требования:

- 1) базирование на использовании современных информационных технологий;
- 2) структуризация, систематизация и интеграция всех необходимых компонентов нормативно-технической документации по ТО;
- 3) осуществление многоуровневого представления технологий ТО;
- 4) создание программно-алгоритмических и информационных средств для прогнозирования остаточного ресурса узлов и агрегатов трактора и расчета диагностируемых параметров;
- 5) учет хронологии ТО тракторов и выдача оперативных сводок ТО;

б) обеспечение возможности оперативного пополнения информационных компонентов системы уточненной или новой документацией и знаниями;

7) обеспечение возможности маневрирования по системе с использованием перекрестных ссылок.

Для целостного и формализованного описания процессов ТО была разработана информационная модель системы технического обслуживания тракторов (СТОТ), позволяющая определить общую структуру СИОТТОТ.

СТОТ рассматривается с учетом реального выполнения операций ТО в рамках известных нормативно-технических требований. Поэтому состав и структура информационной модели СТОТ во многом определяется рассматриваемым уровнем ее функционирования. В качестве такого уровня выбрано в общем случае определенное территориальное образование (регион), а затем представлены возможные пути перехода к частным случаям.

Вначале информационная модель СТОТ представляется в виде совокупности следующих двух основных объектов, непосредственно участвующих в процессе ТО:

$$ИМ_{СТОТ} = \{СП, МОХ\}, \quad (1.1)$$

где *СП* – сервисное предприятие, применительно к которому рассматривается СТОТ; *МОХ* – совокупность (множество) обслуживаемых хозяйств, трактора которых обслуживаются данным СП.

С учетом в модели множества всех обслуживаемых хозяйств региона (*МОХР*), множества всех сервисных предприятий региона (*МСПР*) и множества всех имеющихся пунктов технического обслуживания (*ПТО*) (*МПТО*) выражение (1.1) записывается в следующем, более общем виде:

$$ИМ_{СТОТ} = \{МСПР, МПТО, МОХР\}. \quad (1.2)$$

Выражение (1.2) рассматривается в качестве базового варианта информационной модели СТОТ, позволяющего решать вопросы организации ТО в регионе. В этом выражении в целях раскрытия структуры информационных компонентов СТОТ учитывается следующее:

1. При проведении операций ТД и ТО принято оперировать технологическими картами, в которых приводятся правила выполнения операций, а также необходимое оборудование, приспособления, слесарно-монтажный инструмент, контрольно-измерительные приборы и расходные материалы с нормативами их потребности.

2. Для удобства оперирования технологические карты группируются по видам ТО, определяемым условиями ТО, включая ежесменное ТО (ЕТО), первое ТО (ТО-1), второе ТО (ТО-2), третье ТО (ТО-3), сезонное ТО (СТО) и ТО при хранении (ТОХ).

Кроме операций ТД и ТО выполняются определенные расчетные операции, например, расчет остаточного ресурса трактора по параметрам его технического состояния, установленным в результате диагностирования. Отсюда возникает необходимость ввода в информационную модель такого параметра, как регистр расчетных задач (РРЗ).

С учетом указанных компонентов выражение (1.2) записывается в следующем виде:

$$ИМ_{стот} = \left\{ \begin{array}{l} МСПР, МПТО, МОХР, РМТ, КАТК, РНО, РНП, РСМИ, РКИП, РРМ, \\ НРМ, НЗВ, КСИР, РРЗ \end{array} \right\}, \quad (1.3)$$

где *РМТ* – регистр марок обслуживаемых тракторов; *КАТК* – комплекты альбомов технологических карт ТО (для каждой марки трактора свой альбом); *РНО* – регистры (ведомости) необходимого оборудования; *РНП* – регистры необходимых приспособлений; *РСМИ* – регистры слесарно-монтажных инструментов; *РКИП* – регистры контрольно-измерительных приборов; *РРМ* – регистры расходных материалов и *НРМ* – нормативы их затрат; *НЗВ* – нормативы затрат времени на выполнение операций ТО; *КСИР* – квалификационный состав исполнителей работ.

Для разработки программно-алгоритмических и информационных средств прогнозирования остаточного ресурса в качестве базового был взят известный номограммный вариант прогнозирования параметров узлов и агрегатов трактора при известной наработке его от начала эксплуатации.

Наработка трактора $t_{П}$ от начала эксплуатации до достижения рассматриваемым параметром допустимого значения $П_{П}$ определяется по формуле

$$t_{П} = (\Delta П / v_e + t_{Д}^{\alpha})^{1/\alpha}, \quad (1.4)$$

где α – показатель степени, учитывающий характер изменения параметра от наработки; v_e – скорость изменения параметра; $\Delta П$ – разница между величинами $П_{П}$ и $П_{Д}$ (значения параметра предельное и во время диагностирования) при ТО параметра, который может быть использован трактором от момента диагностирования $t_{Д}$ до момента $t_{П}$. При этом также учитываются закономерности изменения каждого параметра соответственно через «коэффициенты кривизны α ».

Заключение по результатам расчета остаточного ресурса $t_{ост}$ по параметру делается на основе его сравнения с периодичностью ТО.

В рамках разработки СИОТОГ сформирована информационная база, в качестве составляющих которой выступают модули информации в виде следующих таблиц: «Свод учитываемых тракторов», «Сведения об обслуживании тракторов», «Справочник параметров состояния агрегатов и

узлов трактора», «Данные по состоянию обслуживаемого трактора», «Заключения по результатам диагностирования».

СИОТОН содержит следующие информационные блоки:

1. Типичные пункты ТО с описанием их характеристик.
2. Операции ТО рассматриваемых моделей в соответствии с имеющейся системой ТО, с описанием приемов выполнения самих операций и с требованиями к их выполнению.
3. Оборудование и оснастка, их устройство, технические характеристики и особенности применения при выполнении ТО.
4. Инструменты и приборы, их характеристики и особенности применения при выполнении ТО.
5. Топливо-смазочные и расходные материалы, их характеристики и особенности применения при выполнении ТО.
6. Нормы расхода материалов и ресурсов, необходимых для выполнения ТО.
7. Описание конструкций узлов и агрегатов обслуживаемых тракторов.
8. Хронология состояния обслуживаемых тракторов в моменты их поступления на ТО.
9. Прогнозирование остаточного ресурса основных узлов и агрегатов трактора.
10. Сведения о поставщиках оборудования и оснастки, расходных материалов, сервисных услуг.

Общая структура информационной системы показана на рис. 1.5.

Связующим элементом системы является головной блок. Каждый блок, входящий в систему, может быть использован также отдельно.

Информационные компоненты СИОТОН разделяются на два вида: применимые в условиях любого хозяйства и характерные только для конкретного хозяйства.

При разработке структуры СИОТОН предусматривалось решение следующих задач:

1. осуществить формирование блоков СИОТОН применительно к тракторам типа К-700;
2. систематизировать операции ТО в совокупности с операциями ТД и разработать единый технологический процесс технического обслуживания тракторов;
3. разработать форму записей хронологии данных по ТД и ТО;
4. сформировать информационно-справочные материалы для прогнозирования остаточного ресурса дизеля тракторов;
5. разработать программно-алгоритмические и информационные средства для прогнозирования остаточного ресурса основных узлов и агрегатов тракторов;
6. сформировать оперативную информацию применительно к условиям определенного хозяйства;
7. провести опытную эксплуатацию СИОТОН в производственных условиях.

3. расшифровка аббревиатур.
4. корректировка терминологии.
5. обеспечение возможности получения необходимой информации при проведении ТО на любом его этапе.
6. исключение дублирующих операций ТО и объединение одинаковых приемов их выполнения.
7. обеспечение полноты описаний операций ТО.
8. компоновка в таблицы перечня операций по видам ТО по рассматриваемым маркам тракторов.
9. конкретизация диагностируемых данных применительно к рассматриваемым моделям тракторов.
10. конкретизация выполнения операций ТО применительно к рассматриваемым моделям тракторов.

11. формирование обратной связи: после получения необходимой информации обеспечение ее возврата в начало или в текущую точку системы. Основное внимание уделено многоуровневому представлению информации в блоках. Предусмотрено маневрирование по информации каждого блока по схеме: вид ТО; операции ТО; операции по ТД; технологические карты по ТД и ТО. Создана взаимосвязь с блоками «Инструменты и приборы», «Оборудование и оснастка», «Топливо-смазочные и расходные материалы», «Обслуживаемые тракторы».

Для формирования информационных средств и удобства организации вычислительных работ в блоке «Прогнозирование остаточного ресурса» в компьютере по каждой марке трактора заводится отдельный файл. Далее в определенной последовательности выполняются операции по оценке остаточного ресурса трактора и его учитываемых параметров.

В качестве программной среды при разработке системы информационного обеспечения технического обслуживания тракторов выбраны инструментари, имеющиеся в пакете MS Office версии 2003, которые применимы в последующих версиях.

Ниже представлены результаты формирования, производственных испытаний и оценки эффективности СИОТОТ применительно к конкретному сельскохозяйственному предприятию, для которого были проанализированы парк техники; общие сведения об обслуживаемых тракторах; общая характеристика, оборудование и оснастка пункта ТО.

Блоки «Пункты технического обслуживания», «Оборудование и оснастка», «Инструменты и приборы», «Обслуживаемые тракторы» представлена на трех уровнях: в качестве первого уровня выступает перечень групп объектов, второго – наименования объектов, третьего – описания самих объектов. В свою очередь, блоки «Топливо-смазочные и расходные материалы» и «Нормы расхода и затрат ресурсов» представлены на двух уровнях. Блок «Инструменты и приборы» содержит подробное описание и технические характеристики приборов и инструментов, предусмотренных к использованию для выполнения операций по ТО.

Информационная структура блока показана на рис. 1.6.

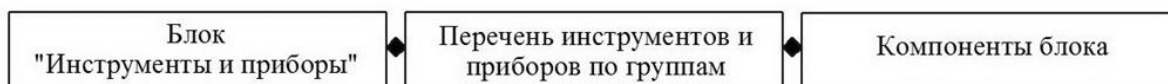


Рис. 1.6. Информационная структура блока «Инструменты и приборы»

Первый уровень информации – наименования по группам, второй – перечень всех приборов и инструментов по группам. По каждой группе приводятся их марки или модели с соответствующими кодами. Переход к просмотру информации об интересующем приборе или инструменте осуществляется с помощью кода и гиперссылки. Третий уровень – изображение прибора или инструмента с необходимыми сечениями и разрезами, наименования всех составных частей; здесь же описывается принцип его работы и дается подробная инструкция по его применению, а также техническая характеристика компонента.

Аналогично сформированы другие блоки, указанные выше.

Блок «Операции технического обслуживания» состоит из информационных компонентов, характеризующих полный набор операций ТД и ТО. В данном блоке все операции представлены в виде единого технологического процесса. Многоуровневая информационная структура блока показана на рис. 1.7.

Первый уровень блока – общий информационный, здесь использованы общепринятые условные обозначения видов обслуживания: ТО-1, ТО-2 и др. Второй уровень состоит из перечня операций ТД и ТО. Третий уровень содержит операции ТД и ТО и требования к их выполнению, здесь же указываются номера технологических карт ТД и ТО. Четвертый уровень содержит технологические карты ТД и ТО, в которых подробно описывается последовательность выполнения операций.

Блок «Прогнозирование остаточного ресурса» представлен в виде программно-алгоритмических и информационных средств, которые позволяют заменить процедуру использования номограмм компьютерными средствами в среде электронной таблицы. Для решения требуемых задач используются нормативно-справочная информация, оперативная информация и программно-алгоритмические средства.

Основой для решения задач является форма «Свод учитываемых тракторов». С помощью гиперссылок колонки «Переход к книгам тракторов» осуществляется переход к книгам, содержащим данные по учитываемым тракторам с группировкой их по маркам.

Информационная структура решения задачи по оценке остаточного ресурса параметров трактора показана на рис. 1.8.

Действия пользователя сводятся к следующему:

- задание даты обслуживания, марки, номера трактора и его наработки;
- распечатка формы с данными для записи результатов ТД;
- ввод результатов ТД в компьютер;
- получение и распечатка заключения по результатам прогнозирования.

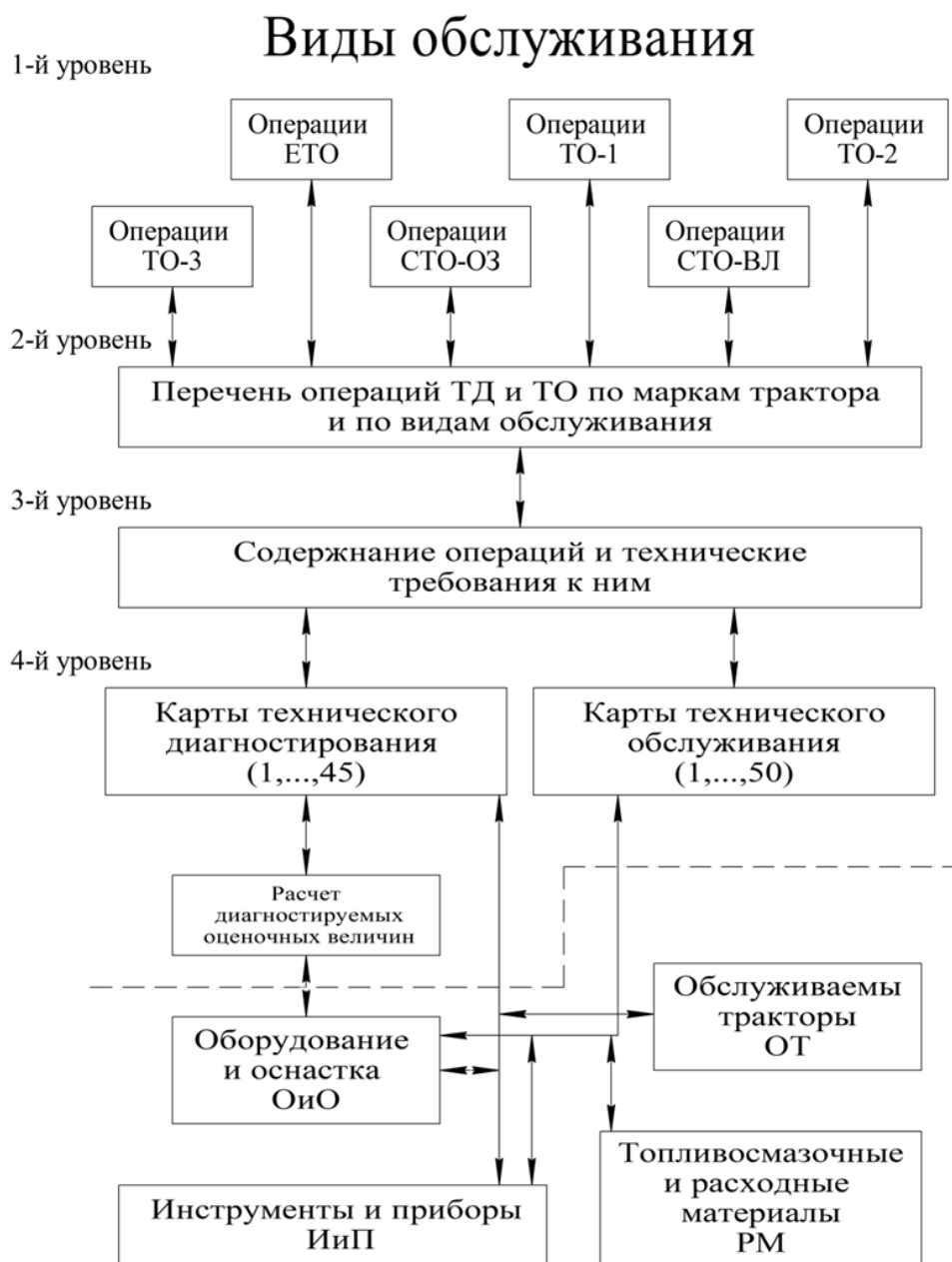


Рис. 1.7. Информационная структура блока «Операции технического обслуживания»

На каждый трактор заводится «карта», в которой зафиксировано его состояние в момент поступления на ТО. Такая информация может быть использована при анализе причин возникновения неисправностей тракторов, а также в целях уточнения содержания работ по ТО.

Проверка работоспособности СИОТОТ показала, что она в целом выполняет все основные функции, предусмотренные при ее разработке.

Специалист, войдя в систему СИОТОТ, получает для определенного вида ТО информацию по операциям ТО и их последовательности, по применяемому оборудованию, инструменту, приборам, а затем на ее основе выполняет ТО, с последующим занесением в «карту» трактора сведений о ТО. Далее выполняется процедура оценки остаточного ресурса узлов или агрегатов дизеля трактора.



Рис. 1.8. Информационная структура задачи

Использование информации на рабочих местах позволяет упорядочить технологический процесс ТО, избежать пропуска отдельных операций и соблюдать технические требования к выполнению операций, что является залогом поддержания тракторов в постоянной готовности к выполнению работ. Технологический процесс ТО с применением СИОТОТ, представлен в виде блок-схемы на рис. 1.9.

Испытания СИОТОТ показали, что ее применение для тракторов типа К-700 позволяет сэкономить времени на 14,3 часа на один трактор и снизить трудоемкость операций ТО в 1,2 раза.

1.2.2. Технический сервис грузовых автомобилей

Одной из главных составляющих системы технической эксплуатации машин, в т.ч. грузовых автомобилей, является нормативно-техническая документация (НТД). Обычно она распределена по многочисленным источникам. Кроме того, определенные компоненты НТД, в частности, по техническому обслуживанию (ТО) и техническому диагностированию (ТД) грузовых автомобилей (ГА), постоянно развиваются и корректируются.

Как следствие, работа с такой документацией, включая подборку и систематизацию ее обновленных компонентов, представляет значительные сложности, из-за чего приходится тратить много времени на работу с НТД, а также нередко пользоваться устаревшими или неполными комплектами НТД,



Рис 1.9. Блок-схема использования СИОТОТ в технологическом процессе ТО тракторов

что может привести к снижению качества ТО. Одним из эффективных путей устранения указанных проблем и совершенствования организации ТО грузовых автомобилей (ТОГА) является применение компьютерной техники для работы с НТД в процессе непосредственного выполнения операций ТО.

Выполнение ТОГА может быть усовершенствовано благодаря применению технологических карт (ТК). Однако ТК не получили широкого практического применения, в основном они разработаны лишь для некоторых моделей автомобилей. В процессе ТОГА весьма эффективно выполнять операции ТД. Однако до последнего времени они не получили тесной взаимосвязи с операциями ТО. Еще одно направление совершенствования ТОГА – применение метода прогнозирования параметров состояния агрегатов и узлов ГА по результатам ТД. Однако этот метод также не нашел широкого применения из-за большой трудоемкости и сложности вычислений по прогнозированию.

В работе [12] предложены пути совершенствования организации ТОГА на основе применения системы интегрированной электронной нормативно-технической полнокомплектной документации и индивидуализированного прогнозирования параметров технического состояния узлов и агрегатов автомобиля (СИЭДиП). Краткое описание этой системы, а также порядок ее разработки представлены ниже.

В качестве основных требований к СИЭДиИП в ходе ее разработки были определены следующие:

1. наличие полной, корректной информации по всем операциям ТО и ТК проведения этих операций;

2. наличие расчетно-информационного комплекса для прогнозирования остаточного ресурса машин по параметрам их узлов и агрегатов.

3. наличие возможностей: отображения текстовых и графических документов; работы с блоками системы; просмотра сформированного материала всех файлов и выборочно; приспособления ИС к работе с применением современных программно- аппаратных средств;

4. наличие простого, интуитивно понятного интерфейса для различных уровней квалификации пользователей и возможности оперативного доступа к информационной базе (ИБ);

5. приспособленность к адаптации и дальнейшему развитию.

Для систематизации содержания нормативно-технических (НТ) компонентов СИЭДиИП ТОГА была сформирована ее информационная модель (ИМ), в которой процессы ТО и ТД грузовых автомобилей рассматриваются в комплексе и в виде совокупности: пункт технического обслуживания (ПТО), обслуживаемая машина, виды ТО и ТД, соответствующие им операции ТО, эксплуатационный материал, необходимые запчасти, инструменты, приборы, приспособления и стенды.

С учетом указанных, а также других компонентов системы ТО грузовых автомобилей *ИМ* представлена в виде:

$$ИМ = (ИМАi, МПУ), \quad (1.5)$$

где *ИМАi* – информационная модель ТО и ТД *i*-го автомобиля; *МПУ* – множество возможных вариантов пунктов, постов и участков ТО.

Информационная модель *i*-го автомобиля (*ИМАi*) представлена в виде:

$$ИМАi = (Ai, OAi, ATKi), \quad (1.6)$$

где *Ai* – наименование *i*-й марки автомобиля, *OAi* – описание конструктивных особенностей и характеристик *i*-й марки автомобиля, *ATKi* – альбом ТК выполнения операций ТО и ТД *i*-й марки автомобиля.

Формализованной информацией об *N*-м варианте ПУ_{*N*} является спецификация оборудования СО_{*N*}, установленного на его постах и участках, план расстановки оборудования (ПРО) и схема обслуживания автомобилей (СОА) на пункте.

В результате систематизации и обобщения таких сведений применительно к множеству марок автомобилей формируются комплекты необходимых альбомов ТК проведения ТО, регистры необходимого оборудования и приспособлений, а также регистры других средств.

Для каждой операции ТО и ТД (S) каждого вида ТО и ТД (N) автомобиля конкретной марки (Ai) составляется ТК (TKi SN). Для удобства работы ТК группируются по видам обслуживания: ЕТО, ТО после первых 1000 км (сервис А), ТО после первых 4000 км (сервис В), ТО-1, ТО-2, СО (сервис С).

Наряду с операциями ТО и ТД обычно выполняются определенные расчетные операции, например, расчет остаточного ресурса параметров обслуживаемых узлов и агрегатов автомобиля по результатам ТД. С учетом этого в ИМ введен дополнительно параметр – множество расчетных задач (МРЗ). ИМ ориентирована на генерирование информации блоков СИЭДи-ИП ТОГА, которые должны быть сформированы применительно к конкретным автомобилям и к оснащенности используемых постов и участков ТО.

Разработка СИЭДиИП ТОГА реализована на компьютере в виде специализированных информационных систем (ИС).

Согласно разработанной ИМ составлена гипертекстовая ИБ с элементами иерархичности, объединяющая в себе принципы документальной и фактографической баз и предусматривающая использование в качестве элемента ИБ текстового файла в формате DOC.

Анализируемый в ходе прогнозирования параметр характеризуется номинальным (P_H) и предельным (P_P) значениями, в результате диагностирования определяется текущее значение (P_D) параметра. Изменение рассматриваемого параметра описывается функцией вида:

$$P_D = P_H + v_c t_D^\alpha, \quad (1.7)$$

где v_c – скорость изменения параметра (обычно случайная величина); t_D – наработка машины с начала эксплуатации ко времени диагностирования; α – показатель степени, задающий характер изменения параметра от наработки.

При оценке ресурса у параметра ($P_D < P_P$) по значениям P_D и t_D определяется показатель v_c . Допуская, что данная скорость далее останется неизменной, рассчитывается прогнозируемое время работы машины t_P , при котором параметр становится равным его допустимому значению P_D :

$$t_P^\alpha = (\Delta P / v_c + t_D^\alpha)^{1/\alpha}. \quad (1.8)$$

Разницей между величинами P_D и P_P определяется запас параметра ΔP , который используется машиной от времени диагностирования до времени t_P .

В результате сравнения рассчитанного значения t_P с периодичностью предстоящего ТО рассматриваемой машины вырабатывается управляющее решение по отношению к ее рассматриваемому параметру.

Общая структура СИЭДиИП ТОГА, представленная головным блоком, показана на рис. 1.10. Головной блок рассматривается как совокупность основных информационных блоков и выступает в качестве связывающего элемента для всех блоков.

СИЭДиИП ТОГА	
1.	Пункты технического обслуживания автомобилей - <u>ПТО АТ</u>
2.	Операции технической диагностики, технического обслуживания автомобилей - <u>ОТОиД</u>
3.	Основные нормы времени на операции технического обслуживания и технического диагностирования автомобилей - <u>НВр</u>
4.	Оценка остаточного ресурса узлов и агрегатов автомобилей - <u>ООсР</u>
5.	Оборудование, инструменты и приборы, используемые в процессе обслуживания автомобилей - <u>ОИП</u>
6.	Горюче-смазочные и расходные материалы, их нормы расхода - <u>ГСРМ</u>
7.	Основные регулировочные параметры узлов и агрегатов автомобилей - <u>РгП</u>
8.	Запасные части и их взаимозаменяемость - <u>ЗПЧ</u>
9.	Модели (конструкции) обслуживаемых автомобилей - <u>МК</u>

Для перехода к выбранному блоку нажмите на гиперссылку строки

Рис. 1.10. Общая структура СИЭДиИП ТОГА

В нем созданы гиперссылки переходов к просмотру НТ контентов соответствующих блоков с учетом их многоуровневого представления и возможных вариантов оперирования ими в СИЭДиИП ТОГА.

Рассмотрение процессов ТО осуществляется на основе использования системного подхода, который применительно к СИЭДиИП ТОГА состоит в следующем:

1. разрабатываемая ИС расчленяется на конечное число частей (подсистемы, блоки);
2. каждая подсистема расчленяется на конечное число более мелких подсистем (регистры, компоненты) и т.д. – до получения в результате конечного числа шагов таких частей, называемых элементами системы, которые в условиях данной задачи не подлежат дальнейшему расчленению на части;
3. элементы системы функционируют во взаимодействии;
4. свойства системы в целом определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между ними;
5. в данную систему входят несколько иерархических подсистем представленных на рис. 1.11.

Каждый из блоков отличается по структуре и формируется как автономный, что позволяет использовать в качестве компонентов в составе других ИС. Для размещения НТМ каждого блока в директории формируются поддиректории с условными наименованиями, присвоенными соответствующим блокам НТ фонда. Блоки взаимоувязаны гипертекстовой структурой таким образом, чтобы можно было, находясь в одном блоке-файле, перейти к другому блоку-файлу без выхода из используемого блока и, при необходимости, вернуться назад.

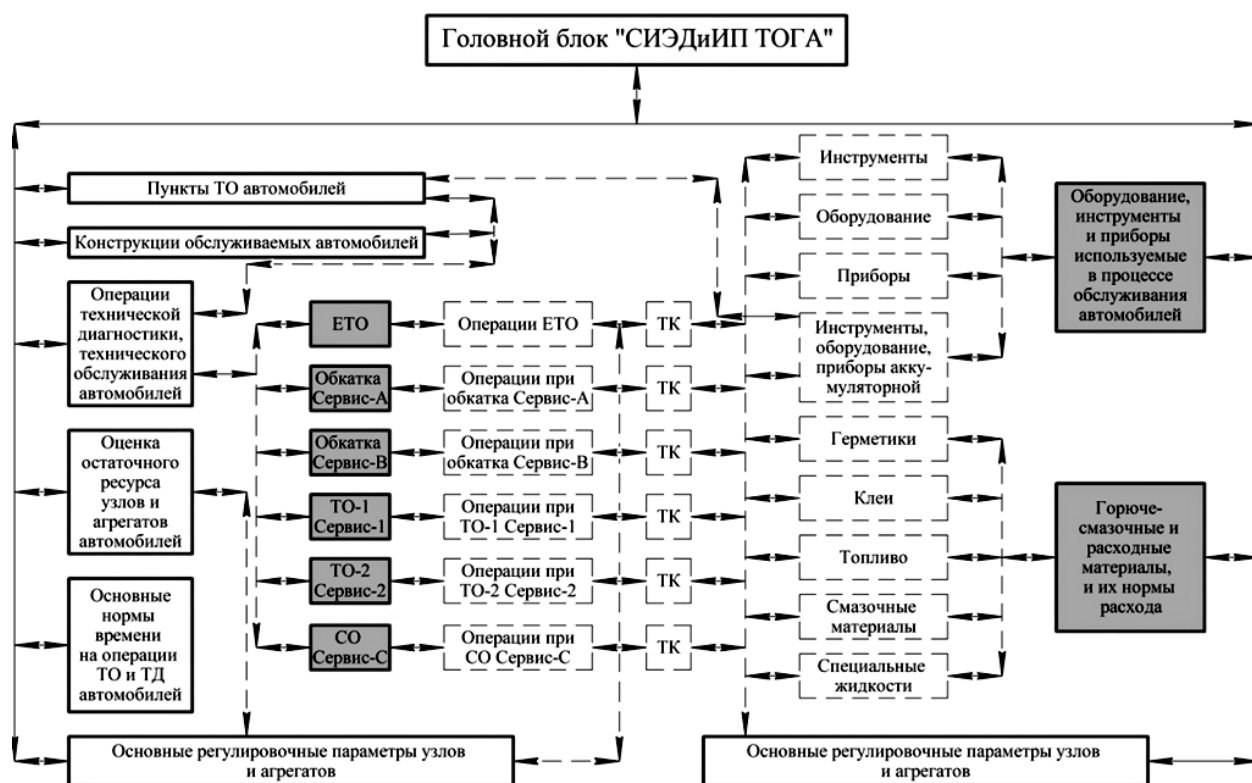


Рис. 1.11. Структура СИЭДиИП ТОГА (– блоки индивидуального характера, – однотипные блоки горизонтальной интеграции контентов; \longleftrightarrow – структурные связи головного блока, $\dashleftarrow \dashrightarrow$ – межблочные связи)

При формировании СИЭДиИП ТОГА используется принцип горизонтальной интеграции НТ фонда с ранее сформированным фондом, в результате которой данный фонд дополняется и расширяется за счет включения в него определенных компонентов вновь разработанного НТМ.

Основные блоки СИЭДиИП ТОГА с учетом состава структурных компонентов разделены на блоки индивидуального характера и однотипные блоки горизонтальной интеграции контентов, представленных на рис. 1.11.

Методика и алгоритм разработки основных блоков СИЭДиИП ТОГА индивидуального характера включает: разработку, отбор, обработку и группирование НТМ; формирование данного материала в соответствии с предъявляемыми требованиями к СИЭДиИП ТОГА с включением рисунков и спецификаций приборов, устройств, объектов; расшифровку аббревиатур и корректировку терминологии для приведения ее к единой составляющей; формирование файловой структуры с НТМ для возможности вызова любой информации при проведении ТО на любом этапе использования ИС, а также для возможности осуществления (вызова) обратной связи после получения или просмотра необходимой информации.

При формировании однотипных блоков горизонтальной интеграции контентов осуществляется разработка и подбор необходимых НТ компонентов, обеспечивая их полноту и содержательность. Информация о каждом рассматриваемом объекте включает его изображение с

необходимыми разрезами, наименования его составных частей. Здесь же дается описание принципа работы и подробная инструкция по его применению, а также техническая характеристика объекта. Если описание объекта включает ссылки на другие объекты, то в блоке приводятся их описания и даются гиперссылки на них.

С учетом многообразия рассматриваемых объектов для повышения удобства получения НТМ при формировании блоков применяются приемы обобщения и группирования. Так, в начале блока располагается список информационных узлов блока, по которым в блоке представлена информация, затем по каждому информационному узлу приводится список (регистр) их марок или моделей и от каждого из них следует гиперссылка на информационный объект (модуль) с описанием соответствующего объекта. Для каждого объекта в данном блоке имеется свое обозначение в виде кода для гиперссылки. В результате такого формирования блока пользователь может легко обнаружить наличие искомого НТМ об интересующем его объекте и непосредственно перейти к его просмотру.

Все операции ТО и ТД формируются в виде следующей совокупности данных: операция, обслуживаемая машина, эксплуатационный материал, инструмент, прибор, приспособление/стенд. Вместе с тем формируются контенты с вариантами, различающимися степенью детализации представления НТМ. Для автоматизации процедур оценки остаточных ресурсов узлов и агрегатов ГА в среде электронной таблицы EXCEL-2010 разработан программно-алгоритмический и информационный комплекс индивидуального (по каждому автомобилю) прогнозирования параметров технического состояния его узлов и агрегатов в компьютере в виде пакета «Прогнозирование».

Разработанный комплекс был апробирован на ряде моделей грузовых автомобилей семейства КамАЗ. Производственные испытания показали, что применение СИЭДиИП ТОГА приводит к сокращению времени выполнения ТО и ТД.

1.2.3. Дистанционный контроль технического состояния тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин

Во время осенне-весенних полевых работ перед руководителями сельскохозяйственных предприятий с особой остротой встают вопросы контроля технического состояния эксплуатируемой техники. Для оценки и последующей оптимизации работы предприятия по критериям минимизации расхода топливно-смазочных материалов (ТСМ), рабочего времени, получения качественной продукции необходимо обладать полной и объективной информацией, что позволяет обеспечивать работу техники по требуемым агротехническим срокам.

В последние годы был сделан большой прорыв в обеспечении контроля управления мобильной техникой за счет внедрения телеметрических систем мониторинга на основе систем ГЛОНАСС, GPS. Ниже рассмотрены

особенности применения этих систем для контроля технического состояния тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин [13].

В начале развития спутникового мониторинга использовались в основном такие его функции, как онлайн-определение машин на картах и контроль нецелевого расхода топлива.

В настоящее время с помощью телеметрических информационных систем и прикладных программных средств сельскохозяйственные предприятия успешно решают следующие узкоспециализированные задачи: агрохимический мониторинг, поддержку технологий «точного земледелия», тематическое картографирование сельхозугодий и др.

Важной задачей применения телеметрических информационных систем (ИС) является мониторинг качества эксплуатации и технического обслуживания (ТО) техники с накоплением систематизации данных о работе машинно-тракторного парка (МТП) в АПК. Актуальность решения этой задачи продиктована рядом технико-экономических и организационных аспектов:

- недостатком квалифицированного персонала, обеспечивающего высокую эксплуатационную надежность машин;
- использованием разновозрастного и разномарочного состава МТП, из-за чего затрудняется унификация процессов ТОиР;
- использованием машин с разной формой собственности (аренда, лизинг и др.);
- несвоевременностью проведения квалифицированного ТО машин в т.ч. сезонного, ежесменного;
- наличием нарушений правил эксплуатации машин, работой на аварийных режимах;
- низкой согласованностью мероприятий по ТОиР и обеспеченности запчастями и расходными материалами.

Преодоление указанных проблем позволяет снизить производственные издержки, повысить качество выполняемых работ, а также производственную и трудовую дисциплину при эксплуатации и ремонте МТП.

Сбор информации через телеметрические ИС и обработка данных о техническом состоянии и нарушении правил эксплуатации, регистрация внезапных отказов машин обеспечивают своевременное реагирование и взаимодействие сервисных и ремонтных служб и собственников машин.

Техническое состояние МТП зависит от системного подхода к практическому использованию средств мониторинга и управления техническим состоянием машин, включая:

- измерение контролируемых параметров работы МТП на эксплуатационных режимах;
- оценку объема механизированных работ, выполняемых машинами; расхода топлива, своевременности проведения ТО с учетом требований предприятия-изготовителя и лизинговой компании;
- сокращение простоев, времени доставки, затрат на ТО;

- увеличение срока службы машин;
- повышение эффективности логистики и более эффективное использование ресурсов сервисных и ремонтных служб;
- выявление случаев мошенничества при использовании техники в лизинге;
- выявление случаев эксплуатации техники без прохождения в установленном порядке техосмотра;
- обеспечение сервисных и ремонтных служб независимой системой контроля технического состояния МТП;
- автоматизированный учет и управление сельскохозяйственным предприятием;
- обеспечение первичной обработки и ведения нормативно-справочной информации для сельхозтоваропроизводителей и ремонтных служб;
- оптимизация организации ТОиР мобильного и стационарного оборудования.

Это, в свою очередь, позволяет повысить качество эксплуатации МТП и уровень развития ремонтно-обслуживающей инфраструктуры в целом.

При реализации системы удаленного мониторинга технического состояния МТП, проводившейся ГОСНИТИ, применялся программно-аппаратный комплекс с отраслевым приложением «Агропром» и оборудование компании «Глобальные системы автоматизации» (ГЛОСАВ). Принцип работы системы был основан на использовании нескольких технологий:

- спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС – для точного определения местоположения объектов путем анализа сигналов, передаваемых с навигационных спутников;

- сетей сотовой связи GSM – для оперативного обмена информацией с установленным на объектах бортовым оборудованием (для передачи данных служили протоколы GPRS и SMS)

- интернет-технологии – для обмена данными между компонентами системы и для оперативного предоставления информации пользователям.

Для расширения функциональных возможностей устанавливаемых на машины бортовых блоков Автосат ГЛОНАСС различных модификации (рис. 1.12), являющихся основным элементом в системе, необходимо было также устанавливать дополнительно датчики к аналоговым и дискретным входам и к радиоканалам.



Рис. 1.12. Внешний вид бортового блока Автосат БК-10

Для реализации системы контроля технического состояния МТП использовали как внешние датчики (табл. 1.1), так и штатные датчики показывающих бортовых блоков совместно с дополнительными согласующими устройствами, индикаторами и реле, работающими в режиме «ключа», или штатные интерфейсы CAN, RS-485, RS-232.

Таблица 1.1.

Внешние датчики и устройства для подключения к бортовому блоку GSM/ГЛОНАСС

№ п/п	Назначение	Внешний вид
1	2	3
1	Радиочастотная идентификация (RFID)	
2	Датчик наличия водителя (пассажира)	
3	Датчик уровня топлива (цифровой/аналоговый). Применяется для точного измерения уровня топлива в баках транспортных средств и стационарных установках. Может использоваться как штатных датчик указателя, а также как дополнительный – в системах контроля расхода топлива и мониторинга транспорта	
4	Универсальный датчик механизмов. Применяется для контроля работы дополнительного специального оборудования	
5	Дифференциальный расходомер топлива DFM предназначен для дифференциального (подача минус «обработка») измерения расхода дизельного топлива в топливной магистрали транспортных средств и агрегатов	
6	Цифровой датчик для измерения температуры узлов, рабочих жидкостей	
7	Устройство сопряжения для управления штатными стрелочными указателями. Может применяться с другими устройствами, которые имеют аналоговый выходной сигнал (от 1,5 до 5 В)	
8	Универсальный датчик приближения для контроля работы дополнительного оборудования и исполнительных механизмов	
9	Радиодатчик. Используется для контроля температуры и открытия дверей, капота, технологических люков	

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
10	Датчик сигнализатора засоренности воздушного фильтра дизеля	
11	Тревожная кнопка. Используется для подачи на диспетчерский пульт сигнала о наступлении нештатной ситуации при эксплуатации	
12	Датчики нагрузки на ось. Позволяют оценить загрузку транспортного средства с пневмо- и рессорной подвеской, а также фиксации ям, ухабов дорог	
13	Магнитоконтактные датчики (терконы). Используются для контроля срабатывания механизмов, подъема кузова, капота	
14	Акселерометры (встроенные и внешние). Используются для анализа стиля вождения, автоматической идентификации дорожно-транспортного происшествия, определения угла наклона транспортного средства	
15	Универсальный блок контроля моточасов работы двигателя. Предназначен для совместной работы с приборами мониторинга и может быть применен для подсчета моточасов на любых типах двигателей	
16	Датчик-ключ. Используется для контроля включения любых приборов и агрегатов, а именно: включение зажигания, срабатывание аварийных индикаторов, включение соленоидов управления пневмо- и гидропривода	
17	Кондуктометрические датчики. Используются для контроля отстоя в топливных баках	
18	Реле давления и температуры КРМ. Предназначен для выдачи сигнала при превышении заданного контролируемого порога (аварийное превышение/уменьшение давления)	
19	Датчик уровня используется для контроля минимального уровня масла в картере двигателя, баках гидросистем	

Это позволяло подключаться более чем к 30 независимым каналам от объектов контроля и получать изменяющиеся при эксплуатации МГП параметры – давление, температура, частота вращения и др.; фиксировать аварийные режимы эксплуатации, а также производить идентификацию и регистрацию как объектов навесного или прицепного орудия, так и водителя или мастера-наладчика при помощи радиочастотного канала связи.

Программное обеспечение системы осуществляет контроль параметров работы машин, что позволяет уже на ранних стадиях отклонений параметров

от номинальных и допустимых значений фиксировать их и оперативно принимать меры по недопущению эксплуатации машин на аварийных режимах. Система контроля позволяет объективно и оперативно выявлять причинно-следственные связи поломок и отказов МТП. Для контроля режима работы оператора машины программное обеспечение позволяет выводить данные о времени работы и отдыха тракториста (комбайнера).

Внедрение телеметрических информационных систем для оценки эффективности работы МТП в АПК позволяет выявлять скрытые резервы и возможности, проводить глубокий анализ качества инженерно-технологических услуг по ТОиР, по поставке ТСМ и др.

Современная бортовая техника автоматического контроля позволяет не только контролировать техническое состояние сельскохозяйственных машин, но и проводить эксплуатационно-технологический мониторинг, т.е. контролировать правильность их функционирования.

На рис. 1.13 показан в качестве примера внешний вид информатора молотбы комбайна Dominator фирмы Claas [6].

Бортовые системы контроля

Для постоянного отслеживания режима движения и технического состояния мобильной техники в процессе эксплуатации служат бортовые системы контроля и диагностики [14].

В автомобилях применяются различные по назначению контрольно-измерительные приборы, различающиеся конструкцией и принципом действия. С помощью датчиков положения (перемещение/угол) контролируются такие параметры, как: положение дроссельной заслонки, положение педали управления подачи топлива, перемещение сервомеханизма капота двигателя, дистанция до другого автомобиля или препятствия, угол поворота рулевого колеса; угла поворота колеса; угол наклона поддресоренной массы при повороте, курсовой угол и угол положения педали тормоза и др.

С помощью электроизмерительных приборов осуществляется контроль параметров системы электроснабжения. Приборы измерения давления и разряжения служат для контроля давления масла в двигателе и в гидромеханической передаче, воздуха в пневматической тормозной системе, разряжения во впускном коллекторе. Термометры используются для измерения температуры охлаждающей жидкости, а также температурных режимов работы узлов и агрегатов, спидометры – для контроля режима движения, а тахометры – для контроля частоты вращения вала двигателя. Специальные приборы разных типов контролируют уровень топлива в баке, уровень эксплуатационных жидкостей в заправочных емкостях, а также техническое состояние тормозных накладок, фильтров и других частей автомобиля. Особое значение имеют приборы, которые предназначены для информирования водителя о возникновении неисправностей или нарушении рабочих функций узлов или агрегатов, определения оптимальных действий по выбору режимов функционирования.

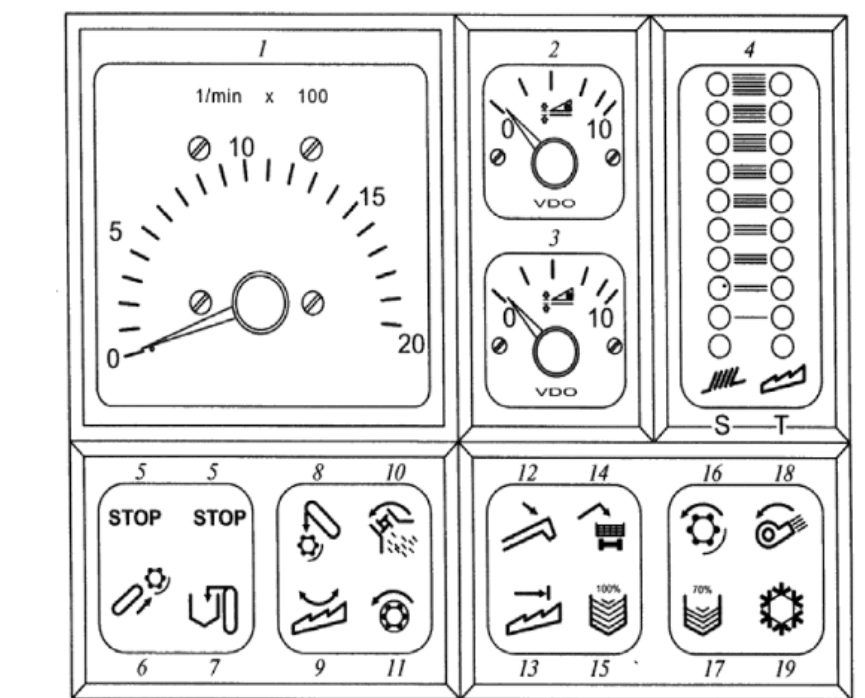


Рис. 1.13. Информатор молотьбы комбайна Dominator фирмы Claas
 1 – счетчик рабочих часов, указатель скорости вращения молотильного барабана; 2 – индикатор высоты среза; 3 – индикатор разгрузки жатки (давление прижима); 4 – контроль пропускной мощности: S – грохот; T – соломотряс; 5 – сигнальные лампы, красная – «Стоп»; б – сигнальная лампа, красная – контроль скорости вращения наклонного транспортера; 7 – сигнальная лампа, красная – контроль скорости вращения зернового элеватора; 8 – сигнальная лампа, красная – контроль скорости вращения элеватора сходового продукта; 9 – сигнальная лампа, красная контроль скорости вращения; 10 – сигнальная лампа, красная – контроль скорости вращения измельчителя; 11 – свободно для других функций; 12 – сигнальная лампа, красная – выпускная труба зернового бункера выведена; 13 – сигнальная лампа, красная – пробка в пространстве соломотряса; 14 – сигнальная лампа, красная — включен процесс опорожнения зернового бункера; 15 – сигнальная лампа, красная – зерновой бункер заполнен на 100%; 16 – контрольная лампа, зеленая – при индикации скорости вращения молотильного барабана; 17 – контрольная лампа, зеленая – зерновой бункер заполнен на 70%; 18 – контрольная лампа, зеленая – при индикации скорости вращения вентилятора; 19 – сигнальная лампа, красная – неисправность в компрессорной установке кондиционера

При этом основными параметрами контроля являются: уровень масла в двигателе; уровни охлаждающей и тормозной жидкостей, а также жидкости в бачке стеклоомывателя; износ тормозных накладок; исправность ламп системы освещения и сигнализации. Кроме того, с помощью встроенных датчиков определяются: напряжение аккумуляторной батареи; регулируемое напряжение генератора; исправность диодов выпрямителя генератора;

напряжение на катушке зажигания при включении замка зажигания и стартера; напряжение на контактах прерывателя; угол замкнутого состояния контактов прерывателя при контрольных значениях частоты вращения вала двигателя; асинхронизм искрообразования по цилиндрам; угол опережения зажигания при контрольных значениях частоты вращения двигателя; падение частоты вращения двигателя при отключении цилиндров.

В современных автомобилях находят широкое применение бортовые персональные компьютеры, предназначенные для оказания всесторонней помощи водителю. В компьютер поступают сигналы, характеризующие работу систем регулирования подачи топлива, скорости автомобиля, уровня топлива в баке, напряжения аккумуляторной батареи, включения подсветки приборной панели и др. Кроме того, бортовой компьютер может выполнять функции противоугонного устройства, управлять антиблокировочной системой, выбирать оптимальный маршрут.

Электронные информационные устройства и индикаторы, устанавливаемые на приборную панель, могут предоставлять водителю информацию о состоянии автомобиля в цифровой, графической и текстовой форме, также возможен синтез человеческой речи.

Например, панель приборов автомобилей марки Mercedes-Benz отражает следующие параметры: температура двигателя; уровень и давление масла; уровень тормозной, охлаждающей и омывающей жидкостей; толщина тормозных накладок; степень засоренности воздушного фильтра; напряжение аккумуляторной батареи. Также на панели предоставляются сведения о состоянии антиблокировочной системы, гидропривода тормозов, гидроподвески, стояночного тормоза, ремней безопасности, замков дверей, ламп сигнальной аппаратуры. Кроме того, на ней указываются скорость движения автомобиля, частота вращения вала двигателя, пробег, расход топлива, текущее время, время в пути и время простоя, температура наружного воздуха, интервалы технического обслуживания и др. [14]

1.2.4. Контроль технического состояния ДВС по параметрам переходных режимов

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) в процессе эксплуатации требуют больших материальных и трудовых затрат на ТОиР, которые во много раз превышают его первоначальную стоимость [15]. На долю дизельных двигателей приходится 30-70% отказов мобильной техники и 40-60% времени на их устранение. Приблизительно у 85% тракторных двигателей номинальная мощность ниже, а расход топлива выше, чем это определено техническими условиями на двигатель. У большинства тракторных и комбайновых двигателей, поступающих в эксплуатацию после ремонта, неравномерность подачи топлива по цилиндрам составляет 6-10 %. Из-за неудовлетворительной работы топливной аппаратуры риски отказов дизельных двигателей повышаются на 20-40 %.

Трудоемкость традиционных методов диагностирования ДВС довольно высока и составляет около 40% трудоемкости ТО. При этом 60-80% операционной трудоемкости приходится на вспомогательную трудоемкость (постановка и снятие с трактора дополнительных приборов и датчиков, отсоединение и присоединение отдельных узлов и т.д.). Из известных методов ТД наиболее предпочтительным с точки зрения трудоемкости, оперативности и информативности является динамический метод. Однако для его реализации требуется применение узкоспециализированных приборов, что приводит к снижению эффективности ТД.

Одной из главных причин ухудшения показателей работы двигателей является неравномерность работы цилиндров, приводящая к ухудшению индикаторных показателей на 4-15% и увеличению цикловой подачи на 5-8%, к возрастанию температуры выпускных газов на 40-45°, что вызывает неравномерный износ деталей и сокращение ресурса двигателя.

Проблема снижения неравномерности рабочих процессов и изнашивания в одноименных, кинематически связанных элементах цилиндропоршневой группы (ЦПГ), кривошипно-шатунного механизма (КШМ), газораспределительного механизма (ГРМ), плунжерных парах топливного насоса высокого давления ТНВД, зубчатых зацеплений представляет наибольший практический интерес для специалистов заводов-изготовителей автотракторной техники и предприятий, её эксплуатирующих.

В работе [14] предложен способ комплексного контроля состояния ДВС на переходных режимах, позволяющих снизить трудоемкость ТД в условиях эксплуатации.

При экспериментальных исследованиях особенностей работы ДВС выявлены составляющие углового ускорения коленчатого вала ДВС. Также показано, что погрешность определения неравномерности распределения мощности по цилиндрам вследствие остаточной неуравновешенности ДВС и влияния неисправных цилиндров достигает 4%. На основании анализа экспериментальных данных предложен алгоритм действий по устранению этого недостатка, а именно: разность мгновенных значений ускорений разгона и выбега необходимо уменьшать на величину гармонической составляющей, которая, в свою очередь, является диагностическим параметром при контроле уравновешенности ДВС. Установленные закономерности изменения основных диагностических параметров, характеризующих техническое состояние и работу двигателя, были объединены в единый алгоритм. Предложенный способ определения неравномерности распределения мощности по цилиндрам был использован при разработке технологии комплексного диагностирования ДВС.

ГЛАВА 2 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2.1. Интеллектуальные технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика

Интеллектуальные технологии и интеллектуальные системы

Современное понятие интеллектуальных систем сформировалось в процессе развития теоретических основ кибернетики, теории управления, теории алгоритмов, современных информационных технологий и обобщения накопленных научных знаний в области искусственного интеллекта [16, 17]. До сих пор нет единого общепризнанного определения интеллектуальной системы (как, впрочем, и искусственного интеллекта). В начальный период развития искусственного интеллекта (в 1960-х гг.) под интеллектуальными системами понимали автоматические системы, способные решать задачи, традиционно относимые к сфере деятельности человека (распознавание визуальных и звуковых образов, игра в шахматы, доказательство теорем и т.д.). Затем к интеллектуальным системам стали относить системы, моделирующие на компьютере работу клеток мозга и мышления человека. Позже, в 1980-х гг. интеллектуальными системами стали считать компьютерные системы, способные вести осмысленный диалог с человеком и усиливать интеллектуальную деятельность человека в различных сферах. В настоящее время интеллектуальные системы отражают высокий уровень развития современных информационных технологий и представляют обширную область проведения теоретических исследований и практического (коммерческого) использования результатов этих исследований.

В общем случае системой называют совокупность взаимосвязанных элементов, предназначенную для достижения определенной цели. По виду этих элементов различают технические и программные системы [18, 19]. Первые представляют собой совокупность технических устройств, вторые – совокупность компьютерных программ. И те, и другие способны решать задачи различного уровня сложности, из которых наиболее сложными являются интеллектуальные (творческие) задачи. Соответственно, под интеллектуальными системами следует понимать технические или программные системы, способные решать интеллектуальные задачи в определенной предметной области.

Всякая система находится в постоянном взаимодействии с внешней средой, которая представляет собой совокупность некоторых объектов. Это взаимодействие проявляется в том, что изменение свойств объектов влияет на поведение системы и, с другой стороны, свойства объектов изменяются в результате поведения системы. Характерной особенностью интеллектуальных систем является их способность реагировать на изменения, происходящие во внешней среде, настраивая определенным образом свои параметры в зависимости от состояния внешней среды.

Существуют различные виды интеллектуальных систем, которые характеризуются присущими им структурными и функциональными особенностями, сферами применения. Создание интеллектуальных систем в существенной мере связано с развитием информатики, что привело к распространению разнообразных интеллектуальных информационных систем. Особой разновидностью интеллектуальных систем, используемых в производственной сфере, являются адаптивные системы. Развитие робототехники привело к созданию интеллектуальных роботизированных систем. Широкому распространению интеллектуальных систем в разных областях производственной деятельности, включая аграрную индустрию, способствует использование беспроводных сенсорных систем, в частности, беспроводных сенсорных сетей и систем радиочастотной идентификации. Значительная роль в распространении интеллектуальных систем отводится средствам навигации, в первую очередь, спутниковым навигационным системам.

Интеллектуальные информационные системы

Информатика как научная дисциплина изучает структуру и общие свойства информации, а также закономерности ее создания, преобразования, передачи и использования в различных сферах человеческой деятельности.

Основные функции информационных систем: восприятие вводимых пользователем информационных запросов и необходимых исходных данных, обработка введенной и хранимой в системе информации в соответствии с известным алгоритмом и формирование требуемой выходной информации.

Для интеллектуальных информационных систем, ориентированных на генерацию алгоритмов решения задач, свойственны развитые коммуникативные способности, т. е. возможности взаимодействия (интерфейса) пользователя с системой, а также умение решать сложные плохо формализуемые задачи, т. е. такие задачи, которые требуют построения оригинального алгоритма решения в зависимости от конкретной ситуации, характеризующейся неопределенностью и динамичностью исходных данных и знаний [20].

К интеллектуальным информационным системам, получившим широкое применение, относятся экспертные системы, назначение которых заключается в решении трудных для экспертов задач на основе накапливаемой базы знаний, отражающей опыт работы экспертов в рассматриваемой проблемной области [20]. Экспертные системы обеспечивают возможности принятия решений в ситуациях, когда алгоритм заранее не известен и формируется по исходным данным в виде цепочки рассуждений (правил принятия решений) из базы знаний, причем решение задач предполагается осуществлять в условиях неполноты, недостоверности, многозначности исходной информации и качественных оценок процессов.

В последние годы все более широкое использование находят интеллектуальные географические информационные системы (геоинформационные системы, ГИС). В общем случае ГИС – это система

сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных (географических) данных и связанной с ними информацией о необходимых объектах. В техническом отношении ГИС представляет собой набор компьютерного оборудования, географических данных и программного обеспечения для сбора, обработки, хранения, моделирования, анализа и отображения всех видов пространственно привязанной информации [21]. Появление ГИС относят к началу 1960-х годов, когда возникли предпосылки для информатизации и компьютеризации сфер деятельности, связанных с моделированием географического пространства и решением пространственных задач [22].

Интеллектуальные ГИС чаще всего строятся на основе экспертных систем. Они позволяют распознавать сложные пространственно соотнесенные ситуации, прогнозировать отдельные события, оценивать их опасность или иные присущие им признаки и выдавать соответствующие рекомендации пользователям [23]. Существуют также интеллектуальные ГИС, которые содержат в своем составе искусственные нейронные сети. Такие ГИС используются для ассоциативного запоминания информации, нелинейного прогнозирования и моделирования, обработки информации об объектах и процессах [23].

Интеллектуальные адаптивные системы

С помощью адаптивных (самоприспосабливающихся) систем можно существенно изменять характер управления автоматизированным производством, делать его в наивысшей степени автономным и адаптируемым в отличие от обычного управления посредством компьютерного комплекса, который обрабатывает информацию по заранее известным законам и алгоритмам [24]. Адаптивные системы способны сохранять работоспособность в условиях непредвиденного изменения свойств управляемого объекта, цели управления или условий внешней среды посредством смены алгоритмов своего функционирования или поиска оптимальных состояний. По способам адаптации они разделяются на самонастраивающиеся, самообучающиеся и самоорганизующиеся системы.

В самонастраивающихся системах приспособление к случайно изменяющимся условиям обеспечивается автоматическим поиском оптимальной настройки или автоматическим изменением параметров настройки (в результате контролируемый показатель качества управления поддерживается в заданных пределах).

В любой другой автоматической системе управления, не являющейся самонастраивающейся, имеются параметры, которые влияют на устойчивость и качество процессов управления и могут быть изменены при настройке системы. Если же эти параметры остаются неизменными, а условия функционирования (характеристики управляемого объекта, возмущающие воздействия) существенно изменяются, то процесс управления может ухудшиться, стать неустойчивым. Ручная настройка системы не всегда удобна и, более того, не всегда возможна. Использование в таких случаях

самонастраивающихся систем является как технически, так и экономически целесообразным и, кроме того, может оказаться единственным способом обеспечения надежного управления.

Управление производством на основе применения самонастраивающихся систем позволяет оптимизировать режимы функционирования управляемых объектов, облегчает задачу унификации систем управления, сокращает время на испытания и наладку, снижает технологические требования на изготовление устройств управления, освобождает обслуживающий персонал от трудоемких операций настройки.

В самообучающихся системах алгоритм функционирования вырабатывается и совершенствуется в процессе самообучения, который сводится к «пробам» и «ошибкам». При этом система выполняет пробные изменения алгоритма и одновременно контролирует результаты этих изменений. Если результаты оказываются благоприятными с точки зрения целей управления, то изменения продолжают в том же направлении до достижения наилучших результатов или же до начала ухудшения процесса управления.

В самоорганизующихся системах приспособление к изменяющимся условиям или оптимизация процессов управления достигается изменением структуры системы управления, в частности, включением или выключением отдельных подсистем, качественным изменением алгоритмов управления, связей между подсистемами и схемы их подчинения и т. д.

Интеллектуальные роботизированные системы

В последние годы интеллектуальные системы активно внедряются в робототехнику. В связи с этим принято различать три этапа в развитии роботов: 1) создание программных роботов (работают по жестко заданной программе действий); 2) создание адаптивных роботов (имеют возможность автоматически перепрограммироваться (адаптироваться) в зависимости от обстановки; изначально задаются лишь основы программы действий); 3) создание интеллектуальных роботов (задание вводится в общей форме, а сам робот принимает решения или планирует свои действия в распознаваемой им неопределенной или сложной обстановке) [25].

Интеллектуальный робот – это робот, оснащенный интеллектуальной системой управления [26]. Он обладает так называемой моделью внешнего мира, что позволяет ему действовать в условиях неопределенности информации. Если эта модель реализована в виде базы знаний, то целесообразно, чтобы база знаний была динамической. При этом коррекция правил вывода в условиях меняющейся внешней среды реализует механизмы самообучения и адаптации.

В состав интеллектуального робота входят следующие основные части:

– исполнительные органы – манипуляторы, ходовая часть и др. устройства, с помощью которых робот может воздействовать на окружающие его предметы (по аналогии с живыми организмами это «руки» и «ноги» робота); все они представляют собой довольно сложные технические устройства,

включающие сервоприводы, мехатронные части, датчики, системы управления;

– сенсоры – системы технического зрения, слуха, осязания, датчики расстояний, локаторы и др. устройства, которые позволяют получить информацию из окружающего мира;

– система управления – это «мозг» робота, который принимает информацию от сенсоров и управляет исполнительными органами; эта часть робота реализуется с помощью программных средств.

В состав системы управления интеллектуального робота входят следующие компоненты:

– модель мира – отражает состояние окружающего робота мира в терминах, удобных для хранения и обработки; она выполняет функцию запоминания состояния объектов в мире и их свойств;

– система распознавания – сюда входят системы распознавания изображений, распознавания речи и т. п.; задачей этой системы является идентификация, т. е. «узнавание» окружающих робота предметов, их положения в пространстве, в результате чего строится модель мира;

– система планирования действий – осуществляет «виртуальное» преобразование модели мира с целью получения какого-нибудь действия; в результате чего осуществляется построение планов, т. е. последовательностей элементарных действий;

– система выполнения действий – пытается выполнить запланированные действия, подавая команды на исполнительные устройства и контролируя при этом процесс выполнения; если выполнение элементарного действия оказывается невозможным, то весь процесс прерывается и выполняется новое (или частично новое) планирование;

– система управления целями – определяет иерархию, т. е. значимость и порядок достижения поставленных целей.

Важным свойством системы управления является способность к обучению и адаптации, т. е. способность генерировать последовательности действий для поставленной цели, а также подстраивать свое поведение под изменяющиеся условия окружающей среды для достижения поставленных целей.

Работа интеллектуального робота основывается на использовании систем искусственного интеллекта, методов нечеткой логики, искусственных нейронных сетей.

Искусственный интеллект – это свойство интеллектуальной системы выполнять творческие функции, которые традиционно считаются прерогативой человека. При этом под интеллектуальной системой понимается техническая или программная система, способная решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы. Структура интеллектуальной системы включает три основных блока: базу знаний, решатель и интеллектуальный интерфейс, позволяющий вести общение с компьютером без специальных программ для ввода данных.

Нечеткая логика – это раздел математики, являющийся обобщением классической логики и теории множеств, базирующийся на понятии так называемого нечеткого множества. Нечеткая логика представляет собой набор нестрогих правил, в которых для достижения поставленной цели могут использоваться радикальные идеи, интуитивные догадки, а также опыт специалистов, накопленный в соответствующей области.

Нечеткая логика возникла как наиболее удобный способ построения систем управления сложными технологическими процессами, а также нашла применение в диагностических и других экспертных системах, нейронных сетях, системах искусственного интеллекта. На основе нечеткой логики и следящей системы технического зрения разрабатываются интеллектуальные системы управления мобильными роботами.

Искусственные нейронные сети – это математические модели, а также их программное или аппаратное воплощение, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Нейронная сеть представляет собой систему соединенных и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов). Такие процессоры обычно довольно просты (по сравнению с процессорами, используемыми в обычных персональных компьютерах). Каждый процессор нейронной сети имеет дело только с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые он периодически посылает другим процессорам. И, тем не менее, будучи соединенными в большую сеть с управляемым взаимодействием, такие локально простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи. Нейронные сети используются в задачах адаптивного управления и как алгоритмы для робототехники.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, вместо этого они обучаются. Возможность обучения – это одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Обучение нейронных сетей заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, а также выполнять обобщение.

Беспроводные сенсорные сети

Беспроводная сенсорная сеть (wireless sensor network, WSN) – это распределенная, самоорганизующаяся сеть множества сенсоров и исполнительных устройств, объединенных между собой посредством радиосвязи [27]. Область покрытия такой сети может составлять от нескольких метров до нескольких километров за счет способности ретранслировать сообщения от одного элемента сети к другому.

Использование сравнительно недорогих беспроводных сенсорных устройств открывает широкие возможности для применения систем телеметрии и контроля. Сенсорные сети используются для беспроводного

сбора данных, мониторинга и обслуживания машин, контроля окружающей среды, управления безопасностью и во многих других областях.

Беспроводные сенсорные сети состоят из миниатюрных вычислительных устройств, снабженных сенсорами температуры, давления, освещенности, уровня вибрации, местоположения и т. п. и трансиверами (устройствами для передачи и приема сигналов), работающими в заданном радиодиапазоне. Гибкая архитектура, низкие затраты при монтаже выделяют беспроводные сенсорные сети среди других беспроводных и проводных интерфейсов передачи данных, особенно когда речь идет о большом количестве соединенных между собой устройств.

Системы радиочастотной идентификации

Радиочастотная идентификация (radio frequency identification, RFID) – это способ автоматической идентификации объектов, в котором дистанционно посредством радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в так называемых транспондерах (приемопередающих устройствах), или RFID-метках [27]. Большинство RFID-меток состоит из двух частей: интегральной схемы (для хранения и обработки информации, модулирования или демодулирования радиочастотного сигнала и некоторых других функций) и антенны (для приема и передачи сигнала).

Спутниковые навигационные системы

Спутниковая система навигации представляет собой комплексную электронно-техническую систему, которая состоит из совокупности наземного и космического оборудования и предназначена для определения местоположения (географических координат и высоты) и точного времени, а также параметров движения (скорости и направления движения и т. д.) для наземных, водных и воздушных объектов [28].

Принцип работы спутниковых систем навигации основан на измерении расстояния от антенны на объекте (координаты которого требуется получить) до спутников, положение которых известно с большой точностью.

В свою очередь, измерение расстояния от спутника до антенны приемника основано на определенности скорости распространения радиоволн. Для осуществления возможности измерения времени распространяемого радиосигнала каждый спутник навигационной системы излучает сигналы точного времени, используя точно синхронизированные с системным временем атомные часы. При работе спутникового приемника его часы синхронизируются с системным временем, и при дальнейшем приеме сигналов вычисляется задержка между временем излучения, содержащимся в самом сигнале, и временем приема сигнала. Располагая этой информацией, навигационный приемник вычисляет координаты антенны. Все остальные параметры движения (скорость, курс, пройденное расстояние) вычисляются на основе измерения времени, которое объект затратил на перемещение между двумя или более точками с определенными координатами.

Основные элементы спутниковой системы навигации:

- орбитальная группировка спутников, излучающих специальные радиосигналы;

- наземная система контроля и управления, включающая устройства измерения текущего положения спутников и передачи на них полученной информации для корректировки данных об орбитах;

- аппаратура потребителя спутниковых навигационных систем;

Для повышения эффективности спутниковой навигации служит система РТК (Real Time Kinematic, кинематика реального времени) – совокупность приемов и методов получения координат и высот точек местности сантиметровой точности с помощью спутниковой системы навигации посредством получения поправок с базовой станции, принимаемых аппаратурой пользователя во время съемки.

В настоящее время работают несколько систем спутниковой навигации, среди которых наибольшее распространение получили системы GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия).

На сегодня в США до 80 %, а в странах ЕС до 60 % фермеров используют элементы систем спутниковой навигации [29]. Основные функциональные возможности этих систем применительно к уборочно-транспортным комплексам:

- мониторинг навигационных параметров техники, состояния подключенных датчиков и дополнительных устройств, выполнения плановых заданий и соблюдения маршрутов движения, автоматическое оповещение о возникновении нарушений;

- контроль параметров работы уборочно-транспортных комплексов, движения топлива, выполнения плановых заданий, реального пробега по «спутниковому электронному спидометру», соблюдения режимов труда и отдыха;

- планирование заданий и формирование маршрутов движения, графиков работ по маршрутам, оперативное перераспределение автотранспорта и уборочной техники, выделение автотранспорта и техники под оперативные задачи с учетом фактического времени окончания работ по плановым заданиям;

- анализ и учет работы уборочно-транспортных агрегатов и его основных показателей.

Передача информации с блоков сбора данных уборочно-транспортных комплексов на диспетчерский пункт может осуществляться двумя способами в зависимости от региона использования системы и покрытия данного региона сетью сотовой связи GSM.

Особенности интеллектуальных систем в техническом сервисе

Развитие интеллектуальных систем ТО является следствием развития автоматизации управления ТО на основе широкого использования информационных технологий.

Информационная система управления ТО включает три уровня [30]:

1) сбор данных – осуществляется путем мониторинга основных показателей, характеризующих состояние контролируемой машины;

2) аналитическая обработка данных – проводится в автоматизированном режиме с помощью методов статистической обработки, математического моделирования, нечеткой логикой, экспертных систем, нейросетевых и генетических алгоритмов (все эти методы составляют базу современных технологий прогнозирования);

3) управление информацией – интеграция и актуализация потоков информации, согласование внутренней информации ремонтного предприятия с информацией, поступающей от других организаций, в частности, консалтинговых служб, информационных агентств и др.

Интеллектуальные системы находят наибольшее применение в диагностическом обслуживании, которое осуществляется в сочетании с телематикой, основанной на использовании сенсоров (рис. 2.1), благодаря чему обеспечивается глубокое проникновение в особенности работы машин и, как следствие, оптимизация процедур обслуживания с целью повышения работоспособности машин [31].

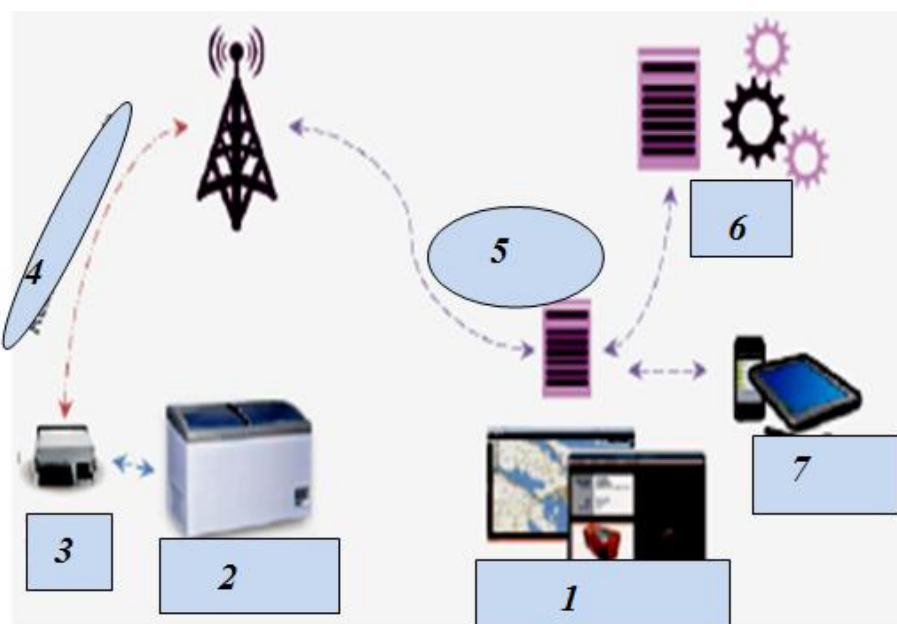


Рис. 2.1. Система диагностического обслуживания, использующая сенсоры и телематику

1 – центр контроля и управления, 2 – внутренние сенсоры, 3 – внешние сенсоры, 4 – поток данных сенсоров в реальном времени, 5 – сбор данных, 6 – аналитическая обработка данных, 7 – удаленное управление

Сенсоры, с помощью которых осуществляется диагностическое обслуживание, устанавливаются на удаленных машинах (мобильных или стационарных). Они передают потоки данных об условиях функционирования машин на станцию контроля, которая затем анализирует их в реальном времени, используя методы упреждающего анализа, и

выявляет проблемы в поведении машин. При обнаружении таких проблем выполняются соответствующие действия, направленные на то, чтобы уведомить оператора о необходимости принятия корректирующих мер.

Станция контроля может работать в той же коммуникационной сети, что и сенсоры. Она также может быть соединена с сенсорами через глобальную сеть или посредством спутниковой связи.

Сенсоры в системе диагностического обслуживания выполняют следующие основные измерительные процедуры [31]:

1) контроль температуры: тепловые индикаторы, такие как термочувствительные краски или термографы, помогают определять потенциальные повреждения, вызываемые изменениями температуры оборудования; типичные проблемы, которые могут определяться с помощью данного вида измерений: чрезмерное трение, теплообмен, плохие электрические соединения;

2) контроль движения: методы спектрального анализа, а также анализа импульсных ударных воздействий позволяют определять энергию, излучаемую оборудованием в форме волн, вибрации, импульсов и акустических эффектов; типичные проблемы, которые могут определяться с помощью данного вида измерений: износ и разрыв, разбалансировка, несоосность, смещения, внутренние повреждения поверхности.

3) анализ жидкостей: ферроанализ и счетчики частиц-загрязнителей обеспечивают контроль состояния различных масел (смазочных, гидравлических, трансформаторных) и, как следствие, выявляют потенциальные проблемы, вызывающие износ и повреждение машин; типичные проблемы такого рода: загрязнение масел, неподходящая консистенция и ухудшение их качества (при этом контролю подлежат внешний вид и вязкость масел, наличие примесей, загрязнений, растворенных газов и другие параметры);

4) контроль коррозии: методы коррометрии позволяют определять площадь распространения коррозии, ее скорость и состояние (активная или пассивная коррозия) для материалов, используемых в машинах;

5) неразрушающий контроль: основан на рентгеновских, ультразвуковых и других методах неразрушающего контроля, обеспечивающих определение роста потенциальных аномалий в машинах, в том числе в условиях их эксплуатации.

6) электрические испытания: высоковольтные испытания, анализ мощных сигналов и другие методы электрических испытаний позволяют определять изменения таких свойств компонентов машин, как электрическое сопротивление, индуктивность, диэлектрическая прочность и другие; типичные проблемы, которые могут определяться с помощью данного вида контроля: ухудшение электрической изоляции, повреждение электрических проводников двигателя и др.

После того как все измерительные процедуры завершены, следует определить, что в поведении машины является приемлемым, и что аномальным. С учетом того, что диагностическое обслуживание является

дорогостоящим, его целесообразно проводить в тех случаях, когда затраты, связанные с последствиями аномалий, гораздо больше, чем стоимость обнаружения этих аномалий.

При проведении диагностического обслуживания важно установить частоту выполняемых измерений. При этом следует учитывать тот факт, что большинство повреждений оборудования не случаются внезапно и часто можно определить их на финальной стадии их развития. Если становится ясным, что какие-либо части машины находятся на финальной стадии развития повреждений, то имеется возможность предотвратить эти разрушения полностью или избежать их последствий.

Характер развития повреждения в процессе функционирования большинства машин показан на рис. 2.2 [31]. В ходе работы, спустя какой-то период времени, машина входит в фазу потенциального отказа (П) и начинают проявляться ранние признаки износа и разрушения или иного стрессового поведения и, если не принять соответствующих мер, то, в конце концов, наступит полный функциональный отказ (Ф). Как правило, интервал между точками П и Ф достаточно большой, что позволяет своевременно установить и предотвратить разрушение.

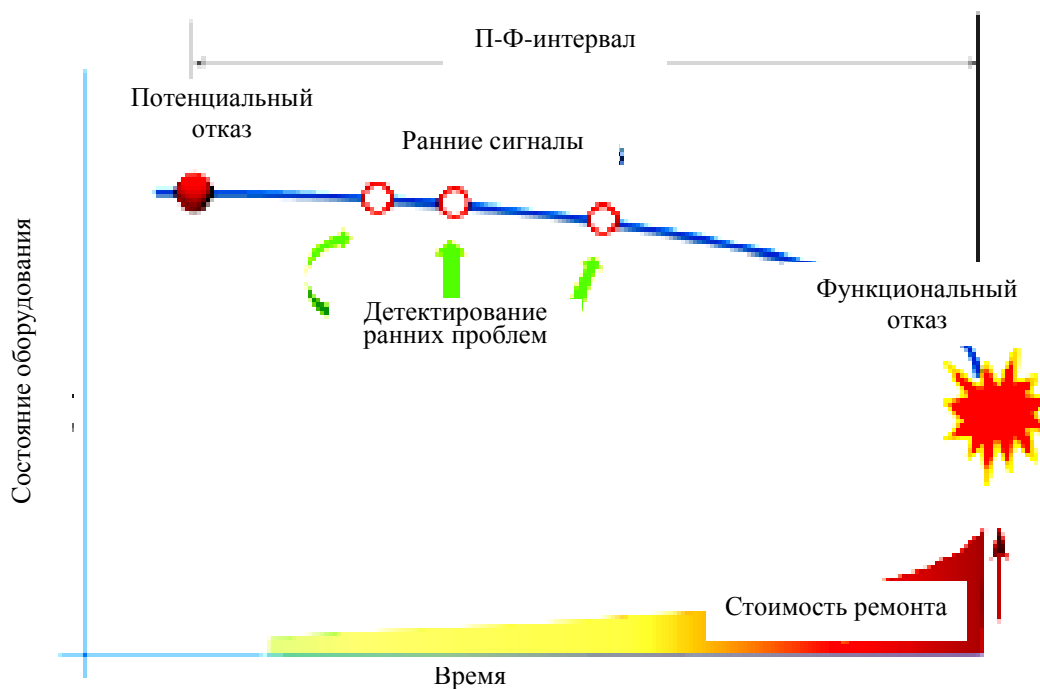


Рис. 2.2. Развитие повреждения в процессе функционирования машины

При разработке экономически эффективной стратегии диагностического обслуживания желательно, чтобы П–Ф-интервал был, по возможности, максимальным. Он может составлять часы или дни, недели или месяцы в зависимости от сложности машины. Однако независимо от длительности П–Ф-интервала система диагностического обслуживания должна быть способной определить ранние сигналы после момента П и ответить на них до

момента Φ . Ответные действия обычно включают ряд шагов и должны осуществляться в пределах П– Φ -интервала.

В пределах каждого такого интервала система диагностического обслуживания собирает данные от сенсоров и использует один из следующих методов для определения состояния машины, подвергаемой мониторингу [31]:

- трендовый анализ (сравнение значений одного и того же показателя за несколько периодов времени для выявления основной тенденции изменения показателя);

- распознавание образов (установление соотношения между определенными типами повреждений и конкретными повреждениями машины);

- критические интервалы (проверка наличия данных в пределах критических интервалов);

- статистический анализ процесса (данные о существующих повреждениях подвергаются аналитическим процедурам, чтобы найти точную модель кривой разрушения, и новые данные сравниваются с этой моделью для идентификации какого-либо потенциального повреждения).

Системы диагностического обслуживания машин, построенные на основе использования сенсорного мониторинга в реальном времени и телематических технологий, обладают высокой гибкостью и обеспечивают значительные экономические выгоды. Основные преимущества диагностического обслуживания по сравнению с традиционными видами ТО: удаленный сенсорный мониторинг и сбор данных, обработка сенсорных данных в режиме реального времени, упреждающий анализ.

Типичная архитектура системы удаленного контроля и диагностики машин включает три основные части: модуль получения и обработки данных, модуль представления данных и сайт клиента [32].

Модуль получения и обработка данных включает программу, которая анализирует данные с приборов удаленного контроля (сенсоров), веб- или видеокамер, микрофонов, усилителей или формирователей сигналов, карт приема данных-карт и т. д. Сенсоры собирают текущие вибрационные сигналы с контролируемых машин и затем передают собранные сигналы на усилители. Усилители переводят сигналы в приемлемый формат, так что карты приема данных могут преобразовывать их в цифровые сигналы для дальнейшего анализа дефектов. Диагностическая программа на сервере анализирует цифровые сигналы и затем определяет состояние контролируемой машины.

Работа системы основана на использовании Интернет-технологий и мобильных коммуникационных технологиях. Система работает на языке XML, служащем для шифровки диагностических данных. Система представляет данные не только в WEB (Интернет-пространство), но и в WAP (Wireless Application Protocol – беспроводной протокол передачи данных, созданный специально для сетей GSM, где нужно устанавливать связь портативных устройств, таких как мобильные телефоны, пейджеры,

устройства двусторонней радиосвязи, смартфоны и другие терминалы, с Интернет). Пользователи могут проверять состояние машины, включая данные, изображение и видео, через Интернет и мобильные терминалы. Автоматический компонент тревоги, разработанный на основе оперативной системы Microsoft Smartphone, может активно посылать тревожные сообщения на мобильные телефоны операторов о том, что состояние машины ненормальное.

Основным назначением диагностики машин является повышение их надежности путем раннего обнаружения дефектов, оптимизации рабочих процессов и технического обслуживания. Однако существующие системы диагностирования не способны адаптироваться к изменению внешних условий и внутреннего состояния объекта диагностирования. Поэтому в последнее время особое внимание уделяется совершенствованию систем диагностирования на основе нейросетевых методов моделирования многомерных зависимостей как перспективному направлению развития искусственного интеллекта. Интеллектуальная диагностика позволяет решать широкий круг задач, однако теория и методы создания интеллектуальных систем еще до конца не построены [33].

Интеллектуальная диагностика представляет собой совокупность средств, позволяющих строить надежные и адекватные модели диагностируемых сложных технических объектов и процессов по экспериментальным данным, обладающих способностью адаптироваться к изменениям во внешней и внутренней средах диагностируемого объекта (процесса), что достигается обучением (переобучением) [33]. Инструментальным базисом для осуществления интеллектуальной диагностики является теория распознавания образов и методы нейроинформатики. Основная задача интеллектуальной диагностики – быстрое распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации.

Алгоритмы распознавания в технической диагностике основываются на диагностических моделях, устанавливающих связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве диагностических сигналов [33]. Важная часть проблемы распознавания – правила принятия решений (решающие правила). Решение задач диагностики (отнесение изделий к исправным или неисправным) связано с рисками ложной тревоги или пропуска цели, поэтому для принятия обоснованного решения целесообразно привлекать методы теории статистических решений. Кроме того, решение задач диагностики связано с прогнозированием надежности, поэтому принимаемые решения должны основываться на моделях отказов, изучаемых в теории надежности.

Процесс интеллектуального диагностирования состоит из ряда этапов, выполнение которых позволяет получить математическую модель объекта или процесса, необходимую для осуществления диагностических мероприятий. Схема поэтапного процесса интеллектуального диагностирования показана на рис. 2.3 [33].



Рис. 2.3. Схема процесса интеллектуальной диагностики

2.2. Интеллектуальные системы технического сервиса

2.2.1 Сельскохозяйственные машины

Дистанционная диагностика сельскохозяйственных машин

Одним из основных направлений интеллектуализации ТО сельскохозяйственных машин, служащих для выполнения полевых работ, является разработка систем дистанционной диагностики их технического состояния на основе использования информационных технологий и устройств телематики. Особенно эффективным является комплексный подход к управлению работающими на поле сельскохозяйственными машинами, при котором работники сельхозпредприятий получают возможность, не выходя из кабинета, отслеживать в реальном времени все аспекты функционирования машин – не только их техническое состояние, но также местоположение, расход топлива, производительность, текущий объем выполненных полевых работ (например, намолот). Все это осуществляется путем анализа соответствующей информации, поступающей по беспроводным каналам связи от машин на офисный компьютер и отображающейся на его экране.

Такого рода подход к управлению сельскохозяйственными машинами реализован фирмой Claas в системе ClaasTelematics (рис. 2.4) [34]. Установленный в машине сенсорный модуль собирает требуемые данные (в том числе GPS) и с помощью мобильной связи отправляет их на сервер Telematics. Таким образом, ремонтно-техническая служба сельхозпредприятия может провести первичный удаленный анализ технического состояния машин, оперативно определить причины сбоев в

работе машин, провести соответствующие подготовительные работы и в кратчайшие сроки оказать помощь на месте.

Фирмой Claas также разработано программное обеспечение UT App [35]. Оно предназначено для iPad или планшетов на базе Android, которая превращает их в терминал ISOBUS для управления машинами. Таким образом, с помощью обычного планшета можно удаленно контролировать работу машин, в том числе осуществлять диагностику их технического состояния.

Компания John Deere предложила систему удаленного доступа к терминалам сельскохозяйственных машин Remote Display Access, пользуясь которой специалист по обслуживанию машин может видеть на дисплее компьютера, находящегося в офисе сельхозпредприятия, то же самое, что видит комбайнер или тракторист на дисплее компьютера, который установлен на машине и управляет ее рабочими органами [34]. Благодаря этому он может оказать оператору машины своевременную помощь в настройке узлов машины, исправить ошибки программного обеспечения, а также дать рекомендации по проведению полевых работ, например, по внесению удобрений или средств защиты растений.

Сравнительно новым продуктом деятельности компании John Deere является система интеллектуального управления сельскохозяйственным производством John Deere FarmSight, призванная содействовать оптимизации работы машин и сельхозпредприятий [36]. Система предусматривает широкое применение беспроводной связи на земельных и животноводческих фермах. Она соединяет в единую сеть машины, операторов и владельцев в интересах повышения эффективности производства за счет совместного пользования информацией.

Телематическая система Link Ultimate компании John Deere осуществляет дистанционный контроль местоположения машины и расхода топлива, а также дистанционную диагностику и планирование предупредительного ТО или ремонта. При этом машина автоматически генерирует и посылает сообщения по электронной почте или мобильному телефону (SMS) при возникновении потребности в ТО или ремонте. Благодаря применению такой системы повышается эффективность диагностирования и устранения неисправностей машин и, как следствие, снижается простой машин.

Практическая реализация дистанционной диагностики сельскохозяйственных машин в режиме реального времени сопряжена с рядом трудностей, обусловленных большой номенклатурой различных по исполнению машин, низкой приспособленностью машин к контролю, разнообразием физических величин контроля, значительной вариацией режимов работы и состояния машин [37].

Так, из диагностических параметров тракторных дизелей целесообразно достоверно и непрерывно контролировать следующие:

– текущий расход топлива, например, по динамике снижения зеркала топлива в баке или уменьшения давления столба топлива на придонный датчик;

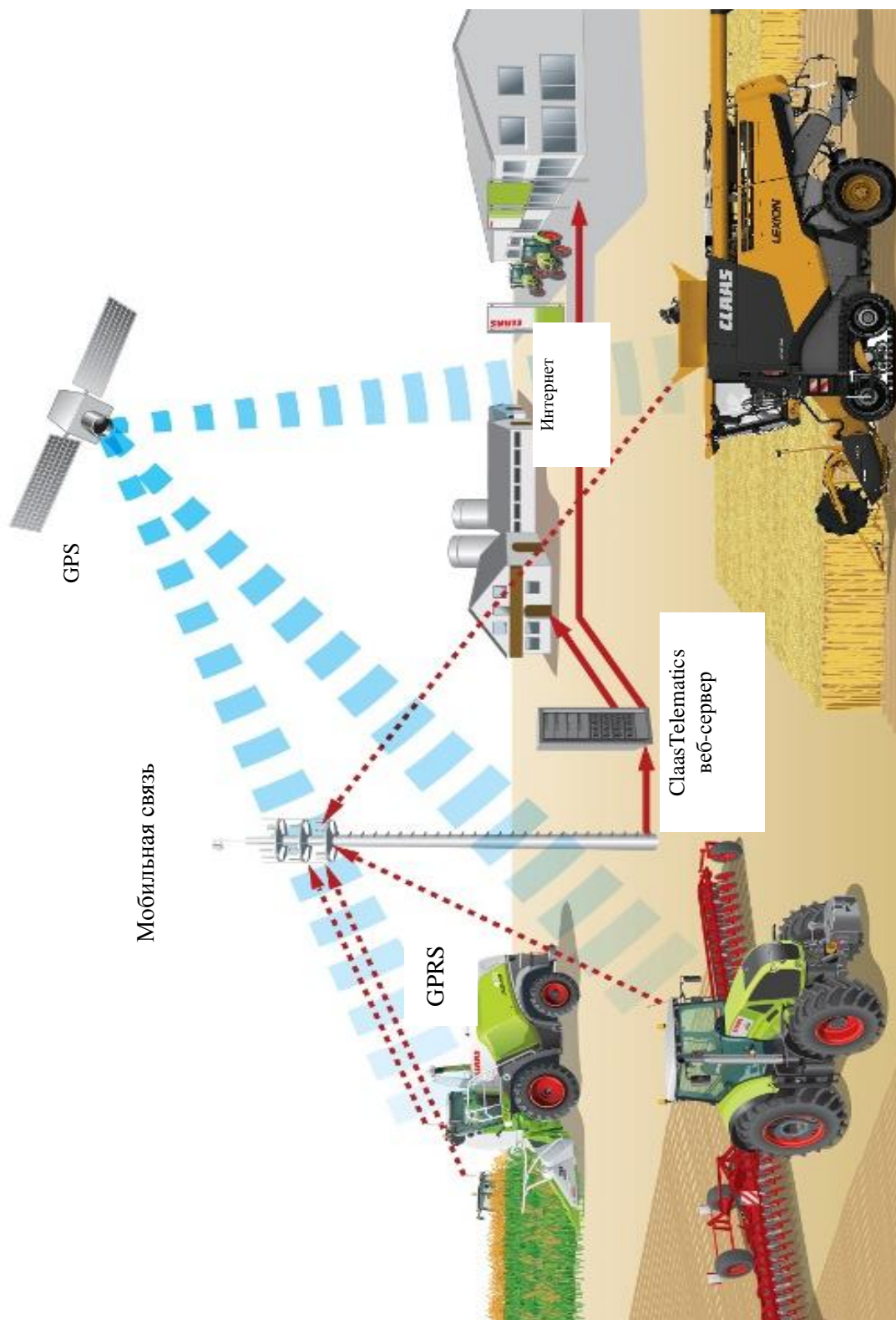


Рис. 2.4. Система управления сельскохозяйственными машинами ClaasTelematics

- эффективную мощность, например, по расходу топлива с корректировкой на плотность топлива и эффективный КПД дизеля;
- параметры картерных газов (температура, пульсации давления на микрофон);
- оптическую плотность, удельное сопротивление, обводненность масла;
- цвет, уровень звука и температуру отработавших газов;
- давление наддува турбокомпрессором и разрежение за воздухоочистителем;
- виброускорения на блоке цилиндров в зонах газораспределительного механизма и коренных подшипников.

При разработке системы дистанционной диагностики сельскохозяйственных машин следует учитывать определенные требования [37]. Контроль технического состояния машин в режиме реального времени должен охватывать основные параметры функционирования узлов, в том числе ресурсные параметры, а также показатели выполнения полевых работ. В бортовой системе контроля должны накапливаться сигналы о совместной работе тракторов и агрегированных с ними сельхозмашин, другие технико-эксплуатационные данные для автоматического диагностирования машин с выдачей рекомендаций о проведении ТО по фактической потребности. Также необходимо принять меры по оснащению тракторов и мобильных сельхозмашин системой датчиков и нормативов для контроля функционирования их узлов и рабочих органов.

По мере реализации предупредительной диагностики с использованием мониторинга в системе ГЛОНАСС/GPS могут быть предложены мероприятия по модернизации всей системы технического сервиса машин АПК, благодаря чему станет возможным вести историю технического состояния машин за весь жизненный цикл от ввода в эксплуатацию до утилизации.

Для моделирования процессов принятия решений при эксплуатации современных сельскохозяйственных машин нового, интеллектуального типа разработан метод организации ТО, отличительной особенностью которого является использование эвристик и нечетких знаний [38].

Данный метод основан на использовании экспертных систем. Моделирование процессов принятия решений при технологической регулировке и поиске неисправностей основано на теории искусственного интеллекта и теории нечетких множеств. Практическая реализация этих процессов связана с решением задач по проектированию экспертных систем, а именно: по разработке информационно-логической модели предметной области; разработке архитектуры экспертной системы; формировании базы знаний экспертной системы; создании программных средств.

Экспертная система работает в двух режимах: приобретение знаний и решение задачи. В режиме приобретения знаний формируется база знаний. При этом главная роль отводится входящему в состав системы блоку приобретения знаний, который реализуется как самостоятельная программа, позволяющая эксперту в автоматизированном режиме формировать базу знаний, в том числе дополнять, удалять и редактировать знания.

В режиме решения задачи в системе включаются в действие следующие блоки:

- диалоговый блок ввода информации обеспечивает естественно-языковой интерфейс с пользователем;
- блок поиска причин неисправностей содержит перечень возможных неисправностей и методов их устранения;
- блок настройки содержит описание технологических регулировок рабочих органов для различных условий функционирования;
- блок анализа ситуации содержит описание условий уборки;
- блок поиска причин появления отклонений показателей качества технологического процесса от допустимых значений содержит перечень возможных отклонений и методов их устранения;
- блок механизмов вывода формирует решение задачи на основе текущей информации, полученной от пользователя (либо от датчиков), правил и фактов о предметной области;
- блок объяснения решений позволяет разъяснить пользователю, каким образом получено то или иное решение, какие правила и почему при этом использовались;
- блок синтеза ответа является конечным звеном в работе экспертной системы;
- блок обучения включает подсистемы мультимедиа для наглядного представления протекающих процессов и устройства различных элементов систем и агрегатов комбайна.

Главное преимущество построения экспертной системы заключается в компактном и адекватном представлении реальных ситуаций функционирования уборочных машин. Система обеспечивает возможность учета признаков внешней среды, параметров технического машины и показателей качества работы.

Технический сервис молочно-доильного оборудования

Процесс ТОиР молочно-доильного оборудования включает следующие этапы [39]:

- определение зависимости скорости молокоотдачи от технических параметров оборудования с учетом типа и конструктивных особенностей оборудования, а также физиологических параметров коровы (давление молока в вымени, обхват вымени, глубина вымени, разовый удой и индекс вымени);
- разработка плана ТОиР оборудования на основе результатов технического осмотра согласно методике прогнозирования ресурса узлов оборудования;
- проведение ТОиР оборудования, необходимых для восстановления узлов оборудования и его технических параметров.

При проведении ТОиР оборудования следует руководствоваться следующими положениями:

– исходя из требования повышения эффективности машинного доения, скорость молокоотдачи должна быть максимальной, что возможно при соблюдении оптимальных значений технических параметров оборудования.

– при эксплуатации оборудования его технические параметры со временем изменяются, поэтому оценка технического состояния оборудования должна проводиться периодически.

– технический осмотр оборудования следует проводить только с использованием специального комплекта контрольно-измерительных приборов, которые должны работать в динамическом режиме.

Современные средства диагностики молочно-доильного оборудования, выпускаемые ведущими фирмами (DeLaval, GEA и др.), способны определять регламентированные международными стандартами основные технические параметры оборудования, однако их стоимость довольно высока. В связи с этим в Институте механизации животноводства НАН Украины предложен приборный комплект для контроля технических параметров молочно-доильного оборудования, включающего блок питания, клавиатуру управления, цифровой индикатор, датчики давления и датчик расхода воздуха, которые соединены с автоматизированной системой управления [39]. Автоматизированная система управления представляет собой микроконтроллер с аналого-цифровым преобразователем и внешним запоминающим устройством. Цифровой индикатор выполнен в виде графического LCD-дисплея (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Общий вид комплекта приборов для контроля технических параметров молочно-доильного оборудования

Также разработана методика прогнозирования ресурса вакуумной системы молочно-доильного оборудования, которая вошла в состав программного пакета «Altviewer 1.0», предназначенного для отображения и автоматической обработки результатов измерений технических параметров оборудования, осуществляемых с помощью разработанного комплекта контрольно-измерительных приборов. Разработанный программный пакет, методика прогнозирования ресурса и приборный комплект применяются на практике для проведения ТО молочно-доильного оборудования (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Применение комплекта приборов для контроля технических параметров молочно-доильного оборудования в производственных условиях

2.2.2 Транспортные машины

В АПК широко применяется автомобильный транспорт, который представляет собой довольно сложную технику, характеризующуюся высокой степенью автоматизации и компьютеризации [40]. В современных автомобилях создан ряд нетрадиционных для автомобиля еще в недалеком прошлом систем автоматического управления, таких, как электронная система управления двигателем, электронная система управления трансмиссией, антиблокировочная система, система автоматического контроля пробуксовывания и другие. Главной особенностью таких систем является обязательное наличие в их составе электронного блока, который управляет всеми остальными составными частями системы.

Включение в конструкцию автомобиля сложных электронных устройств управления различными системами на базе бортового компьютера привело к необходимости развития различных форм и методов оказания услуг по диагностике, ремонту и настройке компонентов бортовой электроники на этапе эксплуатации автомобиля [41].

В последние годы особенно большое распространение получила компьютерная диагностика автомобиля – комплексная проверка электронных устройств и исполнительных механизмов автомобиля на наличие в них неисправностей с целью их последующего устранения. В процессе эксплуатации автомобиля важная роль отводится бортовым системам самодиагностики.

Компьютерная диагностика автомобиля

Компьютерная диагностика может проводиться непосредственно на автомобиле (на открытых площадках), а также в сервисных центрах и мастерских по ремонту автомобилей, цехах, отделах технического контроля и лабораториях производственных предприятий [40]. Для обеспечения

контроля работы систем на автомобиле в дорожных условиях, например при обкатке автомобиля, обычно используется персональный компьютер (ноутбук).

Принято выделять следующие основные стадии компьютерной диагностики [40]:

- создание и передача под управлением персонального компьютера через диагностический интерфейс (адаптер), выполненный в соответствии со стандартом ISO 9141, электрических сигналов, инициализирующих связь с конкретным электронным блоком;

- прием информации от электронного блока, поступающей по диагностическому каналу;

- преобразование информации в сигналы стандарта RS 232C;

- обработка полученных данных по заданной программе и отображение результатов на экране персонального компьютера.

Диагностическая программа позволяет получать информацию о текущих неисправностях системы, если они имеются, а также о тех неисправностях, которые были ранее, но в данный момент отсутствуют. Кроме того, с ее помощью могут быть получены сведения о номере электронного блока, его изготовителе и дате изготовления, версии программного обеспечения, дате последнего изменения параметров.

С электронного блока системы управления двигателем могут быть считаны данные об общей наработке двигателя (суммарное число полных оборотов коленчатого вала, моточасы работы), об общем пробеге автомобиля и пробеге после последнего ТО и т. д. Обычно в автомобиле компьютерной диагностике подвергаются двигатели (бензиновые и дизельные), а также разнообразные электронные системы: система удержания при столкновении, антиблокировочная система, система курсовой устойчивости, парковочный ассистент, пневматическая или гидравлическая система регулирования дорожного просвета, система контроля давления в шинах, климатическая установка, коммуникационная система и др.

Особое внимание отводится компьютерной диагностике двигателя автомобиля (рис. 2.7) [42], которая состоит из следующих операций:

- считывание кодов неисправностей из памяти электронного блока управления двигателем;

- анализ считанных кодов неисправностей;

- проверка параметров работы датчиков при помощи диагностического компьютера;

- проверка формы сигналов датчиков при помощи осциллоскопа;

- тестирование исполнительных механизмов;

- диагностика системы зажигания бензинового двигателя;

- проверка топливного давления;

- электронный замер компрессии;

- механический замер компрессии;

- визуальный осмотр свечей зажигания и воздушных фильтров;

- заполнение электронной формы результатов диагностики.



Рис. 2.7. Компьютерная диагностика двигателя в сервисном центре

Вибродиагностика автомобиля

Одним из путей повышения эффективности диагностирования автомобилей является совершенствование используемых в целях диагностики методов неразрушающего контроля, в частности, виброакустического метода, основанного на косвенных виброакустических признаках неисправностей [43].

Преимущество использования косвенных параметров при диагностировании состоит в их доступности, а также в технической простоте, поскольку контроль косвенных параметров не требует разборки механизмов и может осуществляться с минимальными подготовительными операциями. Однако обработка результатов косвенных измерений требует детального анализа получаемой при этом информации, систематизации и комплексной оценки всей совокупности диагностических данных.

Виброакустический метод диагностирования хорош тем, что позволяет определять дефекты автомобиля дистанционно. Однако, несмотря на длительную историю своего развития, этот метод применительно к автомобилям до недавних пор характеризовался сравнительно невысокой степенью объективности. Дело в том, что механизмы автомобиля издают широкий спектр звуков, колеблющиеся поверхности корпусных деталей распространяют акустические волны в примыкающей к ним окружающей среде – как в воздухе, так и в других деталях автомобиля. Поэтому распознать и правильно интерпретировать информативный сигнал на фоне значительных помех, определить его параметры и сделать правильный прогноз – довольно сложная задача даже для высококвалифицированного специалиста.

Возможности вибродиагностики могут быть значительно расширены благодаря использованию современных программно-аппаратных средств. Однако эти средства не в состоянии полностью заменить субъективные ощущения эксперта. Поэтому представляется перспективным применение комбинированных экспертных систем, в которых эксперт и программно-аппаратные средства взаимно дополняют друг друга.

С целью повышения эффективности таких систем практически важно установить закономерности, связывающие субъективно воспринимаемые «на слух» и объективно отображаемые виброакустические сигналы с параметрами технического состояния автомобиля [43]. Для решения задач формализации трудно вербализуемых (интуитивных или нечетких для самого эксперта) представлений предлагаются следующие пути:

- учет в базе знаний интуитивных представлений эксперта, например, проявляющихся в форме ассоциаций;
- отображение в формализмах базы знаний степени уверенности эксперта в сообщаемых представлениях;
- отражение на входе системы того, что можно характеризовать термином «сомнения» в воспринимаемых экспертом объективных и/или субъективных признаках.

Для того чтобы улучшить возможности учета сложных взаимосвязей признаков, которые в явной или неявной субъективной форме принимаются во внимание экспертами в процессе диагностирования, перспективно использовать современные экспертные системы, основанные на теории нечетких множеств.

Степень практической применимости вибродиагностики автомобилей, ее достоверность и содержательность могут быть существенно повышены по мере развития компьютерных методов преобразования и обработки виброакустических сигналов, все более широкого использования компьютерных средств для сбора и анализа информации, а также экспертных систем, создаваемых на их основе.

В большинстве случаев при диагностировании решения принимаются в условиях закономерной неопределенности, в среде нечетких знаний. Поэтому дальнейшее совершенствование техники диагностирования связано с использованием нечетких лексических переменных в рамках нечеткой логики [44]. В отличие от традиционных математических методов, требующих на каждом шаге моделирования точных и однозначных формулировок закономерностей, нечеткая логика предлагает иной вид мышления, при котором моделирование происходит на более высоком уровне абстракции. Большие возможности и простота реализации нечеткой логики как методологии решения проблем диагностирования предопределяют ее успешное перспективное использование.

Бортовые системы диагностики

Главной задачей бортовой диагностики является определение изменений параметров электрооборудования (электронных систем) автомобиля с учетом их влияния на его работу. Для этого каждая электронная система имеет разъем для присоединения диагностической аппаратуры или же имеет выход на центральный пункт бортовой диагностики – бортовой компьютер. Для бортовой диагностики электронных систем применяют испытательное специальное оборудование, созданное с возможностью совмещения с бортовой системой диагностики.

Наличие большого числа электронных устройств в автомобиле, от работы которых сильно зависит работа автомобиля в целом, обуславливают необходимость ужесточения требований к их надежности, что, в свою очередь, заставляет уделять повышенное внимание вопросам их технического обслуживания, прежде всего, диагностики их технического состояния. Наиболее эффективный путь решения этих вопросов – наделение электронных устройств функциями самодиагностики [14, 41].

Бортовые системы самодиагностики, которыми оснащаются электронные устройства современных автомобилей, не только снабжают водителя сведениями о работе автомобиля в целом, но также информируют его о возникающих неисправностях узлов и агрегатов, отслеживают межсервисные интервалы, напоминая о необходимости своевременно пройти ТО автомобиля.

Так, на приборном щитке автомобилей обычно имеется многофункциональный индикатор – лампочка CheckEngine, которая загорается при включении зажигания и гаснет, спустя некоторое время после запуска двигателя [45]. Если в результате самодиагностики обнаруживаются неисправные компоненты, то индикатор не погасает. Индикатор также загорается при возникновении некоторых неисправностей во время движения. Если имеют место мелкие, возникающие однократно неисправности, то индикатор может погаснуть, сохранив при этом данные о неисправностях в памяти для последующего считывания.

К основным функциям бортовых систем самодиагностики относятся [14]:

- контроль работы наиболее сложных узлов, прежде всего, двигателя;
- контроль технического состояния узлов и деталей, подвергающихся особому риску в случае появления неисправностей (например, функция защиты каталитического нейтрализатора заключается в реагировании на пропуски зажигания в двигателе путем отключения подачи топлива в неисправный цилиндр для предотвращения перегрева нейтрализатора);
- контроль аварийных ситуаций (например, при выходе из строя датчика нагрузки, определяющего массовый расход воздуха, генерируется сигнал его замены – по результатам контроля частоты вращения коленчатого вала и положения дроссельной заслонки).

Бортовые системы самодиагностики обеспечивают хранение информации о контролируемых параметрах и выявленных неисправностях.

В последние годы в автомобилях получают все большее распространение интеллектуальные датчики, которые имеют собственные встроенные микропроцессорные устройства для первичной обработки сигнала, например для аналого-цифрового преобразования, амплитудно-частотного анализа, интегрирования или внесения поправок с учетом характеристик датчика. При этом большое значение имеет возможность предсказания поведения исследуемой системы на как можно большем отрезке времени. Особое значение в алгоритмах предсказания имеет проблема раннего обнаружения начала опасного или аварийного развития событий путем выявления и регистрации сбойных состояний.

В этой связи приобретает особую важность совершенствование методов диагностирования различных датчиков указанного типа [46]. Это обусловлено в основном двумя обстоятельствами: интеллектуализацией процесса диагностирования и обнаружением отклонений характеристик датчиков на ранних стадиях возникновения, связанных с их скрытыми дефектами, проявляемыми, например, в виде сбойных и предсбойных состояний. Одним из путей решения данной проблемы является использование методов программно-алгоритмического контроля, получивших распространение в последнее время из-за широкого внедрения микропроцессорной техники в автомобильный транспорт.

Диагностика сбоев элементов автомобильной электроники

Современный автомобиль оснащен разнообразными мехатронными системами, которые в своем развитии имеют тенденцию к миниатюризации. В частности, наблюдается увеличенное использование интеллектуальных микроэлектронных автомобильных датчиков. Развитие элементной базы, усложнение программного обеспечения решаемых задач и ужесточение условий эксплуатации автомобилей требует совершенствования методов повышения их надежности. В этой связи повышенное внимание уделяется различным интеллектуальным системам для определения работоспособности электронных устройств автомобиля. В частности, все большее распространение получают интеллектуальные датчики, имеющие собственные встроенные микропроцессорные устройства для первичной обработки сигнала, например для аналого-цифрового преобразования, амплитудно-частотного анализа, интегрирования или внесения поправок с учетом характеристик датчика [46]. Особое значение приобретают вопросы предсказания поведения исследуемой системы на как можно больший отрезок времени, в частности, разработка методов раннего обнаружения начала опасного или аварийного развития событий посредством выявления и регистрации сбойных состояний. При этом ведущая роль отводится базовому диагностированию микропроцессорной системы управления двигателем, прежде всего, различных датчиков, включая датчики потенциометрического типа как наиболее уязвимые вследствие наличия контактных соединений. Совершенствование методов диагностирования датчиков обусловлено интеллектуализацией процесса диагностирования и обнаружения отклонений характеристик датчиков на ранних стадиях их возникновения, связанных со скрытыми дефектами.

Одним из путей развития интеллектуальной диагностики автомобилей является использование методов программно-алгоритмического контроля, которые получили распространение в последнее время из-за широкого внедрения микропроцессорной техники автомобильный транспорт. В частности, в работе [46] предложено устройство для интеллектуальной диагностики сбоев автомобильных датчиков, содержащие бесконтактный датчик сбоев, установленный на двигателе параметрический датчик, блок совпадений, многоуровневый компаратор, блок определения задержки

сигналов и блок светозвукоиндикации, причем бесконтактный датчик сбоев соединен со входом микроконтроллера и блоком свето-звукоиндикации непосредственно, параметрический датчик совместно с выходом первого диагностируемого на «сбой» датчика – через блок совпадений (элемент «И»), а второй диагностируемый на «сбой» датчик – через последовательно включенные многоуровневый компаратор и блок определения задержек сигналов.

Интеллектуальное прогнозирование неисправностей

С появлением Интернета и беспроводных систем связи возникли существенные изменения в методологии проведения ТО, а именно: наметился переход от традиционного ТО, осуществляемому по принципу «выявление и устранение неисправности», к ТО, которое проводится по принципу «предсказание и предотвращение неисправности». Соответственно, появилась все возрастающая потребность в применении интеллектуальных средств, которые в большей мере отслеживают процесс ухудшения технического состояния эксплуатируемых машин, чем выявляют уже возникшие неисправности. Такое интеллектуальное прогнозирование рассматривается как перспективный системный подход к ТО, в рамках которого становится возможным не просто контролировать техническое состояние машин, но, что особенно важно, определять возможные изменения показателей технического состояния с течением времени, предсказывать риски неприемлемого поведения машин по мере их эксплуатации, выявлять детали и узлы машин, которые могут выходить из строя в первую очередь.

В Университете Цинциннати и Университете Мичигана (США) разработана интеллектуальная система Watch-dog Agent, предназначенная для контроля и прогнозирования технического состояния машин, которая позволяет количественно оценивать техническое состояние основных деталей и узлов машин и предсказывать его возможное ухудшение [47]. Действие системы можно пояснить на примере стендовых испытаний подшипников (рис. 2.8). Четыре подшипника устанавливали на одном валу, который вращался с постоянной скоростью. На вал и подшипники налагалась радиальная нагрузка при помощи пружинного механизма. На корпусе каждого подшипника размещали высокочувствительные акселерометры. К внешнему кольцу каждого подшипника были прикреплены термоэлементы, регистрирующие температуру подшипников, по которой можно было судить о состоянии смазки. Магнитный коллектор собирал частицы износа из смазочного масла, наличие которых свидетельствовало о том, что имеет место процесс изнашивания подшипников. Испытания прекращались, когда количество собранных частиц износа достигало определенной величины.

Испытания показали, что в течение большей части времени работы подшипников в их материале идет накопление повреждений, в то время как период распространения трещин является относительно коротким.

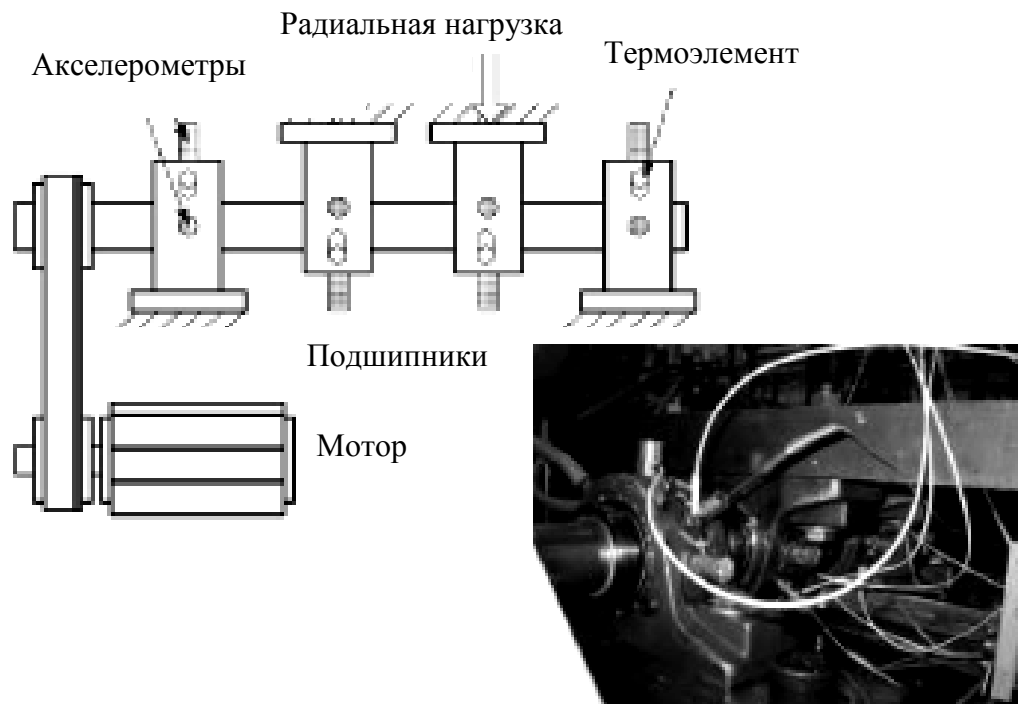


Рис. 2.8. Установка для испытания подшипников

На рис. 2.9, *а* показана волнообразная кривая сигнала, полученная от одного из подшипников на последней стадии испытаний.

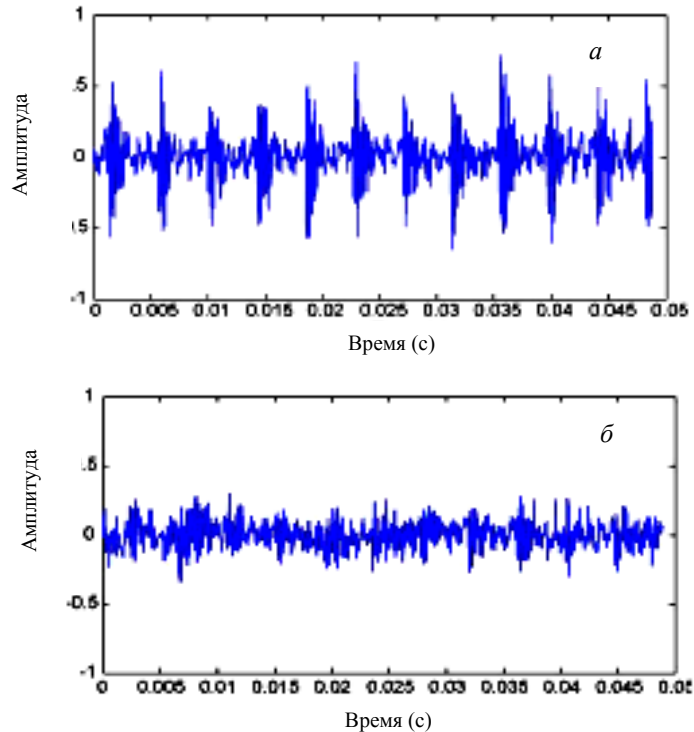


Рис. 2.9. Кривые сигналов от испытываемых подшипников

Сигнал представляет собой последовательность ярко выраженных импульсов, что обусловлено ударными воздействиями, генерируемыми

образующимися дефектами дорожки качения подшипника. Для сравнения на рис. 2.9, б показана кривая сигнала, полученная от этого же подшипника на ранней стадии испытаний. На данной кривой импульсы весьма незначительны и практически перекрываются шумовым фоном.

Таким образом, если в традиционном ТО дефекты выявляются на завершающей стадии их развития – по фактам сбоев в работе машин, вызванных этими дефектами, то в интеллектуальном ТО, основанном на прогностическом подходе, дефекты выявляются на ранней стадии их развития, так что имеется достаточно времени для проведения ТО с целью предотвращения возможных сбоев.

2.3. Интеллектуальные материалы для технического сервиса [48]

Перспективным направлением создания такой техники является применение интеллектуальных материалов, что позволяет значительно упростить конструкцию соответствующих интеллектуальных устройств, повысить их надежность и расширить их функциональные возможности.

Интеллектуальные материалы – это разнообразные по химическому составу, структуре и агрегатному состоянию материалы, которые объединяет проявление свойств, значительно (обратимо или необратимо) изменяющихся в соответствии с изменяющимися условиями внешней среды, а также в силу особенностей их внутреннего строения. Такие материалы способны контролируемым образом реагировать на внешние и внутренние воздействия с целью обеспечения возможности выполнения ими определенных функций и, как следствие, обеспечения работоспособности изготовленных на их основе устройств в изменившихся условиях. Они также способны адаптироваться к новым условиям и самостоятельно регулировать степень своей реакции на новые условия в соответствии с уровнем их изменения.

Интеллектуальные материалы по виду выполняемых функций, определяющих их практическое применение, подразделяются на следующие типы:

- пассивные – материалы-сенсоры, которые способны реагировать на внешние или внутренние факторы, что позволяет их использовать для создания различных видов сенсоров (датчиков), устройств контроля и индикации;

- активные – материалы-актуаторы, которые, реагируя на внешние или внутренние факторы, способны оказывать непосредственное влияние на внешнюю среду или на свое строение и свойства, что позволяет их использовать для создания исполнительных устройств, выполняющих функции управления или регулирования, а также играющих роль приводных механизмов; особой разновидностью таких материалов составляют материалы-трансформеры, которые, реагируя на внешние факторы, способны их трансформировать, в частности, изменять параметры внешних воздействий, а также преобразовывать один вид энергии в другой, что позволяет их использовать для создания различных видов преобразователей.

Интеллектуальные материалы в ответ на действие внешних или внутренних факторов могут характеризоваться проявлением эффектов изменения размеров и формы, физических, химических, биологических или структурных свойств. В отдельную группу выделяются жидкофазные интеллектуальные материалы, которые могут особым образом изменять свое структурное состояние или характер своего поведения.

Значительным стимулом для совершенствования существующих и создания новых интеллектуальных материалов является развитие нанотехнологий. Многие интеллектуальные материалы имитируют свойства природных материалов или являются созданными на основе принципов, реализованных в живой природе. Такие материалы называются биомиметическими. Обращение к биологическим примерам, вдохновляющим ученых и инженеров к разработке новых материалов, обусловлено тем, что за миллиарды лет эволюции природа создала оптимальные живые конструкции, которые превосходят по эффективности конструкции, созданные человеком.

Существует большое разнообразие интеллектуальных материалов. Одни из них известны уже довольно давно, но в последние годы начали находить все более широкое использование в связи с развитием современной техники, другие – являются принципиально новыми, созданными в настоящее время. Все эти материалы характеризуются различным строением и свойствами, технологиями получения и сферами применения. Соответственно, для решения задач по их дальнейшему развитию необходимо основываться на научно-технических подходах, носящих междисциплинарный характер. Как следствие, специалистам, занимающимся проблемами интеллектуальной техники, необходимо владеть базовыми знаниями в области ряда смежных наук. В частности, специфическое распределение и уникальная интеграция сенсорных и актуаторных компонентов в интеллектуальных материалах и устройствах требуют при их разработке навыков комплексного решения сложных материаловедческих и конструкторско-технологических задач.

2.3.1. Интеллектуальные материалы для технической диагностики Контроль механических параметров

Для контроля различных механических параметров применяются пьезодатчики, действие которых основано на использовании *материалов с прямым пьезоэлектрическим эффектом*. Существует два основных типа пьезодатчиков: осевые (механическая сила действует вдоль оси поляризации) и гибкие (механическая сила действует перпендикулярно оси поляризации). В осевых датчиках в качестве пьезоэлементов используются пьезокерамические диски, кольца, цилиндры и пластины. К датчикам данного типа относятся датчики ускорения (акселерометры), датчики давления, датчики детонации, датчики разрушения и т.п. Гибкие датчики строятся на основе последовательных (слои керамики имеют противоположную направленность поляризации) и параллельных (направленность поляризации слоев керамики совпадает) пьезокерамических

биморфов. Среди датчиков данного типа наиболее распространены датчики силы и ускорения.

Пьезодатчики находят разнообразное применение в автомобилестроении. В состав конструкции автомобилей входят датчики поворота для определения угла положения дроссельной заслонки; датчики детонации для определения момента возникновения детонации в двигателях внутреннего сгорания; датчики уровня заправочных жидкостей; датчики давления для измерения давления в топливном баке с целью определения утечки топлива; датчики подушек безопасности; датчики скорости и т.п.

Для измерения деформаций и механических напряжений в деталях машин и механизмов служат тензодатчики, изготавливаемые из *тензорезистивных материалов*. Такие датчики также используются для измерения других механических величин (давления, силы, веса, деформации, крутящего момента, перемещения, ускорения, вибрации и др.), которые предварительно преобразуются в деформацию. Для измерения малых деформаций в твёрдых телах, а также давлений жидкостей и газов, когда требуется высокая чувствительность измерений, особенно эффективно применять магнитоупругие датчики, действие которых основано на использовании зависимости магнитных характеристик *магнитоупругих материалов* (например, пермаллоя 45%Ni+55 % Fe) от механических напряжений в них.

При изготовлении прецизионной контрольно-измерительной аппаратуры, например, динамометров стержневого типа, служащих для измерения величины механической силы, применяются *нелинейно-упругие материалы с эффектом Пойнтинга*. В преобразователях, предназначенных для измерения колебаний поверхностей твердых тел, используются электрострикционные материалы.

В разных отраслях промышленности, например, в автомобилестроении для измерения частоты вращения (антиблокировочная система, коробка передач, управление двигателем) и измерения угловой координаты (системы регулировка фар и сидений, рулевое управление) широко применяются магнитоиндуктивные датчики, в основе конструкции которых лежат *материалы с эффектом магнитосопротивления*.

Эти датчики представляют собой специальные резисторы, выполненные из тонкой пермаллоевой пленки, нанесенной на кремниевую пластину. При их изготовлении пленка помещается в сильное магнитное поле для ориентации магнитных областей в одинаковом направлении, определяя тем самым направление вектора намагничивания. Затем, при попадании во внешнее магнитное поле, перпендикулярное пленке, вектор намагничивания начинает вращаться или изменять угол, что, в свою очередь, меняет сопротивление пленки. Их перспективно применять в системах промышленной автоматики (робототехнические устройства), а также в системах навигации (определение положения объекта относительно магнитного поля Земли).

В последние годы УЗ локаторы начали использоваться в сельскохозяйственном машиностроении. Дело в том, что современные многорядные сеялки и многокорпусные плуги, имея большую ширину

захвата, не могут обеспечить для каждого рабочего органа одинаковую глубину погружения в почву, поскольку поверхность поля не является идеально ровной. УЗ локатор на основе пьезокерамических преобразователей, установленный на оси подвеса сельхозмашины, может измерять расстояние до грунта и с помощью бортового компьютера подавать управляющий сигнал на исполнительные механизмы навесного устройства трактора. Благодаря этому плуг или высевающие органы поднимаются и опускаются синхронно с изменением рельефа, обеспечивая оптимальную глубину вспашки и заделки семян.

Контроль расхода газовых и жидких сред

Для измерения расхода – объёма или массы газовой или жидкой среды, протекающей через прибор в единицу времени, используются специальные устройства контроля, называемые расходомерами. Они служат для контроля и учёта жидкости, пара или газа при их производстве, отпуске, потреблении и хранении, а также для регулирования технологических и теплоэнергетических процессов в автоматических системах контроля и регулирования. Различают расходомеры переменного и постоянного перепада давления.

К расходомерам переменного перепада давления относятся дифманометры, при использовании которых перепад давления в трубопроводе создаётся сужающими устройствами. В расходомерах постоянного перепада давления изменяется площадь проходного сечения, а перепад до и после него остаётся неизменным. Такого типа расходомеры выполняются с погружным поплавком или поршнем. В некоторых случаях, когда невозможно применять расходомеры, скорость потока измеряют с помощью напорных трубок, гидравлических вертушек и анемометров в нескольких точках трубопровода и вычисляют скорость потока в каком-либо его сечении, а объёмный расход определяют, умножая скорость на площадь сечения. В некоторых типах расходомеров используют индукционные, ультразвуковые, радиоактивные и др. методы измерений.

Особой конструкцией и принципом действия отличаются расходомеры, создаваемые на основе *материалов с эффектом Холла*. Принцип действия такого расходомера поясняется на рис. 2.10.

Магнитное поле создаётся постоянными магнитами, установленными на лопастях рабочего колеса, которое вращается потоком жидкости, протекающим по трубопроводу.

Датчик Холла считывает обороты колеса и выдает импульсы, которые считываются внешним устройством и таким образом измеряется расход жидкости. При этом каждое изменение магнитного потока через датчик соответствует некоторой порции жидкости или газа, прошедшей через трубопровод. В частности, в схеме, показанной на рис. 2.10, датчик выдаёт два импульса за один оборот колеса.

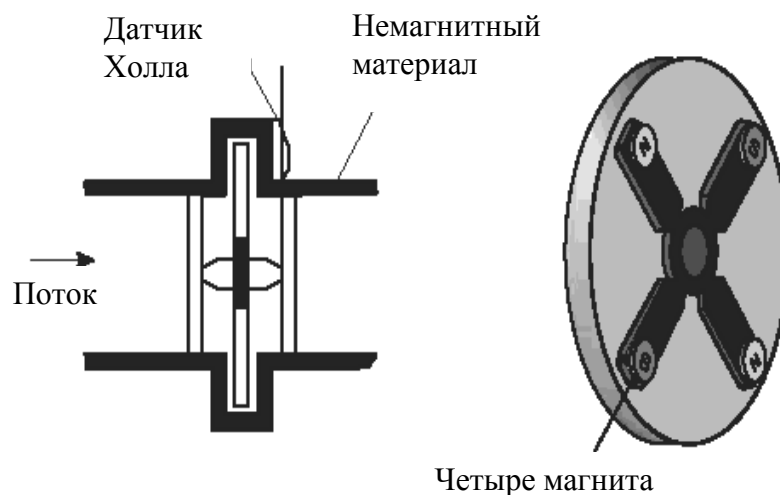


Рис. 2.10. Холловский датчик расхода

Для измерения скорости газовых и жидкостных потоков также применяются приборы, изготовленные на основе **терморезистивных материалов**. Если терморезистор нагревать проходящим через него электрическим током, то его температура будет зависеть от интенсивности теплообмена с окружающей средой. Но поскольку интенсивность теплообмена зависит от физических свойств газовой или жидкой среды (например, от теплопроводности, плотности, вязкости), в которой находится терморезистор, а также от скорости перемещения терморезистора относительно газовой или жидкой среды, то это позволяет использовать терморезисторы для измерения таких неэлектрических величин, как скорость, расход, плотность и др.

На рис. 2.11 показан возможный вариант применения металлического терморезистора в термоанемометре – устройстве для измерения скорости газового потока.

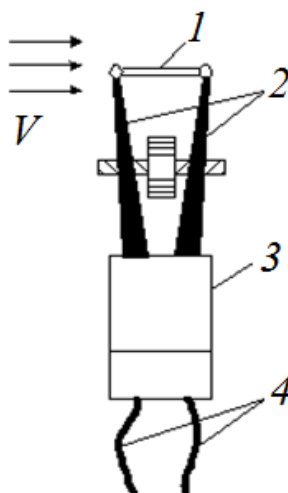


Рис. 2.11. Схема термоанемометра
1 – платиновая проволока, 2 – марганциновые стержни, 3 – изоляционная втулка, 4 – выводы

Терморезистор представляет собой тонкую платиновую проволоку 1, припаянную к двум манганиновым стержням 2, закрепленным в изоляционной втулке 3. С помощью выводов 4 терморезистор включается в измерительную схему. Через терморезистор пропускается ток, вызывающий его нагрев. При этом температура и, следовательно, сопротивление терморезистора определяется скоростью газового потока, в который он помещен: чем больше эта скорость, тем интенсивнее отводится теплота от терморезистора.

Контроль физических параметров

Тепловые параметры. Одним из наиболее распространенных датчиков температуры являются терморезисторы, у которых в качестве термочувствительных элементов используются *терморезистивные материалы*.

В тех случаях, когда необходимо измерять высокие температуры, приходится применять жаропрочные металлы, такие как вольфрам и молибден, хотя терморезисторы из них обладают сравнительно низкой стабильностью рабочих характеристик.

С помощью терморезисторов можно измерять скорости и расход газов и жидкостей, давление и плотность газов, определять содержание газов в смеси. Кроме платины в таких измерительных устройствах используют вольфрам, никель, полупроводниковые материалы.

В последние годы все более широкое применение находят полупроводниковые терморезисторы, которые иначе называют термисторами. Для их изготовления используют оксиды марганца, никеля и кобальта, германий и кремний с различными примесями и др. Для термисторов характерны большой ТКС (в десятки раз больше, чем у металлов), простота устройства, способность работать в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках, стабильность характеристик во времени.

Для контроля тепловых параметров широко применяются *пироэлектрические материалы*. Пироэлектрики используются в качестве детекторов и приемников тепловых излучений, датчиков теплотрических приборов.

Оптические параметры. В практике контроля оптических параметров большое распространение получили устройства, создаваемые с применением *фотоэлектрических материалов*.

На рис. 2.12 в качестве примера показано применение фотодатчика в устройстве автоматического затемнения зеркала заднего вида автомобиля. Как показывает практика вождения, при ослеплении ярким светом через зеркало заднего вида наблюдается кратковременная потеря зрения и увеличивается время реакции водителя. Поэтому находят все более широкое распространение специальные темнеющие зеркала заднего вида, не допускающие ослепление водителей светом фар сзади движущегося транспортного средства.



Рис. 2.12. Автоматически темнеющее зеркало заднего вида
 1 – фотодатчик, направленный назад, 2 – электронная плата, 3 – ветровое стекло, 4 – фотодатчик, направленный вперед

Ранние варианты зеркал, изменяющих обратный световой поток, были устроены аналогично жидкокристаллическим дисплеям: между двумя стеклянными пластинами находился тонкий слой жидкости, которая изменяла коэффициент поглощения света под воздействием приложенного электрического напряжения. Недостатком таких зеркал являлось уменьшение быстродействия при низких температурах. Для устранения этого нежелательного явления был необходим подогрев зеркал, что усложняло конструкцию.

В более современных вариантах зеркал используется эффект обратимого изменения светопропускания. Его обеспечивают электрохромные пленки окислов ряда металлов, в частности, оксида вольфрама, которые наносятся непосредственно на стекло. Зеркало получается однослойным, не боится холода и к тому же потребляет ток лишь в моменты переключения. Такие зеркала сегодня применяются на автомобилях многих марок.

В последние годы начали производить автоматически темнеющие зеркала. Прозрачность стекла в них регулируется контроллером, сравнивающим сигналы от двух фотодатчиков. Первый датчик, направленный вперед, измеряет общую освещенность, второй, обращенный назад, ловит лучи фар автомобилей, едущих сзади. При слишком большой разнице между показаниями датчиков (спереди темно, сзади ярко), свидетельствующей об опасности ослепления, выдается команда затемнить стекла зеркал.

Электрические и магнитные параметры. Для измерения напряженности магнитного поля применяются приборы, созданные на основе *материалов с эффектом Холла*. Обычно конструкция датчика Холла представляет собой тонкую прямоугольную пластину или пленку, изготовленную из полупроводника (Si, Ge, InSb, InAs) и имеет четыре электрода для подвода тока и съема холловского напряжения. При помощи датчиков Холла можно измерять любую физическую величину, которая однозначно связана с

магнитным полем: силу электрического тока, линейное и угловое перемещение, расход, скорость вращения и т.д. Бесконтактное срабатывание (полное отсутствие механического износа), низкая стоимость, простота использования делают широко востребованными в разных отраслях промышленности.

Для решения задач сенсорной техники перспективно применять *мультиферроики*. Устройства на основе мультиферроиков могут составить серьезную конкуренцию датчикам Холла в таких традиционных приложениях магнитных сенсоров как датчики положения, уровня жидкости, счетчики оборотов вращающихся деталей, устройства ввода информации в компьютер и др.

Для повышения эффективности работы контрольно-измерительных приборов (гальванометров, счётчиков электроэнергии и др.) их оснащают терморегуляторами и термокомпенсаторами магнитного потока, которые выполняют из термомагнитных сплавов в виде шунтов, ответвляющих на себя часть потока постоянного магнита. Принцип действия такого шунта состоит в том, что с повышением температуры резко уменьшается его намагниченность, вследствие чего увеличивается поток в зазоре магнита, благодаря чему компенсируется погрешность прибора, связанная с температурными изменениями индукции магнита, электрического сопротивления измерительной обмотки, жёсткости противодействующих пружин. Термомагнитные сплавы также применяются в реле, момент срабатывания которых зависит от температуры.

2.3.2. Интеллектуальные материалы для деталей машин

Крепёжные детали

Сборка узлов разнообразных устройств осуществляется посредством соединений деталей, входящих в состав соответствующих узлов. Соединения относятся к наиболее важным элементам устройств, поскольку причиной аварий при их работе во многих случаях является именно выход из строя соединений.

Известны различные виды соединений: подвижные и неподвижные, разъёмные и неразъёмные. Наиболее распространены неподвижные соединения. Среди них особое место занимают муфтовые соединения. Муфты предназначены для соединения концов валов или труб (соединительные муфты) и для передачи вращения с одного вала на другой без изменения крутящего момента (муфты приводов машин и механизмов).

Большими достоинствами обладают муфты из *сплавов с эффектом памяти формы* (ЭПФ). В частности, муфты из сплава Ti-Ni успешно используются при сборке громоздких агрегатов, состоящих из металлических трубчатых деталей (рис. 2.13). Муфта деформируется с помощью дорна при низкой температуре, так чтобы ее внутренний диаметр оказывался больше наружного диаметра соединяемых элементов.

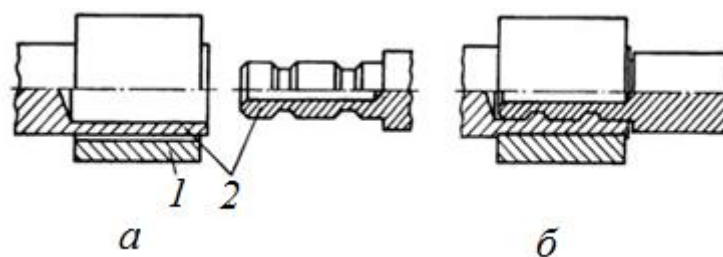


Рис. 2.13. Соединение трубчатых деталей (1) с помощью муфты (2) из сплава с ЭПФ
а – до сборки; б – после нагрева

После нагрева выше температуры обратного мартенситного превращения внутренний диаметр муфты восстанавливается до прежнего значения, которое было перед расширением. При этом создаются большие обжимающие усилия, соединяемые элементы пластически деформируются, что обеспечивает их прочное соединение.

На рис. 2.14 показана схема устройства для ремонта трубы, находящейся в аварийном состоянии. На участок трубы с трещиной надвигают разъемную вставку, которую обжимают свертывающимися в кольцо спиральными лентами или проволокой из сплава с ЭПФ.

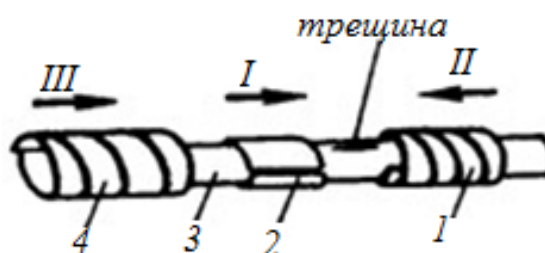


Рис. 2.14. Схема устройства для ремонта трубы с трещиной
1, 4 – элементы из материала с ЭПФ (I, II, III – последовательность сборки); 2 – разъемная вставка; 3 – труба

Подобным образом, с помощью муфт из сплавов с ЭПФ, можно скреплять не только трубы, но и стержни, изготовленные из различных материалов, включая, металлы, керамику, стекло, пластмассы. Также можно выполнять опрессовку деталей, используя память формы как свойство инструмента.

Соединения, получаемые с помощью сплавов с ЭПФ, характеризуются высокой прочностью. Например, трубы диаметром 20 мм, скрепленные наружной (стягивающей) или внутренней (распорной) муфтой из сплава Ti-Ni при ее толщине около 2 мм, способны выдерживать внутреннее давление до 200 атм и более.

В принципе, используя сплавы с ЭПФ, можно получать прочные вакуумплотные соединения, выдерживающие давление до 800 атм. Эти соединения успешно заменяют сварку, предотвращая такие недостатки сварного шва, как неизбежное разупрочнение металла и накопление дефектов

в переходной зоне между металлом и сварным швом. Кроме того, сплавы с ЭПФ можно эффективно применять для финального соединения при сборке конструкций, когда сварка из-за сложного переплетения узлов и трубопроводов становится труднодоступной.

Для неподвижного соединения деталей часто применяются болты или заклепки. Если же невозможно осуществлять какие-либо действия на противоположной стороне скрепляемых деталей (например, в герметичной пустотелой конструкции), то выполнение операций крепления вызывает трудности. В этих случаях применяются стопоры из сплава с ЭПФ.

В исходном состоянии стопор имеет раскрытый торец (рис. 2.15, а), а перед осуществлением операции крепления он погружается в сухой лед или жидкий азот и охлаждается, после чего торец выпрямляется (рис. 2.15, б). Затем стопор вводится в неподвижное отверстие для крепления (рис. 2.15, в), при нагревании до комнатной температуры происходит восстановление формы, торец расходится (рис. 2.15, г) и операция крепления завершается.

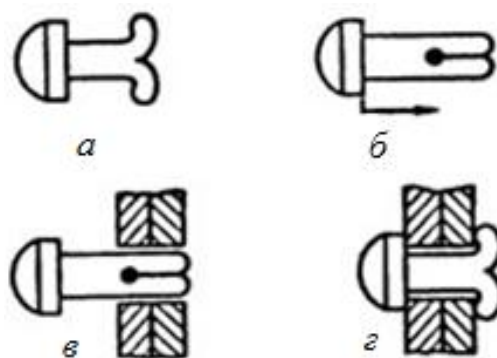


Рис. 2.15. Принцип действия стопора с эффектом памяти формы

Для изготовления крепежных изделий также перспективно использовать *ауксетичные материалы*. В частности, из ауксетиков можно создавать интеллектуальные элементы крепежных соединений типа фиксаторов и заклепок, которые при наложении нагрузки плотнее прилегают к сопряженной поверхности, увеличивая несущую нагрузку соединения.

Блокировочные устройства

Для повышения безопасности обслуживания и надёжности работы машины служат разнообразные по конструкции и принципу действия блокировочные устройства (блокираторы). С их помощью осуществляется изменение режимов работы (вплоть до остановки) машины в случае внезапного нарушения нормальных условий ее эксплуатации, а также для предотвращения ошибочных действий при управлении работой машины. Они обеспечивают фиксацию рабочих частей машины в определённом состоянии (которое сохраняется независимо от того, устранено или нет блокирующее воздействие), требуемую последовательность включения рабочих частей, ограничение их перемещений в пределах рабочей зоны.

Для создания блокировочных устройств весьма эффективно применять сплавы с эффектом памяти формы. В частности, сплавы с ЭПФ играют роль силовых элементов блокираторов, срабатывающих как на запираение (собственно блокировка), так и в обратном направлении. Обычно эти устройства представляют собой приводы одноразового срабатывания для приведения в действие исполнительных механизмов (рис. 2.16).

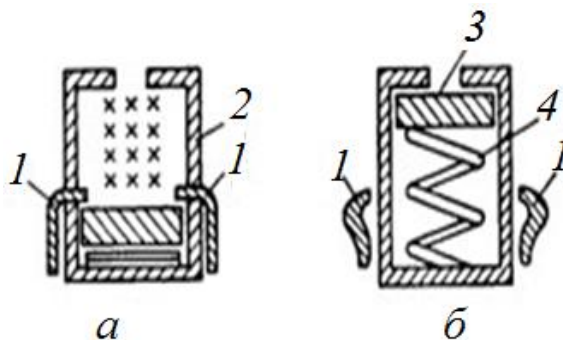


Рис. 2.16. Привод разблокировки запирающего (замкового) устройства
 а – исходное положение; б – положение после нагрева элемента из сплава с ЭПФ; 1 – стопор; 2 – контейнер; 3 – запорная шайба; 4 – пружина из сплава с ЭПФ

Приводные устройства

В различных областях техники применяются разнообразные по конструкции приводные устройства. Все они предназначены для одной и той же цели: приводить в действие рабочие органы машин и управлять их движением.

В последнее время все большее распространение получают линейные приводы, создаваемые на основе использования *сплавов с эффектом памяти формы*. В частности, из сплавов с ЭПФ изготавливаются силовые элементы домкратов. Для экономии полезного пространства можно использовать устройства комбинированной конструкции, в которых все рабочие элементы являются активными. Примером такого устройства является телескопический малогабаритный домкрат, в котором простые цилиндры развивают деформацию сжатия, а фигурные – деформацию растяжения (рис. 2.17).

Особенностью силовых элементов из сплавов с ЭПФ является их миниатюрность, что обусловлено простотой механизма их действия, а также тем, что они состоят из одного сплава. На действие таких элементов не влияет агрессивная среда. Их можно устанавливать в таких средах, как вакуум или вода, при этом нет необходимости в герметизированном подвижном узле, как, например, при установке гидropневматических цилиндров.

На рис. 2.18 показан принцип действия двигателя с кривошипно-шатунным механизмом на основе сплавов с ЭПФ.

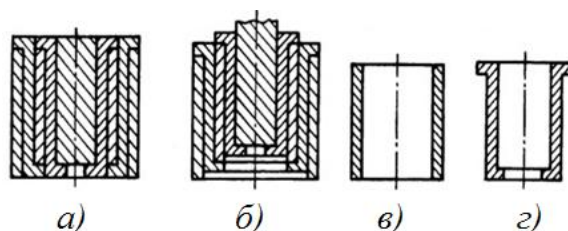


Рис. 2.17. Телескопический малогабаритный домкрат, состоящий из простых (в) и фигурных (г) цилиндров
 а – компактный вид (исходное состояние); б – после восстановление формы; в – элементы, восстанавливающие деформацию сжатия; г – элементы, восстанавливающие деформацию растяжения

Двигатель действует с помощью шести спиралей из сплава Ti-Ni. Оси рабочего колеса и кривошипного вала смещены относительно друг друга. Удлинение и сокращение спиралей в зависимости от разности температур горячей и холодной сред (10-20°C) действуют подобно возвратно-поступательному движению поршня в обычных двигателях и вызывают вращение рабочего колеса.

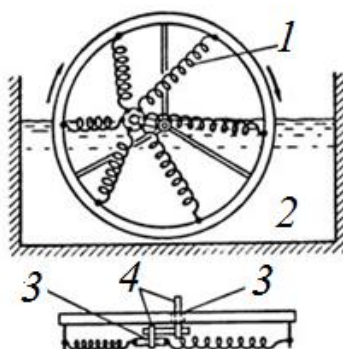


Рис. 2.18. Схема двигателя с кривошипно-шатунным механизмом
 1 – спираль из сплава Ti-Ni; 2 – горячая вода; 3 – подшипник; 4 – фиксированные оси

Приводы на основе сплавов с ЭПФ могут эффективно использоваться в робототехнике. Адаптивные захватные устройства, предназначенные для робототехнических систем, способны длительное время удерживать объекты различной формы и разной плотности, например, тяжелые стальные или хрупкие стеклянные (рис. 2.19). Такие устройства не требуют использования электромеханических, гидравлических или пневматических силовых приводов, просты по конструкции, эффективны при работе в экстремальных условиях, например, в зонах повышенной радиации, в вакууме, в агрессивных средах. Роботы-манипуляторы на основе сплавов с ЭПФ характеризуются плавностью действия, которая обусловлена тем, что заданная величина усилия (силы восстановления формы) определяется регулируемой температурой и не зависит от положения элементов, что приближает действие робота к действию мускульного механизма.

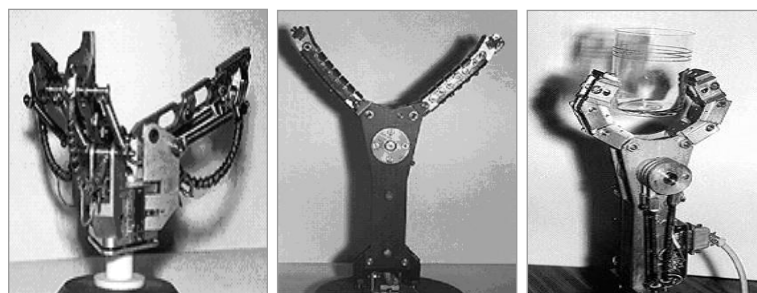


Рис. 2.19. Разновидности робототехнических систем с адаптивными захватными устройствами на основе сплавов с эффектом памяти формы

Необычное по конструкции приводное устройство, созданное на основе использования сплавов с ЭПФ, предложено инженерами американской автомобильной корпорации General Motors. Это – привод вентиляционной заслонки в багажнике автомобиля марки Chevrolet Corvette, который представляет собой струну из сплава с ЭПФ (рис. 2.20). Один конец струны прикреплен к неподвижной стенке вентиляционного канала, другой – к рычажку на заслонке. Если по струне пропустить электрический ток, она нагревается и сжимается, открывая заслонку, а после отключения тока – охлаждается и распрямляется, закрывая вентиляционное отверстие. Новый привод компактнее прежнего электромеханического и легче на 500 г.



Рис. 2.20. Привод вентиляционной заслонки в багажнике автомобиля в виде струны из сплава с ЭПФ

Для создания линейных приводов, предназначенных для приведения в действие исполнительного органа машин по линейному поступательному движению, применяются *электроактивные полимеры (ЭАП)*.

На рис. 2.21, а показан в качестве примера валковый привод, который представляет собой сжатую спиральную пружину, обернутую слоем пленки из диэлектрического эластомера, ламинированного с обеих сторон эластичными электродами. Такой привод может применяться во всех случаях, когда нужно обеспечить простое линейное перемещение, например, в механизмах роботов, клапанов и насосов. Для повышения эффективности устройства можно соединить несколько элементарных приводов последовательно или параллельно.

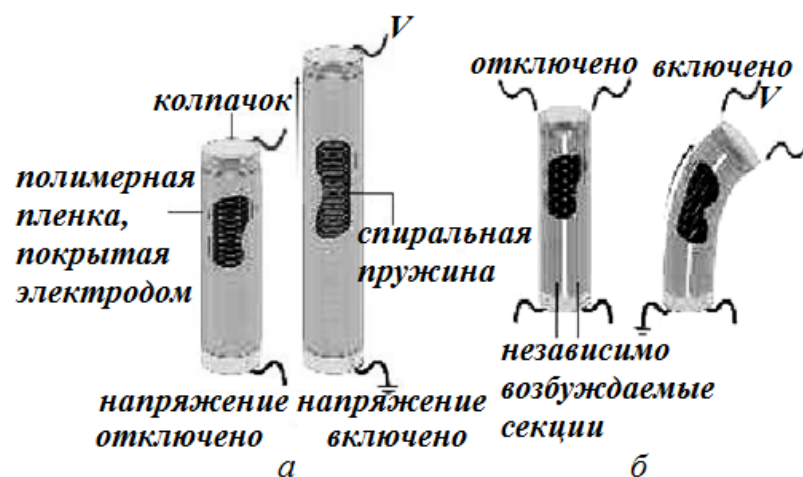


Рис. 2.21. Валковые приводы на основе ЭАП

Для создания приводов также можно использовать *полимерные автоколебательные гели*. Распространение «химических волн» в образце геля и соответствующее им образование последовательности локальных зон расширения и сжатия приводят к эффекту перистальтического движения. Этот эффект положен в основу создания микротранспортеров конвейерного типа.

На рис. 2.22 показана схема транспортера, в котором однонаправленное перемещение объекта осуществляется путем его перекатывания по поверхности геля благодаря цепочке волн набухания и сжатия, возникающих на поверхности геля и подталкивающих объект в направлении своего распространения.

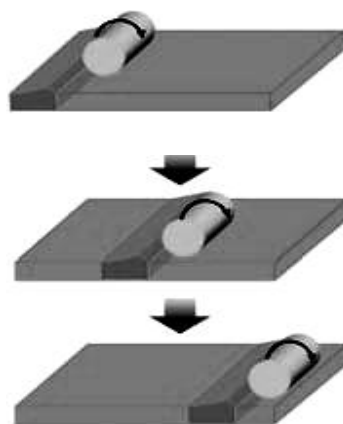


Рис. 2.22. Схема конвейерного транспорта на поверхности автоколебательного геля

Особенно широкое применение для создания приводов получили материалы с обратным пьезоэлектрическим эффектом. Из них делают

разнообразные пьезокерамические двигатели, которые по конструкции и принципу действия делятся на два основных типа: вращающиеся и линейные.

На рис. 2.23 показана схема вращающегося пьезодвигателя с пьезоэлементом, совершающим продольные и изгибные колебания. На активном статоре установлен пьезоэлемент 2, выполненный в виде пьезокерамической пластины с расположенными на её боковых поверхностях электродами. Один конец пластины закреплен в статоре с помощью эластичной акустически изолирующей прокладки, а на другом, обращенном к пассивному ротору 1, установлена износостойкая прокладка 4. Ротор выполнен в виде гладкого цилиндра, вал ротора закреплен в подшипниках. Статор и ротор прижимаются друг к другу силой F , создаваемой упругим элементом 3. К электродам пьезоэлемента подводится переменное напряжение возбуждения U .

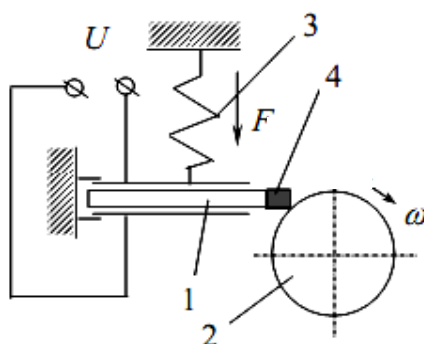


Рис. 2.23. Схема вращающегося пьезодвигателя: пьезоэлемент совершает продольные и изгибные колебания

Электроды расположены таким образом, что при подаче на них переменного напряжения пьезокерамическая пластина совершает продольные колебания. При продольном смещении свободного конца пластины в сторону ротора пластина оказывает давление на ротор и заставляет его поворачиваться с угловой скоростью ω . Поперечная составляющая силы, действующей на пластину в зоне контакта, возбуждает ее изгибные колебания. При обратном продольном смещении пластины её конец отходит от ротора, и ротор движется по инерции. В результате установившихся продольных и изгибных колебаний происходит преобразование электрической энергии, потребляемой пьезоэлементом, в механическую энергию вращения ротора.

Рассмотренный двигатель работает в непрерывном режиме. Двигатель аналогичной конструкции может также работать в шаговом режиме: при подаче на обкладки пьезоэлемента одиночных импульсов напряжения ротор совершает вращение дискретными угловыми шагами.

Линейные пьезодвигатели, совершающие относительно большие (несколько миллиметров и даже сантиметров) возвратно-поступательные перемещения, по принципу действия не отличаются вращающихся пьезодвигателей.

На рис. 2.24, а изображена схема линейного пьезодвигателя с пьезоэлементом, совершающим продольные и изгибные колебания.

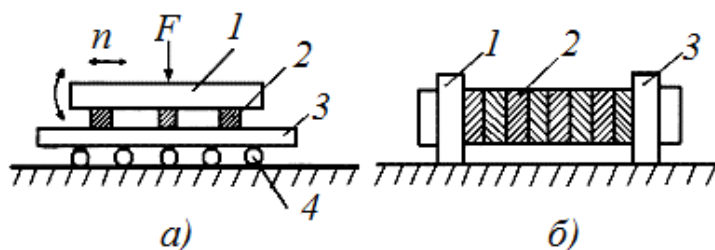


Рис. 2.24. Схемы линейных пьезодвигателей
а – пьезоэлемент совершает продольные и изгибные колебания, б – пьезоэлемент с управляемой деформацией

Неподвижный пьезоэлемент 1 прижимается силой F к подвижной части 3 через износостойкие прокладки 2. Подвижная часть представляет собой стальной позиционер 3, перемещающийся на роликах 4. Если фазы продольных и изгибных колебаний согласовать таким образом, чтобы при удлинении пьезоэлемента он прижимался к позиционеру через левую прокладку, то позиционер будет перемещаться влево. При укорочении вибратора он прижимается к позиционеру через правую прокладку и позиционер продолжает двигаться влево. Изменение фазы продольных колебаний на 180° вызывает возвратное движение позиционера. У линейных пьезодвигателей рассмотренной конструкции разрешающая способность по перемещению сравнительно мала (не превышает 1-10 мкм).

В некоторых видах прецизионных технологических установок, используемых, например, в производстве микроэлектронных приборов, требуются исполнительные механизмы, осуществляющие перемещение в десятые или сотые доли микрометров. В качестве таких механизмов используются линейные пьезодвигатели с управляемой деформацией пьезоэлемента. У этих двигателей (рис. 2.24, б) рабочее перемещение осуществляет пьезопреобразователь 2, выполненный в виде стержнеобразного пакета из пьезокерамических шайб.

На торцах стержня расположены зажимы 1 и 3. Если зафиксировать зажим 1 и подать на электроды пьезоэлемента постоянное напряжение, приводящее к удлинению стержня, то конец стержня с зажимом 3 переместится вправо. Перемещение будет зависеть от приложенного напряжения. На этом же принципе могут быть построены линейные шаговые двигатели с шагом в доли микрометров. После того, как правый конец стержня (рис. 2.24, б) переместился на заданный шаг, фиксируется зажим 3, освобождается зажим 1 и снимается напряжение с пьезоэлемента. Стержень сжимается до исходной длины, и его левый конец подтягивается к правому. После этого вновь фиксируется зажим 1, освобождается зажим 3 и подается напряжение на пьезоэлемент. В результате происходит шаговое перемещение двигателя и связанного с ним объекта управления на требуемое расстояние.

На рис. 2.25 показана конструкция мощного линейного пьезодвигателя на основе пьезопреобразователя пакетной конструкции.

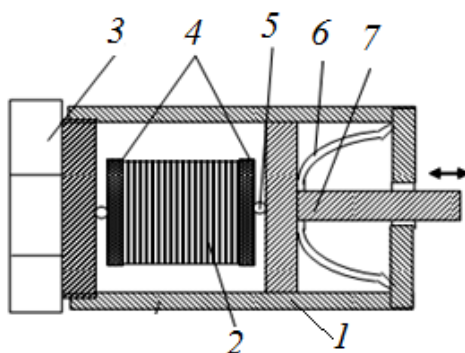


Рис. 2.25. Пакетный пьезодвигатель

Пьезопакет 2, состоящий из пьезодисков и силопередающих прокладок 4, устанавливается в корпусе 1 между винтом 3 и штоком 7. Механический контакт штока и винта с силопередающими прокладками осуществляется через стальные центрирующие шарики 5. Тарелочная пружина 6 служит для обеспечения предварительного сжатия пакета при повороте винта 3. Такой двигатель может развивать значительные усилия (до 200 Н) и служит для линейных перемещений объектов довольно большой массы (десятки килограмм) на расстояние от 2 до 50 мкм (зависит от количества элементов и напряжения управления).

Современные пакетные пьезодвигатели имеют встроенные измерительные преобразователи перемещений, которые обеспечивают обратную связь по положению (рис. 2.26).



Рис. 2.26. Пьезодвигатель с встроенным индуктивным датчиком микроперемещений

Пакетные пьезопреобразователи составляют основу конструкции различных пьезопроводов, которые благодаря обеспечению высокой точности позиционирования широко применяются в автоматах точной дозировки жидкостей и газов.

Особенно разнообразны применения пьезопроводов в автомобилях, где они играют роль управляющих элементов в системах регулировки положения сидений, зеркал, фар; в системах подвески и антиблокировки тормозов.

Одним из основных направлений использования пьезопроводов в автомобилях является создание пьезокерамических высокоскоростных клапанов для топливной аппаратуры дизельных двигателей. Дело в том, что в дизельном двигателе процесс сгорания топлива в цилиндре тесно связан с процессом впрыскивания топлива. В последнее время разработана усовершенствованная система впрыска дизельного топлива с помощью пьезопроводов. Такая система впрыска топлива уменьшает задержку воспламенения топлива за счет: высокого давления впрыска, что приводит к сверхтонкому распылению топлива; быстрого и независимого управления форсунками, что позволяет осуществлять несколько впрысков в один и тот же цилиндр в течение одного цикла; дозирования с высокой точностью количества топлива на различных фазах работы двигателя, что увеличивает КПД двигателя, увеличивает срок службы, снижает расходы топлива и улучшает экономичность автотранспорта.

Электронный быстродействующий клапан со встроенным пьезопроводом позволяет управлять формой и длительностью импульса впрыска, что приводит к улучшению рабочих характеристик и гибкости системы управления впрыска топлива по заданному алгоритму для различных режимов управления, включая: экономичный режим, обеспечивающий максимальное КПД и минимальное потребление топлива; экологически чистый режим, обеспечивающий минимальный уровень выброса вредных примесей в атмосферу; режим форсажа, обеспечивающий максимальную тягу.

Подобная система впрыска топлива с помощью пьезопроводов применяется также для бензиновых двигателей (рис. 2.27).



Рис. 2.27. Пьезофорсунка для впрыска бензина: подача электрического напряжения вызывает расширение пьезокерамического столба, который приподнимает дозирующую иглу

Перспективным направлением применения пьезопроводов является точная настройка металлорежущих станков, что, в свою очередь, обеспечивает высокую точность обработки деталей режущим инструментом. Кроме того, пьезопроводы используются для подавления (компенсации) вибрации станков, которую можно компенсировать за счет работы пьезопроводов в противофазе с вибрациями. Пьезокомпенсаторы вибраций могут найти применение не только в станкостроении, но и в других сферах.

В практическом отношении весьма эффективны пьезоп приводы на основе пьезопреобразователей биморфной конструкции. В частности, такие биморфные конструкции с угловым перемещением используются в системах сканирования и пространственного управления оптическим излучением (дефлекторах), а с линейным перемещением – в системах юстировки и позиционирования оптико-механических систем.

Гидравлические устройства

К гидравлическим устройствам относятся такие устройства, которые используют в своей работе энергию жидкости. Известны гидравлические демпферные, тормозные, зажимные, нажимные и другие устройства, широко применяемые в различных областях техники. В различных машинах особая роль отводится гидравлическим передачам, назначением которых является передача механической энергии от двигателя к исполнительному органу, а также преобразование вида и скорости движения последнего посредством жидкости.

В последние годы все большее применение находят интеллектуальные гидравлические жидкости.

Так, *электрореологические жидкости* благодаря способности обратимо изменять свои свойства при наложении электрического поля, переходя от жидкотекучего состояния к вязко-пластичному в течение миллисекунд, применяются в качестве рабочих тел электрически управляемых механических передаточных устройств: демпферов, сцеплений, захватов, клапанов и т.п.

На рис. 2.28 показана конструктивная схема муфты, состоящей из ведущей и ведомой полумуфт из электропроводного материала, пространство между которыми заполнено электрореологической жидкостью.

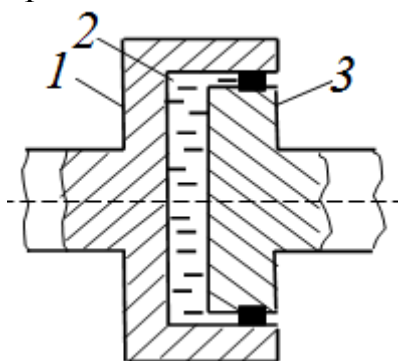


Рис. 2.28. Муфта с электрореологической жидкостью

1 и 3 – ведущая и ведомая полумуфты; 2 – электрореологическая жидкость

Работа муфты основана на свойстве электрореологической жидкости обратимо увеличивать вязкость под действием электрического поля, создаваемого импульсным генератором. При этом вращающий момент между полумуфтами передается только в моменты импульсов, когда образуется жесткая связь между полумуфтами в синхронном режиме.

Характер и форма воздействующего импульсного поля регулируется изменения путем частоты, скважности или формы импульсов. Поскольку время реакции жидкости на воздействующее электрическое поле крайне мало, то вращение ведомой полумуфты хотя и имеет дискретный характер, но при достаточно большой частоте импульсов практически непрерывно и не зависит от изменения нагрузки на ведомой полумуфте.

В свою очередь, *магнитореологические жидкости* можно эффективно использовать для гашения вибраций, например, кабин большегрузных автомобилей, а также подвесок двигателей и сидений водителей.

Для регулирования скорости движения и расхода рабочей жидкости в гидравлических системах машин и аппаратов обычно применяются гидравлические дроссели, в которых за счёт изменения проходного сечения потока жидкости создаётся дополнительное гидравлическое сопротивление. Благодаря этому обеспечивается необходимый перепад давлений на тех или иных элементах гидросистем, а также изменяется величина потока жидкости, проходящего через дроссель.

На рис. 2.29 приведена схема магнитореологического дросселя с кольцевым рабочим зазором.

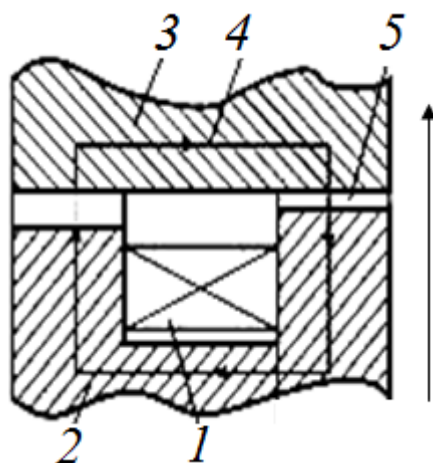


Рис. 2.29. Схема магнитореологического дросселя с кольцевым рабочим зазором

Дроссель состоит из электромагнитной катушки, сердечника и корпуса из магнитной стали, которые выполняют функции магнитопровода.

Ток, протекающий через обмотку катушки, вызывает появление магнитного поля и соответственно магнитного потока через магнитопровод. Магнитный поток замыкается через зазор и увеличивает динамический предел текучести магнитореологической жидкости, протекающей через зазор. Замена подвижных механических элементов дросселя прямым воздействием магнитного поля на магнитореологическую жидкость обеспечивает существенное улучшение частотной характеристики дросселя, упрощает его конструкцию и повышает надежность.

Амортизаторы с электро- или магниточувствительной рабочей жидкостью, обеспечивая значительное снижение колебаний, продольную и поперечную раскачку кузова автомобиля, являются особенно востребованными для комплектации медицинских, спасательных и аварийных автомобилей

Для создания гидравлических демпферов перспективно использовать *магнитные жидкости*. Они также могут применяться в гидравлических устройствах для перекрытия канала или регулирования расхода, а также для перемены направления потока жидкой среды в трубопроводе.

С использованием магнитных жидкостей связано создание демпферных устройств. На рис. 2.30 представлена схема демпфера с магнитной жидкостью, заполняющей цилиндр, в который вводится поршень, представляющий собой своеобразную обойму, состоящую из нескольких постоянных магнитов, выполненных в виде тонких круглых пластин, N- и S-полюса перемены направления потока жидкой среды в трубопроводе.

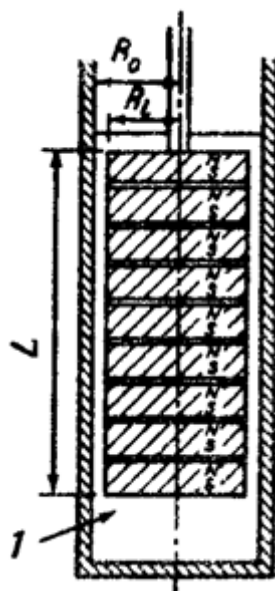


Рис. 2.30. Схема магнитожидкостного демпферного устройства
1 – магнитная жидкость

На рис. 2.31 изображена труба, разделенная на два канала, по одному из которых протекает рабочая жидкость.

В расширенную часть трубы при помощи внешнего магнита введена и удерживается там магнитная жидкость, выполняющая роль перекрывающего клапана. Таким образом, один из каналов закрыт, и жидкость по нему не протекает.

Очевидно, что с помощью магнита можно перевести магнитную жидкость в другой канал трубопровода и перекрыть его, освободив первый.

На рис. 2.32 изображена схема применения магнитной жидкости в качестве предохранительного клапана в трубопроводе.

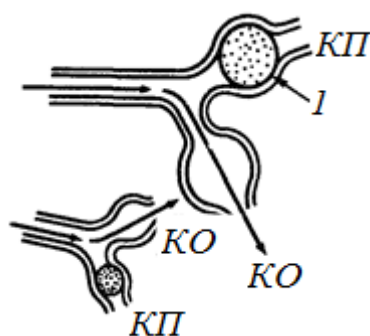


Рис. 2.31. Магнитожидкостный двухходовой клапан
1 – шаровидный клапан из магнитной жидкости, КО – канал открыт, КП – канал перекрыт

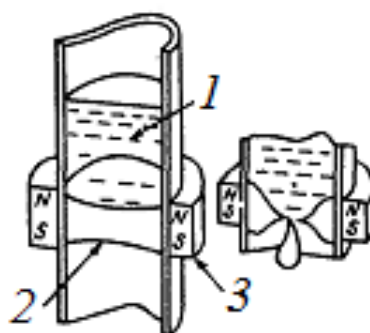


Рис. 2.32. Магнитожидкостный предохранительный клапан
1 – перекрытая клапаном жидкая среда, 2 – магнитная жидкость, 3 – электромагнит

Действие клапана основано на удержании магнитной жидкости в заданном участке трубы с помощью электромагнита, магнитное поле которого регулируется. Из-за того, что труба расположена вертикально, жидкая среда, накапливающаяся над магнитожидкостным клапаном, удерживается только до достижения некоторого определенного уровня. Как только этот уровень превышает, клапан под действием силы тяжести открывается и удерживаемая им жидкость просачивается вниз.

Магнитные жидкости могут применяться в гидравлических системах, в частности, для перекрытия канала или регулирования расхода, а также для упругостью материала.

Меньшее применение по сравнению с магнитными жидкостями находят *магнитоэластики* (феррогели), но у них есть бесспорные преимущества: отсутствие вытекания жидкости и возможность плавного управления вязкостью и которых располагаются близко один к другому. Постоянные магниты поршня создают сильно неоднородное магнитное поле, которое воздействует на магнитную жидкость, окружающую поршень, и в результате ее эффективная вязкость сильно возрастает. Затем, при возвратно-поступательных (по вертикали) перемещениях поршня, внутреннее трение в магнитной жидкости, заполняющей пространство между поршнем и

цилиндром, приводит к диссипации кинетической энергии внешних вибраций.

Фильтрующие устройства

С помощью фильтрующих устройств (фильтров) осуществляется разделение дисперсных газо- и жидкофазных сред (аэрозолей, суспензий). При этом в процессе фильтрации пористые перегородки фильтров (фильтрующие элементы) пропускают дисперсионную среду и задерживают дисперсную твёрдую фазу.

Для изготовления фильтрующих элементов широко применяются пористые порошковые материалы. Вследствие высокой пористости они имеют хорошую проницаемость для жидкостей и газов при достаточно тонкой фильтрации. При этом тонкость фильтрации для каждого конкретного материала является фиксированной, она определяется свойственной данному материалу пористой структурой, которая формируется в процессе его получения. В этой связи весьма эффективно использовать в качестве фильтрующих элементов пористые *ауксетичные материалы*. При их растяжении размер пор возрастает, позволяя проходить более крупным частицам. Тем самым регулируется размерная селективность фильтра.

Особый практически интерес представляет применение фильтрующих элементов на основе пористых мембран. Такие мембраны способны избирательно пропускать отдельные компоненты газовых смесей, растворов, коллоидных систем. Обычно их выполняют в виде тонких пленок или пластин, изготовленных из стекла, металла, керамики или полимеров. Наибольшее распространение получили полимерные мембраны (из целлюлозы, полиамидов, полиолефинов и т.д.). Мембранные фильтрующие элементы (также как и порошковые) имеют фиксированную тонкость фильтрации, значение которой определяется пористой структурой мембран конкретного типа.

Для создания мембран с контролируемой проницаемостью применяются *полимерные гели с эффектами набухания*, молекулы которых способны резко изменять конформацию, т.е. переходить из развернутой глобулы в компактный клубок. Контролируемое изменение проницаемости мембраны с изменением рН или температуры среды происходит за счет изменения конформации молекул полимеров, иммобилизованных на поверхности мембраны. Принцип действия таких мембран иллюстрирует рис. 2.33. В развернутой конформации полимерные молекулы, иммобилизованные на поверхности мембраны, не препятствуют проникновению растворенных веществ внутрь пор, в то время как в компактной конформации они блокируют или сильно затрудняют доступ растворенных веществ внутрь пор.

Если мембрана целиком состоит из полимерного гидрогеля, то ее проницаемость значительно меняется при изменении степени набухания геля.

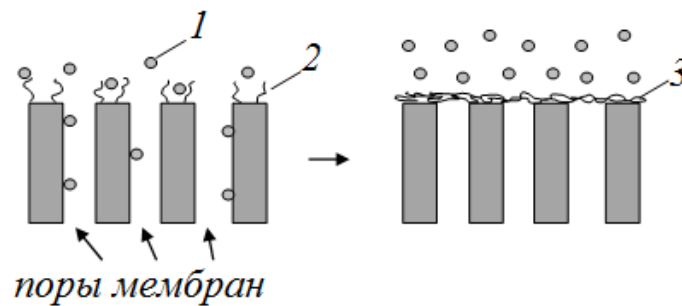


Рис. 2.33. Регулируемая проницаемость мембраны при изменении конформации полимера

1 – растворенное вещество; 2 – полимер в развернутой конформации; 3 – полимер в компактной конформации

Подшипники

Подшипники поддерживают вал, ось или иную деталь машины, фиксируют положение в пространстве, обеспечивают движение (вращение), воспринимают и передают нагрузку на другие части детали. Главное назначение подшипников – уменьшать трение между движущейся и неподвижной частями узла машины.

Важная роль в работе подшипников отводится смазке, которая обеспечивает низкое трение, разделение подвижных частей, теплоотвод, защиту от вредного воздействия окружающей среды. В этом отношении высокие эксплуатационные свойства демонстрируют подшипники на основе *самосмазывающихся материалов*. Они представляют собой композиционные материалы, состоящие из пористой матрицы и размещенной в порах дисперсной смазочной составляющей, выделяющейся на их поверхности в зоне фрикционного контакта. Обычно их получают методами порошковой металлургии. Из них особенно эффективно изготавливать подшипники скольжения, работающие без смазки. 20-30 % объема таких подшипников занимают поры, которые пропитываются стойким к старению маслом.

Системы герметизации

При создании различных устройств значительное внимание уделяется системам герметизации, препятствующим нежелательному доступу газов и жидкостей к поверхностям и местам соединения деталей. Герметизация поверхностей обеспечивается нанесением на них покрытий из материалов, непроницаемых для газов и жидкостей. Места соединений герметизируются за счёт заполнения зазоров между деталями уплотняющим материалом.

Весьма необычной разновидностью герметизирующих материалов являются *магнитные жидкости*. На их основе создаются различные системы герметизации, в частности, герметичные подшипники скольжения, а также подвижные вакуумные уплотнения, выдерживающие высокий перепад давлений. На рис. 2.34, а изображена конструкция герметизатора, основу

которой составляют два блока магнитных полюсов (полюсных наконечников), изготовленных в виде двух дисков из магнитного материала.

Между полюсными наконечниками установлен постоянный кольцевой магнит, намагниченный в осевом направлении. Так как герметизируемый вал тоже изготовлен из магнитного материала, то образуется магнитная цепь, замыкающая магнитный поток (на рисунке обозначена стрелками). Один из полюсных наконечников имеет заостренную форму, и в зазоре между валом и заостренной кромкой наконечника напряженность магнитного поля возрастает. В этот зазор помещается магнитная жидкость, которая полностью его заполняет, втягиваясь в область сильного магнитного поля. В результате магнитная жидкость образует уплотнительное кольцо.

На рис. 2.34, б изображена конструкция герметизатора, которая по принципу действия аналогична показанной на рис. 2.34, а, однако для создания замкнутой магнитной цепи в случае, когда вал изготовлен из немагнитного материала, на него надевается насадка из магнитного материала.

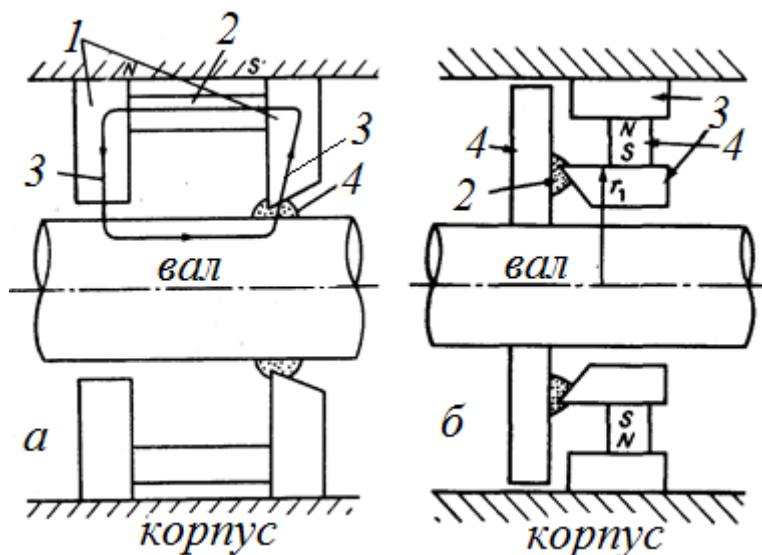


Рис. 2.34. Схемы магнитожидкостных герметизаторов: размещение магнитной жидкости: между валом и полюсным наконечником и насадкой на вал и полюсным наконечником

1 – полюсные наконечники, 2 – постоянный магнит, 3 – магнитный поток, 4 – насадка на вал, 5 – магнитная жидкость

Магнитожидкостные герметизаторы валов имеют следующие достоинства:

- высокая герметичность: размеры промежутков между вращающимися и неподвижными частями имеют размеры молекул (например, при герметизации вакуумной камеры независимо от того, неподвижен вал или вращается, обеспечивается вакуум до 10^{-6} Па);

- отсутствие загрязнения объема частицами герметизирующего материала, а также отсутствие тепловыделения и сильных шумов, что обычно имеет место в механических герметизаторах при трении твердых тел;

- отсутствие необходимости обрабатывать контактирующие поверхности с высокой точностью, что является важным требованием в случае масляных и механических герметизаторов.

Режущие органы

К машинам с режущими органами относятся горные, землеройные, строительно-дорожные, сельскохозяйственные и другие машины.

Так, например, в сельском хозяйстве используются разнообразные машины, основными рабочими органами которых являются ножи, срезающие растительную массу в процессе уборки урожая. Это зерноуборочные, свеклоуборочные, силосоуборочные комбайны, различные жатки и косилки, ботвоуборочные и другие машины.

В последнее время с целью повышения эффективности работы подобного рода машин приобретает особую актуальность использование специальных *материалов для самозатачивающихся режущих органов*, т.е. создание таких режущих элементов машин, которые обладают способностью к самозатачиванию в процессе работы.

Рассмотрим особенности самозатачивания режущих элементов на примере рабочих органов плуга. Эти органы имеют большую площадь контакта с обрабатываемой почвой, при этом нагрузки на отдельные участки рабочей поверхности существенно отличаются друг от друга. Выступающий перед лезвием носок лемеха в ходе косога резания первым внедряется в почвенную среду, обеспечивая заглубление лемеха и устойчивость плуга при пахоте. Высокое давление, имеющее место в зоне повышенного силового контакта режущей кромки носка с почвой, вызывает его опережающее изнашивание по отношению к лезвию лемеха. По мере возрастания наработки лемеха значение вылета носка перед лезвием снижается, приближаясь к нулю, поэтому лемех лишается способности заглубляться. В результате лемех выбраковывается с большим запасом неизношенного металла по ширине.

Лемеха с приблизительно одинаковой интенсивностью изнашивания носовой части и лезвия позволяют в процессе эксплуатации сохранять неизменной исходную форму. Для производства таких лемехов наиболее эффективны биметаллические материалы, обеспечивающие самозатачивание рабочих органов.

Самозатачивающееся лезвие состоит из двух слоев, материалы которых отличаются по износостойкости. Режущий слой, толщина которого устанавливается в зависимости от агротехнических требований к детали, выполняется из более износостойкого материала. Второй слой из относительно мягкого, вязкого материала является несущим, он предназначен для предохранения режущего слоя от поломок. В процессе работы лезвия износостойкий слой постоянно выступает на лезвии и режет почву (сорные растения или другие сельскохозяйственные материалы), в то время как более мягкий слой по мере пользования стирается.

Основная трудность получения самозатачивающегося лезвия заключается в необходимости сохранять достаточную остроту профиля лезвия в работе.

Сама же форма профиля двухслойного лезвия, получающаяся при изнашивании, зависит от соотношения давлений почвы на разных участках лезвия, износостойкости материалов слоев и их толщины.

Для создания самозатачивающихся лемехов и других режущих элементов применяются различные методы. Широкое распространение получила наплавка твердых сплавов на наиболее изнашиваемые участки режущих элементов, в том числе дуговая наплавка; наплавка порошковыми проволоками и порошковой лентой; индукционная, плазменная и некоторые другие виды наплавки. При этом ресурс работы в зависимости от различных почвенных условий повышается в 1,5-2,5 раза.

Существенным недостатком наплавки твердого сплава является появление трещин в поверхностном слое, как в самом процессе наплавки, так и при последующей эксплуатации детали, что связано с увеличением напряжений, происходящих в результате фазовых превращений и разрушения карбидной эвтектики. Наличие трещин увеличивает риск поломки лемеха при воздействии на него динамической нагрузки.

Альтернативой наплавки является применение износостойких пластин, требуемой толщины, закрепляемых на тыльной стороне носка лемеха с помощью пайки или клея.

Известен еще один подход к созданию самозатачивающихся режущих элементов – путем точечного упрочнения лезвия с применением лазерного или импульсного электроконтактного нагрева.

ГЛАВА 3 ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

3.1. Высокоэнергетические технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика

Высокоэнергетические технологии очистки

На деталях тракторов, сельскохозяйственных и транспортных машин во время их работы постоянно скапливаются эксплуатационные загрязнения, которые по мере накопления отрицательно влияют на рабочие характеристики техники. Кроме того, в процессе производства и ремонта деталей их поверхность покрывается технологическими загрязнениями, которые вызывают снижение качества выполняемых производственно-ремонтных работ.

Разнообразные загрязнения поверхностей деталей имеют свои особенности, которые необходимо учитывать при выборе методов очистки и определении рациональных условий проведения очистных процессов [49]. Загрязнения могут характеризоваться разной стойкостью к разрушающим воздействиям, толщиной образовавшегося слоя, силой сцепления с поверхностью детали и занимаемой площадью на поверхности и, в конечном счете, разной трудоемкостью удаления. Кроме того, загрязнения могут находиться в разных местах конструкции машины – как в легко-, так и в труднодоступных. С учетом этих и других особенностей загрязнений для их удаления следует применять универсальные очистные технологии, обеспечивающие высокую степень полноты очистки сельскохозяйственной техники [50].

Эксплуатационные загрязнения могут существенно различаться по своему составу и накапливаемому количеству в зависимости от того, на каких поверхностях деталей они образуются – наружных или внутренних.

На наружных поверхностях деталей скапливаются дорожная пыль и грязь; остатки смазочных материалов, ядохимикатов, удобрений, растительности, перевозимых грузов (цемент, бетон, асфальт и др.); продукты коррозии [51-53]. В тех случаях, когда пыль и грязь попадают на поверхности, загрязненные маслом, либо, наоборот, когда масло попадает на поверхности, загрязненные пылью и грязью, формируются масляно-грязевые отложения [54]. Особым видом загрязнений наружных поверхностей являются поврежденные лакокрасочные покрытия [51].

На внутренних поверхностях деталей скапливаются масляные отложения в сочетании с продуктами изнашивания и углеродистые отложения [51, 55]. К последним относятся: асфальтосмолистые отложения, представляющие собой плотные, не растворяющиеся в масле мазеподобные сгустки; лаковые отложения в виде пленок, образующихся в результате послойного окисления масла; нагар в виде твердых углистых частиц, образующихся при сгорании

масла и топлива. Особым видом загрязнений внутренних поверхностей является накипь – осадки содержащихся в воде солей металлов [51, 55].

Особое внимание уделяется удалению эксплуатационных загрязнений с деталей двигателей внутреннего сгорания, поскольку условия работы двигателей способствуют окислению кислородом воздуха части углеводородов топлива и масла, что приводит к образованию различных продуктов окисления – альдегидов, кетонов, эфиров, карбоновых и других кислот и кислотосодержащих продуктов, откладывающихся на деталях двигателя [56]. В дальнейшем эти соединения, подвергаясь конденсации и полимеризации, превращаются в сложные высокомолекулярные вещества. Кроме указанных органических веществ, на поверхности деталей со временем накапливаются мельчайшие частицы сажи – коксообразных веществ, являющихся продуктами сгорания и термического распада топлива и масла, а также неорганические вещества – пыль и продукты износа деталей.

Большую сложность представляет удаление эксплуатационных загрязнений с деталей топливной аппаратуры дизельных и карбюраторных двигателей, что обуславливается наличием на поверхности деталей трудноудаляемых загрязнений типа нагаров и лаковых отложений, конструктивной сложностью очищаемых деталей и высокими требованиями к качеству очистки [57]. Трудность удаления нагаров и лаковых отложений связана с тем, что в их составе присутствуют соединения, которые практически не поддаются растворению в моющих растворах. Такие загрязнения обычно образуются на распылителях форсунок. Их появление является результатом неполного сгорания, образования продуктов термического крекинга и глубокого окисления топлива. Уплотняясь, продукты окисления образуют высокомолекулярные соединения, которые отлагаются на поверхностях деталей в виде тонкой лаковой пленки, обладающей большой липкостью и удерживающей на своей поверхности углеродистые частицы сгоревшего топлива и масла

Технологические загрязнения накапливаются в меньшем количестве, чем эксплуатационные загрязнения. Они образуются на поверхностях деталей при осуществлении определенных видов их обработки (табл. 3) [51, 55, 58, 59] и перед определенными видами обработки подлежат удалению [56]. В частности, высокие требования к очистке деталей от загрязнений предъявляются перед нанесением покрытий, для того чтобы обеспечить их надежное сцепление с поверхностями деталей. При недостаточной очистке деталей от загрязнений происходит их интенсивный износ в процессе приработки поверхностей трения. Как правило, детали подлежат тщательной очистке от загрязнений перед проведением монтажно-сборочных работ [51].

Разнообразные загрязнения возникают на поверхности корпусных деталей двигателей внутреннего сгорания в процессе их изготовления, к ним относятся продукты обработки лезвийным инструментом, пленки эмульсии смазочно-охлаждающих средств, остатки от доводочных и притирочных паст и др. [60].

Особым видом технологических загрязнений являются шаржированные частицы, которые отличаются своими физико-химическими свойствами и характером сцепления с поверхностью и поэтому требуют для удаления нестандартных подходов к организации очистных процессов [56, 61].

Существуют разнообразные технологии очистки поверхностей деталей сельскохозяйственной техники от загрязнений. Детали очищают в процессе их изготовления, ремонта (восстановления) и эксплуатации. Для очистки деталей применяются моечно-очистная обработка, травление, механическая обработка и обработка физическими воздействиями.

В последние годы все большее распространение получают высокоэнергетические технологии очистки, характеризующиеся наличием факторов повышенного воздействия на очищаемые поверхности, что приводит к увеличению производительности и улучшению качества очистки. К таким технологиям относятся: лазерная и плазменная очистка, особые виды абразивной очистки, включая термоабразивную очистку, криогенный бластинг и аэрогидродинамическую абразивную очистку, а также кавитационная очистка.

Высокоэнергетические технологии упрочнения

Перспективным направлением упрочняющего структурного модифицирования поверхностных слоев деталей машин является обработка высокоэнергетическими концентрированными потоками энергии и вещества. Известны различные виды такой обработки. Среди них наибольшее распространение получили лазерная, электронно-лучевая, ионно-лучевая, плазменная, электроразрядная обработка и др. [62, 63].

При лазерной обработке на поверхность заготовки направляется поток фотонов (световой луч), который может распространяться в любой оптически прозрачной среде. Одна часть светового потока при падении на поверхность поглощается материалом поверхности, а другая – отражается. Доля отражённой энергии потока тем больше, чем больше длина волны излучения и меньше шероховатость поверхности материала, она может достигать до 90% и более, так что коэффициент полезного действия лазерных установок довольно мал. При электронно-лучевой обработке поверхность заготовки бомбардируется потоком ускоренных электронов (электронным лучом). Значительная часть кинетической энергии электронов превращается в теплоту в пятне контакта луча с обрабатываемой поверхностью. Доля отражённых электронов может составлять 30-40 % от их общего числа. Особенность электронно-лучевой обработки состоит в том, что концентрированный пучок электронов можно получить только в вакууме, так как в противном случае электроны, соударяясь с молекулами газов атмосферы, отдают им большую часть своей энергии, а также меняют направление движения, т.е. имеет место «рассеяние» электронного луча.

При ионно-лучевой обработке поверхность заготовки бомбардируется пучком ускоренных ионов рабочего вещества (ионов газа). Эта обработка проводится в вакууме по тем же причинам, что и электронно-лучевая.

Сталуиваясь с поверхностью ионы теряют всю свою кинетическую энергию и остаются в материале заготовки, в результате чего происходит насыщение ионами поверхностных слоев обрабатываемого материала, которое получило название поверхностного ионного легирования или ионной имплантации.

При плазменной обработке обрабатываемая поверхность заготовки подвергается воздействию потока плазмы, в результате чего поверхность нагревается, в ней происходят изменения химического состава и структуры. При интенсивном плазменном нагреве материал поверхности может расплавляться и испаряться. Для образования плазмы применяют газы, находящиеся как в атомарном состоянии (аргон, гелий), так и в молекулярном (азот, водород, углекислый газ, а также воздух). Переход газа в плазму связан с процессом ионизация, в ходе которой происходит отрыв электронов от атомов или молекул газа, для чего газ нагревают до высокой температуры с помощью электрических разрядов.

Высокоэнергетические технологии формоизменения

Среди разнообразных высокоэнергетических технологий формоизменения наиболее широкое распространение получили технологии импульсной штамповки и формоизменяющей электроэрозионной обработки.

Высокоэнергетическая импульсная штамповка металлов по сравнению с традиционной обработкой металлов давлением характеризуются короткими сроками технологической подготовки производства и низкой себестоимостью изготавливаемых деталей, особенно при их мелкосерийном выпуске. Весьма высокой эффективностью отличаются технологии импульсной штамповки, основанные на использовании энергии взрывчатых веществ, газовзрывных смесей, сжатого газа и электричества [62]. Особенностью всех этих технологий являются высокие скорости выделения энергии и передачи ее заготовке через передающую среду, которая одновременно играет роль одного из элементов штамповой оснастки (матрицы или пуансона). Путем импульсного деформирования листового металла можно проводить глубокую вытяжку, пробивку, бортовку, формовку, клепку и другие операции штампования.

Разные методы высокоэнергетической штамповки имеют свои области рационального применения. Штамповка взрывом в основном служит для изготовления крупногабаритных деталей, когда применение прессового оборудования и штампов оказывается практически невозможным или экономически невыгодным. Электрогидравлическая штамповка чаще всего используется для получения сложных по форме деталей средних размеров из трудно-деформируемых металлов. Для этих же целей используется магнитно-импульсная обработка металлов, если применение воды в качестве передающей среды является нецелесообразным. Ударная штамповка дает наибольшую эффективность при изготовлении малых партий сравнительно мелких деталей из листовых и цилиндрических заготовок.

Электроэрозионная обработка представляет собой процесс разрушения металла (или иного электропроводящего материала) в результате локального

воздействия кратковременных электрических разрядов между двумя электродами, помещёнными в ванну с диэлектрической (рабочей) жидкостью, один из которых является обрабатываемой деталью, а другой – обрабатывающим инструментом. В разрядной зоне происходит сильный нагрев металла, вызывающий его расплавление и частичное испарение.

Электроэрозионной обработке могут подвергаться практически любые электропроводные материалы независимо от их твердости. Используемые для обработки электроэрозионные станки позволяют: 1) изготавливать объемные детали сложной конфигурации, которые трудно или невозможно сделать на токарных и фрезерных станках, например, шаблоны, калибры, режущий инструмент, гибочные штампы, пресс-инструмент (штампы), модели для литья под давлением; 2) выполнять в деталях углубления и отверстия сложной конфигурации, например, охлаждающие каналы в лопатках турбин, а также отверстия с резьбой [63, 64].

Качество и производительность электроэрозионной обработки зависят от материала электрода-инструмента, который выбирается с учетом свойств обрабатываемого материала и требований, предъявляемых к обработке. Электроды-инструменты обычно изготавливают из материалов с хорошей сопротивляемостью к эрозионному разрушению – графита, вольфрама, меди и некоторых других электропроводных материалов с высокой температурой плавления и теплопроводностью. Рабочими жидкостями, используемыми при электроэрозионной обработке, являются вода, минеральное масло, керосин, смесь масла с керосином и специальные жидкости различной вязкости с добавками, обеспечивающими производительность и качество обработки.

Важным параметром процесса электроэрозионной обработки является межэлектродный зазор. С увеличением зазора уменьшается число электрических разрядов и, как следствие, производительность обработки. При чрезмерно большом зазоре разряды не происходят вовсе. С другой стороны, уменьшение зазора до величины, меньшей оптимальной, приводит к ухудшению условий доступа в зазор рабочей жидкости, что снижает эффективность разрядов, поскольку они происходят в газовой среде.

Расширяющееся применение электроэрозионной обработки обусловлено:

- большими технологическими возможностями обработки деталей, характеризующихся наличием фасонных, сложно-контурных поверхностей, а также отверстий и углублений сложной формы;
- высокой эффективностью обработки деталей из закаленных сталей, твердых сплавов, жаропрочных сплавов, тугоплавких металлов и других материалов, труднообрабатываемых резанием;
- высокой эффективностью обработки маложестких и тонкостенных деталей, обусловленной отсутствием или минимальным уровнем действующих на обрабатываемую деталь деформирующих сил, что позволяет значительно уменьшить погрешность обработки, связанную с ограниченной жесткостью технологической системы;
- высокой точностью обработки, ее технологической гибкостью и широкими возможностями по автоматизации [65].

В последние годы технология электроэрозионной обработки подверглась значительной модернизации, позволившей существенно увеличить производительность и точность обработки и улучшить качество обработанных поверхностей [66, 67]. К основным направлениям такой модернизации относятся:

- оснащение оборудования устройствами ЧПУ, которые адаптированы к условиям обработки и совмещают функции управления траекторией перемещения электрода-инструмента, оптимального управления величиной межэлектродного зазора (с помощью электромеханической следящей системы) и параметрами генератора импульсов.

- использование линейных сервоприводов для управления величиной межэлектродного зазора путем корректирования положения электрода-инструмента в соответствии с командами устройства ЧПУ

- совершенствование электрических режимов обработки за счет использования генераторов с системами автоматического управления, гарантирующими высокие характеристики обработки независимо от степени ее сложности обработки и используемых материалов.

Электроэрозионная обработка получила широкое распространение, прежде всего, благодаря своим возможностям формообразования деталей из труднообрабатываемых сплавов. Разновидностями формообразующей обработки являются электроэрозионное объёмное копирование, электроэрозионное прошивание профилированными электродами и электроэрозионное фрезерование.

3.2. Высокотехнологические технологии очистки деталей машин

3.2.1. Лазерная очистка

Технология лазерной очистки применяется для удаления с металлических поверхностей деталей окислов, продуктов коррозии, лакокрасочных, масляных и других загрязнений. Физические процессы, происходящие при лазерной очистке, в значительной мере зависят от плотности мощности лазерного излучения на поверхности.

Существует два основных механизма лазерной очистки: испарительный и ударно-механический [68]. В случае реализации испарительного механизма очистки, лазерный луч, попадая на загрязненную поверхность, проходит сквозь загрязнение и поглощается в приповерхностном слое материала детали (рис. 3.1, а) [68]. При этом плотность мощности лазерного излучения должна быть достаточной для того, чтобы нагреть материал до температуры кипения на границе раздела загрязнение – очищаемый материал, когда начинается испарение материал (рис. 3.1, б). Под давлением сильно разогретых паров слой загрязнения разрушается и удаляется с поверхности детали (рис. 3.1, в).

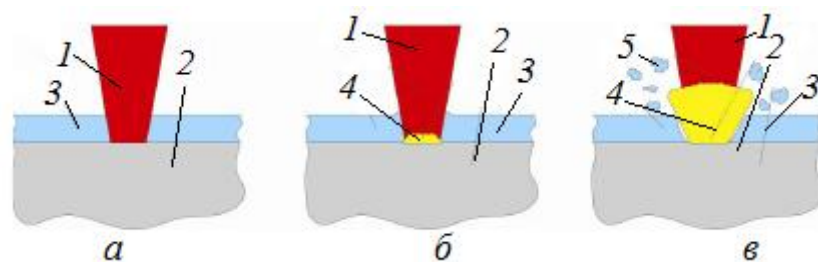
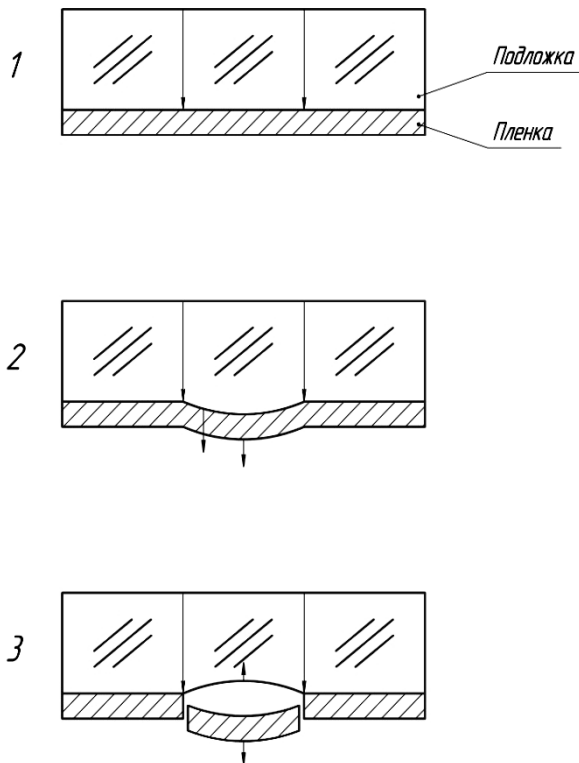


Рис 3.1. Испарительный механизм лазерной очистки
 1 – лазерный пучок, 2 – загрязненный материал, 3 – загрязнение, 4 – облако испаренного вещества, 5 – частицы загрязнения, удаленные с поверхности материала

Под действием лазерного излучения может также иметь место специфический механизм абляции (удаления) вещества, когда при поглощении излучения происходит разрыв связей в молекулах и вещество удаляется в виде плазмы. Как правило, для реализации испарительного механизма лазерной очистки требуются весьма высокие температуры, так что часть значительная тепла переходит в приповерхностный слой очищаемого материала. Это может привести к его поверхностному плавлению или испарению, инициированию химических реакций в приповерхностном слое (например, окислению, разложению), механическому повреждению (например, образованию трещин или сколов). Кроме того, при высоких температурах вещество загрязнения может вжигаться в поверхностный слой очищаемого материала. Для уменьшения теплового воздействия на поверхностный слой очищаемого материала и тем самым предотвращения его разрушения используются низкоэнергетические доиспарительные режимы лазерной очистки (рис. 3.2) [68]. При этом реализуется ударно-механический механизм очистки, связанный с быстрым тепловым расширением слоя загрязнения или поверхностного слоя очищаемого материала при поглощении лазерного излучения, вызывающего ударную волну и взрывное удаление имеющихся газов и образующихся паров (рис. 3.2).

Различают сухую и влажную лазерную очистку [68]. В первом случае излучение воздействует непосредственно на очищаемую поверхность. При этом происходит быстрое тепловое расширение приповерхностного слоя очищаемого материала и удаляемого загрязнения под действием коротких импульсов излучения, которое приводит к возникновению механических напряжений в загрязняющем слое и инерционной силы при прекращении импульса. Во втором случае излучение воздействует на поверхность, предварительно покрытую тонким слоем жидкости. При этом жидкость нагревается выше температуры ее кипения при нормальном давлении, так что инициируется объемное (пузырьковое) кипение. При импульсном излучении после прекращения очередного импульса пузырьки уменьшаются в размере и захлопываются, что приводит к возникновению ударной волны в жидкости, вызывающей разрушение слоя загрязнения и выброс жидкости и образующихся продуктов очистки.

Термомеханические механизмы разрыва пленок



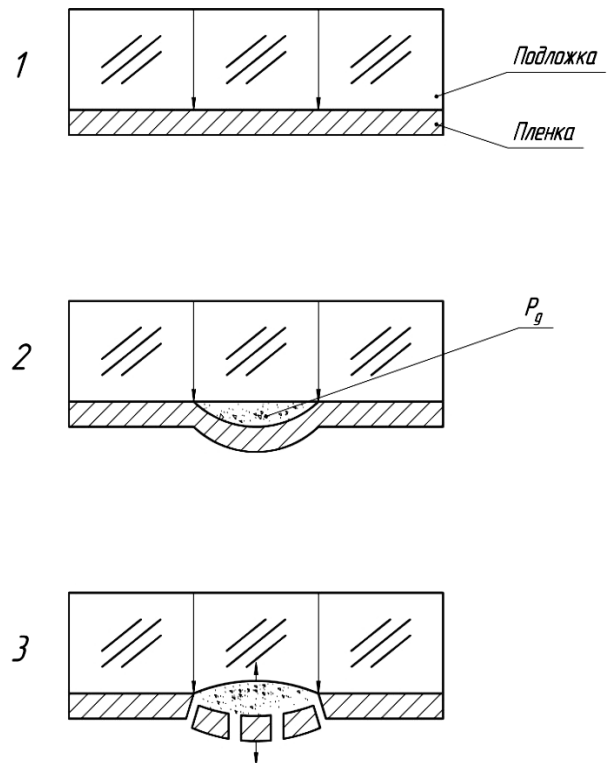
$$F_{tm} = F_{exf} + F_{tr} + F_{sh}$$

F_{exf} – сила, вызванная секущим разломом пленки под воздействием продольного термического расширения;

F_{tr} – сила, вызванная секущим термическим расширением пленки;

F_{sh} – сила, вызванная колебанием пленки при движении поверхности подложки под действием их теплового расширения

II. Взрывные механизмы разрыва пленок за счет избыточного парового давления



$$P_s = 0,5P_{sat} + P_d + P_g + P_{II}$$

P_{sat} – давление насыщенных паров при T (большое для дефекта поверхности);

P_d – давление выделяющихся молекул газа (большое для грязной поверхности);

P_g – давление вследствие газификации (испарение, разложение) подложки (промежуточного слоя) и материала (пластик и т.д.);

P_{II} – давление паров искусственного низкоиспаряемого жидкого слоя (нагретого от подложки)

Рис. 3.2. Доиспарительные низкоэнергетические механизмы лазерной очистки

Технология лазерной очистки имеет ряд достоинств, она является бесконтактной, высокопроизводительной, экологически чистой. Однако до недавнего времени ее применение ограничивалось высокой стоимостью

лазеров, их недостаточной надежностью и низким значением КПД. Широкому распространению лазерной очистки способствовало появление волоконных лазеров, чей срок службы и надежность, высокий КПД, стабильность параметров и удобство использования обеспечивают их высокую окупаемость, включая издержки на приобретение и эксплуатацию [69]. Следует также отметить высокую технологическую воспроизводимость лазерной очистки, которая обусловлена тем, лазерный луч представляет собой особый инструмент, который в отличие от, например, механических очистных щеток не «засаливается», не «тупится», не изнашивается и т.п. [68].

Ниже приведены примеры применения технологии лазерной очистки, свидетельствующие о ее высокой эффективности.

Для удаления масляных загрязнений с металлических поверхностей, в частности перед нанесением на них упрочняющих или защитных покрытий, традиционно применяют химическую очистку. Такая очистка проводится с использованием кислотных и щелочных ванн, что существенно осложняет экологическую ситуацию на предприятиях, выполняющих очистные работы. Гораздо эффективнее можно удалять масляные загрязнения с помощью лазеров, как это показано на рис. 3.3 (для очистки использовался волоконный лазер со следующими параметрами: мощность 50 Вт, частота импульсов 100 кГц, диаметр луча в зоне обработки 0,1 мм; производительность обработки 100 м²/ч) [68].



Рис. 3.3. Лазерная очистка стальной полосы от масляной пленки (слева – очищенная часть)

Для удаления окалины, ржавчины и солевых отложений с металлических поверхностей обычно применяют пескоструйную обработку. Такой способ очистки является энергозатратным. Кроме того, его применение сопряжено с экологическими проблемами, поскольку приходится решать задачи по утилизации больших объемов отработанного расходного материала – песка.

Указанных недостатков лишена лазерная очистка, которую особенно эффективно применять для очистки поверхностей, труднодоступных для обработки другими известными способами, например, внутренних поверхностей трубопроводов различных устройств (насосов, компрессоров, теплообменников и т.п.). Например, очистка внутренних поверхностей латунных труб теплообменников с малым внутренним диаметром (20-30 мм) механическими способами приводит к уменьшению толщины стенок труб, так что после 2-3-х процедур очистки требуется их замена. Эффективным решением такой проблемы является применение лазерной очистки (рис. 3.4) [68].

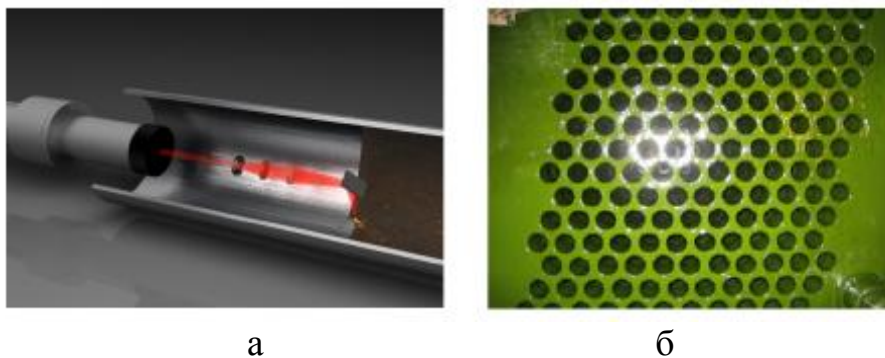


Рис. 3.4. Лазерная очистка от солевых отложений внутренних поверхностей труб теплообменников:
а – схема очистки, б – вид теплообменника

Подобной проблемой, успешно решаемой с помощью лазера, является очистка сетчатых фильтров. Благодаря использованию лазерной обработки загрязнения эффективно удаляются не только с поверхности, но и из внутреннего объема каналов фильтра (рис. 3.5) [68].

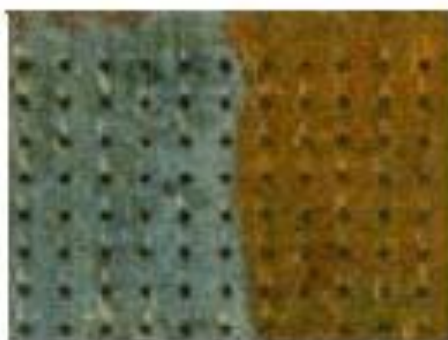


Рис. 3.5. Лазерная очистка каналов сетчатого фильтра

Еще одной проблемой, успешно решаемой с помощью лазера, является очистка сложнопрофильных поверхностей, например, резьбовых. После нарезания резьбы на ее поверхности сохраняются остатки СОЖ, а также другие загрязнения, которые препятствуют получению высокого значения адгезии наносимых в последующем покрытий. Используя лазерную очистку, можно получить энергетически активированную поверхность, близкую к ювенильной (рис. 3.6) [68], что повышает адгезию наносимого покрытия с поверхностью резьбы. Процесс лазерной очистки поверхности резьбы является весьма высокопроизводительным: время очистки резьбы трубы с условным диаметром 73 мм и длиной поверхности резьбы 110 мм составляет 5 сек.

Весьма перспективно проводить лазерную очистку поверхностей в «полевых» условиях. Пример тому – лазерная очистка от ржавчины стыков блоков пролетных строений под фрикционные соединения при сборке ферм мостов, которую проводили с помощью специального разработанного лазерного оборудования в мобильном исполнении (рис. 3.7) [68].

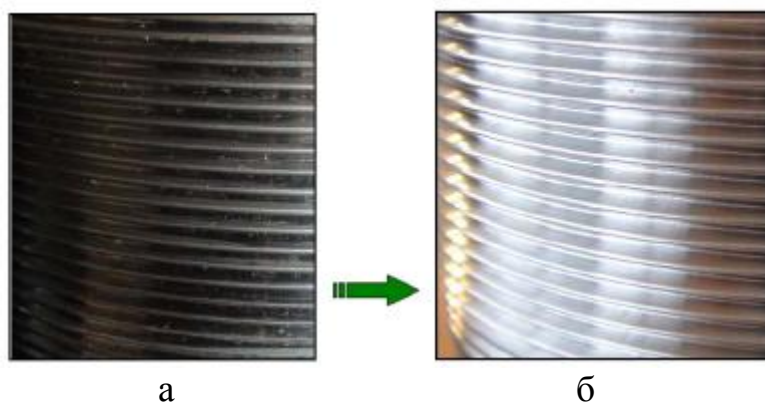


Рис.3.6. Лазерная очистка поверхности резьб труб
 а – поверхность резьбы до очистки, б – поверхность резьбы после лазерной очистки.



Рис. 3.7. Лазерная очистка стыков от ржавчины ферм моста
 а – мобильный лазер, б – ферма моста, в – поверхность до очистки,
 г – поверхность после очистки

Производительность очистки составляла 3-5 м²/ч, чистота поверхности соответствовала международному стандарту ISO SA 2,5. Коэффициент трения фрикционных соединений, подготовленных для сборки с применением лазерной очистки, был в 1,5 раза выше, чем при пескоструйной очистке, что обеспечивало большую надежность таких соединений.

Важно отметить, что удаляемый при лазерной очистке слой ржавчины толщиной 100 мкм практически не оказывал влияния на экологическую обстановку, поскольку по объему он был приблизительно в 100 раз меньше, чем отходы песка при пескоструйной очистке.

Важным преимуществом применения мобильных лазерных установок является возможность проводить очистку деталей без их демонтажа, что существенно сокращает время выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту машин. На рис. 3.8 [68] показано в качестве примера применение мобильных лазерных установок для удаления окисных пленок с поверхности пера лопатки газовой турбины, которое можно проводить без демонтажа лопатки.

Одним из распространенных направлений применения лазерной очистки является удаление старых поврежденных покрытий. Так, элементы запорной аппаратуры, например, шаровые краны в процессе эксплуатации подвергается абразивному износу, в результате чего на их поверхности появляются задиры и царапины, что приводит к повреждению защитных гальванических покрытий. Во время ремонта шаров такие покрытия необходимо удалять и наносить вместо них новые. Обычно удаление покрытий проводят путем электрохимического травления. Однако при этом неизбежно происходит травление материала шара, вызывающее недопустимые изменения геометрических характеристик всего изделия. Благодаря лазерной очистке можно селективно удалять старое покрытие с поверхности шара с сохранением его размеров [68].

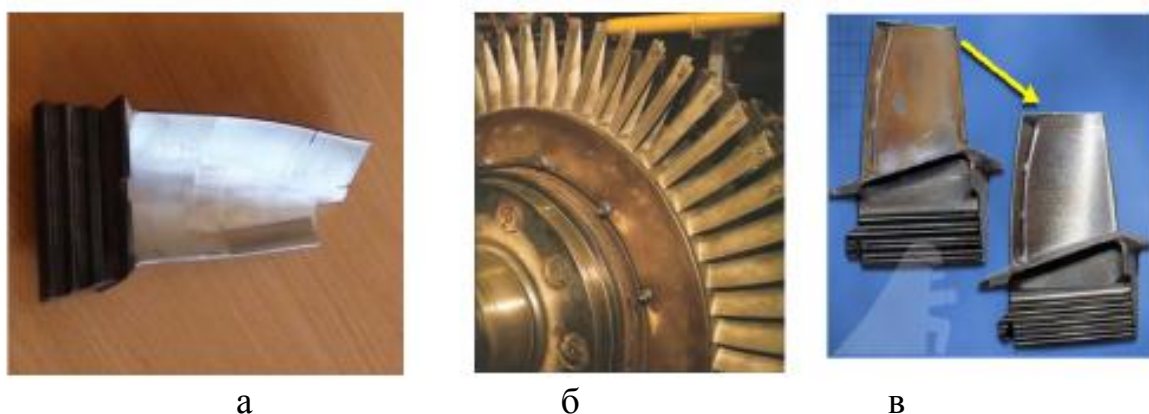


Рис. 3.8. Лазерная очистка турбинных лопаток от загрязнений:
а – очищенная лопатка, б – ротор турбины в сборе, в – лопатки до и после очистки

Аналогичным образом, используя лазеры, осуществляются лакокрасочные покрытия. Особенно эффективно проводить такую очистку с помощью специальных роботизированных установок для лазерной очистки [70].

3.2.2. Плазменная очистка

Существует два вида технологий плазменной очистки поверхностей, в основе которых лежат физические и химические процессы обработки (рис. 3.9) [71]. Также возможен вариант комплексной обработки, который сочетает в себе и физическую, и химическую обработку.

Для проведения плазменной физической обработки обычно используются нейтральные газы, например, аргон. При этом ионы газа, обладающие высокой кинетической энергией, передают ее молекулам на поверхности обрабатываемого материала, в результате чего загрязнения «выбиваются» с поверхности.

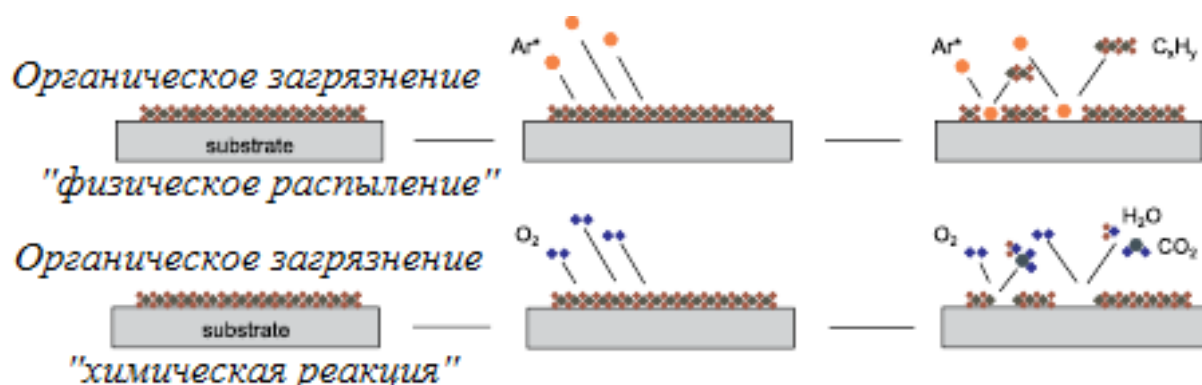


Рис. 3.9. Виды плазменной очистки поверхностей

В случае химической обработки ионы газа вступают в реакцию с органическими соединениями на поверхности обрабатываемого материала. Для проведения такой обработки обычно используются активные газы, такие как кислород и водород.

По сравнению с другими технологиями очистки поверхностей плазменная очистка обладает рядом преимуществ, в частности, высокой эффективностью очистки, в том числе возможностью удаления загрязнений в малейших трещинах; низкой температурой процесса, универсальность (с помощью плазмы можно очищать поверхности разнообразных материалов) [71].

Для удаления загрязнений с поверхности металлических насоснокомпрессорных труб перед их диагностикой и ремонтом разработан способ плазменной очистки, основанной на высокотемпературном воздействии высокоскоростными струями плазмы из факельных плазмотронов на частицы грязи с последующим их сдуванием (испарением или сублимацией) с поверхности плазменной струей [72].

Такая очистка осуществляется наиболее эффективно, когда струя плазмы воздействует на обрабатываемую поверхность под косым углом. При кратковременном воздействии плазмы на поверхность происходит плавление и интенсивная газификация асфальтосмолопарафиновых отложений. За счет теплового удара растрескиваются и отделяются от очищаемой поверхности минеральные отложения и корки оксидов. Образующиеся в результате

плазменной обработки загрязнений газообразные, а также аэрозольные и пылевидные продукты удаляются плазменными струями с очищаемой поверхности и поступают через газовод, снабженный фильтрами и системой охлаждения, в сборник отходов очистки. Поскольку процесс очистки протекает довольно быстро, то материал трубы не успевает нагреться до высоких температур (обычно его нагрев не превышает 350°C).

Разработанный способ плазменной очистки позволяет удалять загрязнения как с наружной (рис. 3.10), так и с внутренней (рис. 3.11) поверхности труб [72]. В последнем случае в трубу вводят струйный плазматрон, закрепленный на штанге. По мере движения плазматрона внутри трубы за счет взаимодействия плазменной струи с внутренними стенками с них испаряются остатки асфальтосмолопарафиновых отложений, которые затем сгорают в полости трубы. Для обеспечения полного сгорания углеводородов, в трубу подают сжатый воздух или кислород. При этом продукты полного сгорания из свободного конца трубы (рис. 3.12) [72] поступают в газовод и далее в сборник отходов очистки.



Рис. 3.10. Очистка наружной поверхности НКТ струей плазмы



Рис. 3.11. Плазматрон внутренней очистки вводят в трубу на всю ее длину



Рис. 3.12. Продукты полного сгорания истекают из трубы в охлаждаемый газовой (газовод снят)

В работе [73] предложен эффективный способ очистки металлических поверхностей в парогазовом разряде, который обеспечивает высокопроизводительную и качественную очистку поверхности деталей от практически любых загрязнений – минеральных и органических консервационных смазок, ржавчины, окалины, остатков старых гальванических и лакокрасочных покрытий, эмалевой изоляции с электропроводов. О высоком качестве очистки позволяют судить фотографии поверхности пластин стали до и после очистки, представленные на рис. 3.13.

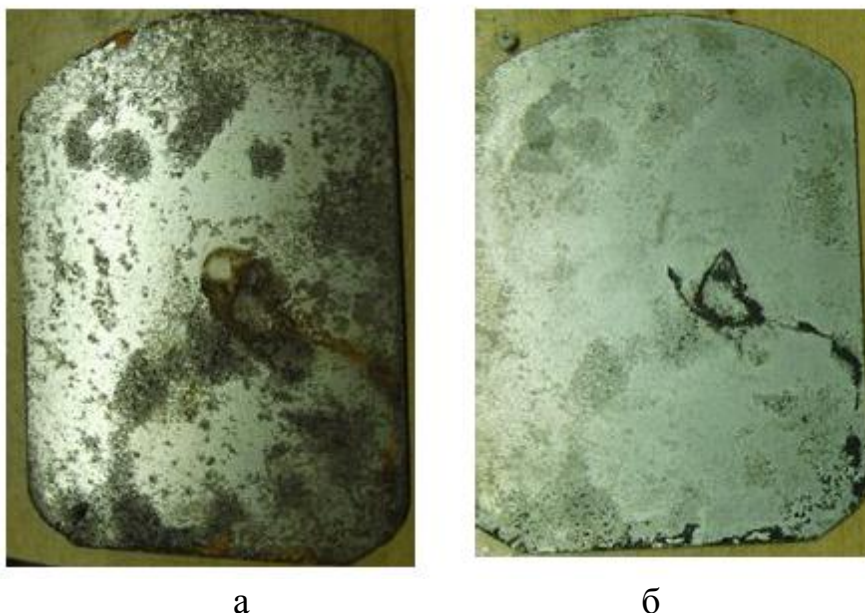


Рис. 3.13. Поверхности пластин стали до (а) и после (б) обработки

3.2.3. Термоабразивная очистка

Сущность технологии термоабразивной очистки заключается в обработке очищаемой поверхности высокотемпературной сверхзвуковой газовой струей, несущей частицы абразивного материала [74]. Она аналогична обычной струйно-абразивной (пескоструйной) обработке, главное ее отличие состоит в температуре и скорости газового потока, характерные значения которых в выходном сечении разгонного канала составляют 1250 м/с и 1200°C (и выше) соответственно. Абразивные частицы могут иметь скорость от 100 до 300 м/с в зависимости от их размеров и материала, что в 2,5-3,5 раза больше скорости частиц при обычной струйно-абразивной обработке (энергия соударения с поверхностью соответственно больше в 6-10 раз).

С помощью технологии термоабразивной очистки можно эффективно удалять с поверхности продукты коррозии и старые лакокрасочные покрытия, соли, битумные покрытия любой сложности и толщины, проводить обезжиривание, обеспыливание и активация поверхности [74]. При этом чистота поверхности соответствовала международному стандарту ISO SA 2,5.

Также в процессе термоабразивной очистки задается необходимая шероховатость поверхности, которая, как правило, находится в диапазоне значений Rz20-Rz80. После термоабразивной очистки поверхность становится равномерно подогретой до температуры 50-60°C и химически активной [74].

3.2.4. Криогенный бластинг

Технология криогеннобластинга является разновидностью технологий обычной струйно-абразивной очистки и отличается тем, что в качестве абразивного агента используется сухой лед – твердая фаза диоксида углерода [69].

В аппарате для струйной очистки с помощью сжатого воздуха гранулы сухого льда размером до 3 мм разгоняются до скорости, близкой к скорости звука, и специальным пистолетом подаются на очищаемую поверхность. Поверхность очищается в результате реализации нескольких эффектов [69, 75]. Во-первых, гранулы имеют значительно более низкую температуру, чем очищаемая поверхность (температура сублимации сухого льда при нормальном давлении равна 78,5°C). Резкое охлаждение слоя загрязнений вызывает его переход в хрупкое состояние, благодаря чему загрязнения легко отслаиваются от поверхности. Во-вторых, при соударении с очищаемой поверхностью гранул сильно нагреваются, диоксид углерода переходит в газообразное состояние. Образовавшийся газ, проникая в пространство между слоем загрязнений и очищаемой поверхностью, образует так называемый «газовый клин», отслаивающий фрагменты загрязнений от

поверхности. В-третьих, за счет большой кинетической энергии гранулы оказывают механическое воздействие на очищаемую поверхность.

Используя технологию крионеннобластинга можно очищать поверхности от ржавчины, краски, масляных загрязнений, сажи, нагара и шлака.

При помощи данной технологии успешно удаляют загрязнения от масла, бензина, токсичных остатков, сажи, нагара и шлака [69, 75].

К преимуществам этой технологии относятся:

- высокая скорость и экономичность очистки;
- низкая твердость гранул сухого льда и, как следствие, отсутствие их абразивного воздействия на очищаемую поверхность, что исключает ее механические повреждения и структурные изменения;
- безопасность для человека и окружающей среды (очистка проводится без применения химикатов, взрывоопасных или пожароопасных моющих веществ; отсутствуют вторичные отходы, поскольку не требуется удалять загрязненную воду или абразивный материал)) [69, 75].

Примером успешного применения крионеннобластинга является очистка деталей дизельной установки локомотива, отправленного на капитальный ремонт (рис. 3.14) [75]. Очистку проводили гранулами сухого льда диаметром 8 мм при давлении 0,5 МПа. В результате очистки было достигнуто удаление нагара с головки двигателя и оси.

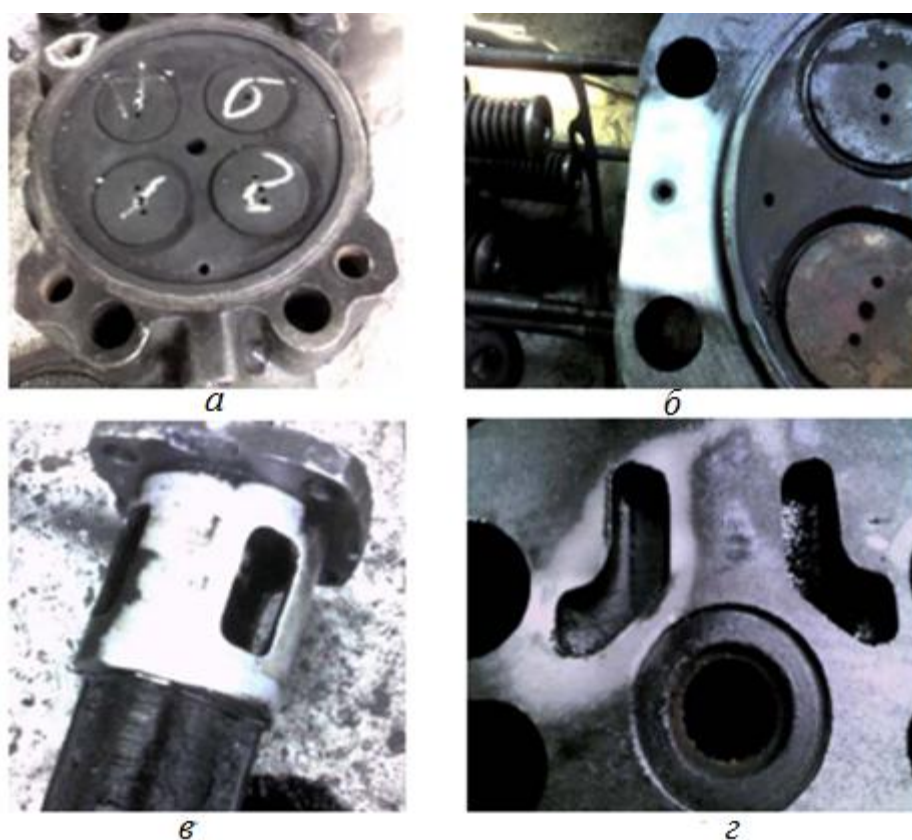


Рис. 3.14. Примеры очистки поверхностей криогеннымбластингом
а – поверхность перед очисткой; б – поверхность после обработки;
в – очистка оси; г – очистка канала

3.2.5. Аэрогидродинамическая абразивная очистка

Сущность технологии аэрогидродинамической абразивной очистки заключается в обработке поверхностей гидроабразивной аэрозольной струей.

Из резервуара на обрабатываемую поверхность детали с помощью сверхзвукового сопла подают гидроабразивную суспензию сверхскоростной струей сжатого газа [76, 77]. В результате взаимодействия струи газа и гидроабразивной суспензии происходит газодинамическое распыление последней с образованием аэрозольных частиц, включающих в себя абразивные частицы. Скорость газа на выходе из сопла достигает до 500 м/с. При таких скоростях газового потока обеспечивается дробление суспензии на мелкие водяные капли, при этом внутри капель оказываются заключенными абразивные частицы размером от 300 нм до 40 мкм. В качестве абразивных частиц используются глина, мел, кварцевая пыль и др. Ударяясь о поверхность, вода при контакте, вследствие проявления эффекта Ребиндера, уменьшает прочность обрабатываемой поверхности, после чего частица абразива механически разрушает загрязнение, а вода вымывает его фрагменты и уносит их вместе с использованным абразивом.

Рабочая жидкость (вода) не только обеспечивает транспортировку абразивных частиц от расходной емкости до обрабатываемой поверхности и непрерывно очищает обрабатываемую поверхность, удаляя отработавшие абразивные частицы и частички снятого загрязнения, но также исключает образование пыли, регулирует тепловой режим в зоне обработки, позволяет собирать отходы от очистки и использовать рабочую смесь повторно [77].

С уменьшением размеров капель суспензии увеличиваются их удельная поверхность и, соответственно, их количество в единице объема потока. Это приводит к повышению эффективности очистки [76].

Для повышения устойчивости суспензий в рабочую жидкость (воду) добавляют поверхностно-активные вещества (ПАВ) с концентрацией 2-5%, которые, наряду с эффектом очистки, позволяют проводить мойку поверхности, а также антикоррозионную обработку (при наличии в составе ПАВ ингибитора, предотвращающего коррозию очищаемых поверхностей) [76].

С повышением скорости газовой струи до значения 500 м/с растет кинетическая энергия абразивных частиц, а также уменьшается время очистки. Однако дальнейшее повышение скорости газовой струи приводит к увеличению времени очистки, поскольку при высоких скоростях, превышающих 500 м/с, время контакта капель суспензии с поверхностью становится малым. Как следствие, абразивные частицы, находящиеся внутри капель, не успевают полностью преодолеть окружающую их пленку воды, что снижает эффективность очистки [76].

Наличие в суспензии частиц размером более 10 мкм ухудшает состояние поверхности и не способствует повышению эффективности очистки по сравнению с частицами диаметром менее 10 мкм [76].

С помощью аэрогидродинамической абразивной обработки можно очищать поверхности от нагара, окалины, ржавчины и других загрязнений.

Известен модифицированный вариант способа аэрогидродинамической абразивной очистки, согласно которому аэрозольный сверхзвуковой потоком образуется ультразвуковым распылением гидроабразивной смеси и вращательным движением сжатого воздуха [78].

Этот способ реализуется с помощью установки, показанной на рис. 3.15 [78]. В корпус 1 по патрубку 6 подается сжатый воздух, поток которого, приведенный во вращательное вокруг оси движение, поступает из камеры в сопло 3, протекая по которому стремится на выход сопла. В сопле 3 за счет эжекции происходит засасывания смеси воды и твердых частиц через форсунку 2 шлангом 10. Вследствие колебаний торца форсунки 2 от пьезокерамических преобразователей ультразвукового генератора 7 смесь получает продольные колебания определенной частоты и одновременное ее дробление с образованием аэрозольного факела 4, который направляется на обрабатываемую поверхность детали 5. При взаимодействии аэрозольного факела с деталью 5 его твердые частицы счет гашения своей кинетической энергии пластически деформируют и разрушают как поверхностные загрязнения, так и микронеровности на обработанной поверхности, воздух сдувает, а жидкая составляющая смывает загрязнения.

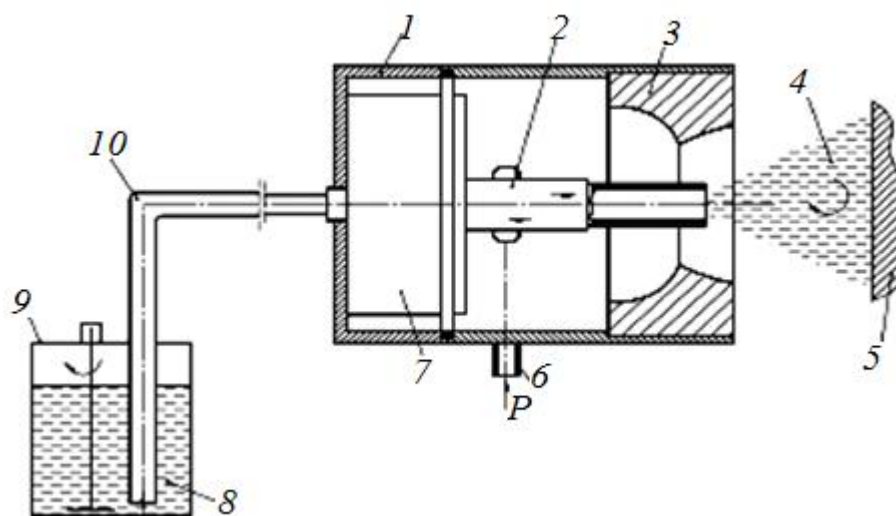


Рис. 3.15. Схема обработки поверхностей изделий аэрозольным потоком

3.2.6. Кавитационная очистка

Кавитационные моечно-очистные технологии характеризуются высокой производительностью и качеством очистки, и, кроме того, позволяют существенно уменьшить или полностью исключить применение моющих химических средств, обычно используемых в традиционных моечно-очистных технологиях [79]. В результате кавитационной обработки поверхностей их можно очищать от масляно-грязевых и углеродистых

загрязнений, накипи, окалины, продуктов коррозии, старых лакокрасочных покрытий, шаржированных частиц.

Кавитация – это процесс образования в жидкости пузырьков (каверн, полостей), заполненных газом, паром или их смесью, и их последующего захлопывания. Различают гидродинамическую и акустическую кавитацию.

Гидродинамическая кавитация возникает в результате понижения давления в потоке жидкости, которое происходит при резком увеличении скорости потока. Акустическая кавитация возникает в результате понижения давления в жидкости, которое происходит при прохождении в жидкости высокоинтенсивной звуковой волны во время полупериода разрежения. Перемещаясь с потоком в область с повышенным давлением (в случае гидродинамической кавитации) или во время полупериода сжатия (в случае акустической кавитации), пузырьки захлопываются. Для возбуждения гидродинамической кавитации служат гидродинамические излучатели, а для возбуждения акустической кавитации – электроакустические преобразователи-излучатели [280, 81]. В соответствии с двумя видами кавитации – гидродинамической и акустической, различают два вида кавитационной очистки – гидрокавитационную и акустико-кавитационную.

Кавитационная очистка может осуществляться по разным механизмам – в зависимости от свойств удаляемых загрязнений.

Решающую роль в удалении загрязнений играют микроударные волны, порождаемые захлопывающимися пузырьками [80, 82]. Они способны разрушать слои загрязнений, обладающие довольно высокой кавитационной стойкостью и прочно связанные с очищаемой поверхностью (нагар, окалина, смолистые отложения). Микроударные волны вызывают в нем развитие локальных напряжений, которые распределяются в слое весьма неравномерно. Это приводит к появлению в слое трещин, а также очагов эрозии, которые наблюдаются на поверхности слоя в виде точечных кратеров [82, 83]. По мере увеличения длительности микроударной обработки слой загрязнения во все большей мере подвергается диспергированию [80].

Загрязнения разрушаются под действием не только микроударных волн, но и кумулятивных микроструй, порождаемых захлопывающимися пузырьками. Кумулятивные микроструи разрушают загрязнения благодаря их большой кинетической энергии [84, 85].

Захлопывающиеся пузырьки могут оказывать разрушающие воздействия на слой загрязнения как с его наружной части, так и изнутри – в результате проникания вместе с микропотоками жидкости в поры и трещины слоя или под отслоившееся участки слоя [84, 85].

В разрушении загрязнений, наряду с захлопывающимися пузырьками, участвуют пульсирующие пузырьки [80, 82, 83]. Они способны разрушать в основном слои загрязнений, обладающие низкой кавитационной стойкостью и слабо связанные с очищаемой поверхностью. Попадая под отслоившийся участок слоя, они, совершая интенсивные колебания, разрывают и отслаивают его [80]. В тех случаях, когда загрязнение нанесено на поверхность в виде тонкого непрочного слоя, слабо связанного с

поверхностью (например, это может быть тонкий грязевой слой), пульсирующие пузырьки могут вызывать селективное разрушение слоя по мере своего перемещения по поверхности, оставляя вслед за собой «расчищенные дорожки» [82, 83].

В случае акустической кавитации определенную роль в разрушении загрязнений играют радиационное давление и ультразвуковой капиллярный эффект, которые способствуют проникновению моющей жидкости в микропоры или микротрещины слоя загрязнения [80].

Процессы кавитационной очистки могут иметь те или иные особенности, обусловленные свойствам удаляемых загрязнений [80, 82, 83]. Так, масляные загрязнения под действием кавитации могут подвергаться эмульгированию, масляно-грязевые – как эмульгированию (масляная фаза), так и диспергированию (грязевая фаза). Если загрязнения растворимы в моющей жидкости, то кавитация способствует их удалению за счет повышения скорости растворения. Если же загрязнения химически взаимодействуют с моющей жидкостью, то кавитация способствует их удалению за счет повышения скорости химических реакций (это имеет место при удалении загрязнений травлением).

Особым видом кавитационной очистки является абразивно-кавитационная очистка. Она применяется для повышения эрозионной активности кавитирующей моющей жидкости и осуществляется путем введения в нее тонкодисперсного абразивного материала.

Гидрокавитационная очистка

Эффективность гидрокавитационной очистки определяется конструкцией и техническими параметрами гидродинамических излучателей, которые представляют собой устройства, преобразующие часть энергии турбулентной струи моющей жидкости в энергию акустических колебаний.

Существуют различные по конструкции типы гидродинамических излучателей. Из них наиболее распространены излучатели с пластинчатыми, стержневыми и мембранными резонансными колебательными элементами, а также роторные излучатели [80, 86, 87].

Для гидрокавитационной очистки в качестве моющей жидкости можно применять обычную техническую воду, без добавления каких-либо химреактивов, а также без подогрева, что обусловлено высокими очищающими эффектами струйной кавитации [84, 56, 61, 88]. Вместе с тем находят применение и водные растворы различных моющих средств. Так, для очистки различных деталей от масляных загрязнений используется раствор NaOH [53]. Для очистки деталей двигателей внутреннего сгорания от углеродистых загрязнений было предложено использовать синтетическое моющее средство Лабомид 101 (30 г/л), которое по своим моющим свойствам значительно превосходят растворы едкого натра и различных щелочных смесей [89].

Для усиления моющего действия жидкостей используются различные способы их модифицирования, такие как: подача в жидкость пара [90], ввод в

жидкость специальных модифицирующих веществ (хорошо растворимых в жидкости веществ, твердых частиц, химически активных газов, реагирующих с жидкостью [91-93], нагрев жидкости [94].

Акустико-кавитационная очистка

Акустико-кавитационная очистка осуществляется с помощью УЗ моечно-очистного оборудования, основными узлами которого являются УЗ генератор, предназначенный для преобразования тока промышленной частоты в ток УЗ частоты, и УЗ колебательная система, обеспечивающая преобразование энергии электрических колебаний, поступающих от генератора, в энергию механических колебаний, усиление сформированных механических колебаний и их ввод в моющую жидкость [80, 86, 87, 95]. Непосредственно очистка проводится в рабочей емкости, заполняемой моющей жидкостью. Различают два типа УЗ моечно-очистного оборудования: УЗ ванны и погружные УЗ излучатели. Погружной УЗ излучатель, в отличие от УЗ ванны, не содержит в штатном комплекте специальной рабочей емкости, в процессе работы его погружают в любую подходящую емкость с моющей жидкостью. Различают модульные погружные излучатели и излучатели с погружными волноводами-концентраторами.

Одним из достоинств технологии акустико-кавитационной очистки является возможность использовать экологически безопасные моющие жидкости, которые хорошо растворяют соответствующие загрязнения, а также обладают физико-химическими параметрами, обуславливающими достижение повышенного разрушающего действия кавитации на загрязнения [21].

Выбор растворов для акустико-кавитационной очистки определяется характером подлежащих удалению загрязнений [96]. Так, для удаления загрязнений, кавитационно нестойких и химически взаимодействующих с водными растворами (типа полировочной пасты) успешно применяются водные щелочные растворы с добавкой поверхностно-активных веществ. Для удаления жировых загрязнений и шлифовальных суспензий, содержащих масла, используют органические растворители.

Абразивно-кавитационная очистка

Абразивно-кавитационная обработка деталей машин является разновидностью технологий обработки свободным абразивом. Особенность ее состоит в том, что в ней проявляются совместно эффекты абразивного и кавитационного воздействия на обрабатываемый материал. В зависимости от механизмов развития кавитации различают абразивную гидрокавитационную очистку и абразивную акустико-кавитационную очистку.

Для осуществления абразивной гидрокавитационной очистки применяются моечные устройства с особой конструкцией сопла, позволяющего за счет гидродинамических эффектов захлопывания кавитационных пузырьков разгонять абразивные частицы в водном потоке до такой скорости, при

которой обеспечивается разрушение загрязнений. При этом моющая жидкость должна подаваться под достаточно большим давлением, что может быть обеспечено с помощью водяных насосов высокого давления.

По своему механизму абразивная акустико-кавитационная очистка подобна абразивной гидрокавитационной очистки. Она имеет место в том случае, когда в моющую жидкость, в которой развивается акустическая кавитация, вводятся тонкодисперсные абразивные частицы [82].

При этом загрязнения подвергаются разрушению под действием не только кавитации, но и абразивных частиц. Эти частицы, перемещающиеся под действием акустических течений, играют роль микрорежущих инструментов. Попадая в зону действия микроударных волн, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков, они приобретают высокие скорости и могут вызывать разрушение загрязнений за счет прямых ударов о поверхность.

В качестве абразивных материалов используются обладающие хорошими режущими свойствами синтетические алмазы, карбид бора, карбид кремния с размером частиц 3-20 мкм, концентрация которых в моющей жидкости составляет 30-60 об. % [82, 83].

3.3. Высокэнергетические упрочняющие технологии

3.3.1. Лазерное упрочнение

Лазерной обработке отводится особое место среди высокэнергетических технологий обработки металлических поверхностей [97-99]. Лазерная обработка позволяет целенаправленно изменить структурнофазовое состояние и элементный состав поверхностных слоев путем последующей импульсной термообработки, что обеспечивает улучшение эксплуатационных свойств материалов, значительное упрочнение и повышение износостойкости деталей. Поверхности после лазерного упрочнения не требуют последующей механической обработки, при этом износостойкость деталей узлов трения повышается до 5 раз [98]. Внедрение технологий лазерного упрочнения обусловлено наличием серийного высокопроизводительного лазерного оборудования, высокой технологичностью процесса, большой номенклатурой обрабатываемых деталей, требующих локального упрочнения, возможностью получения заданного комплекса физико-механических свойств обрабатываемых поверхностей за счет их модифицирования различными элементами при лазерной обработке. В ходе лазерного модифицирования обрабатываемый участок поверхности металла расплавляется вместе с легирующими элементами, предварительно нанесенными на обрабатываемый участок, благодаря чему на этом участке удается получить модифицированный сплав с необходимыми эксплуатационными свойствами. Исследования структуры и свойств поверхностных слоев после лазерной обработки с различными

легирующими элементами, показывают, при рациональном выборе способа нанесения и химического состава покрытия становится возможным повысить микротвердость облученных участков поверхности деталей на 30-50%, износостойкость в 2-3 раза в сравнении с объемно-закаленными сталями. В работе [100] изучали влияние лазерной обработки на коэффициент трения скольжения и интенсивность изнашивания образцов из стали 40Х. После закалки и высокого отпуска образцы упрочняли при мощности излучения 1,2-1,5 кВт. На образцах формировались дорожки лазерной закалки, в пределах которых обеспечивалось упрочнение поверхности трения до 100%. В работе [101] приведены результаты исследований структуры и микротвердости чугуна марок СЧ25 и ВЧ40 после лазерной закалки. Микротвердость в зоне лазерной обработки для аустенитномартенситной структуры составила 600-720 НV и 600-750 НV соответственно при глубине упрочненного слоя 0,15-0,25 мм. В работе [102] исследовали влияние аргона на химический состав, структуру и свойства покрытий из диселенида молибдена (MoSe_2), которые получали импульсным лазерным осаждением при различных давлениях инертного газа. При этом достигалось снижение коэффициента трения для таких покрытий в 2 раза в сравнении с покрытиями, полученными осаждением в вакууме.

3.3.2. Электронно-лучевое упрочнение

Воздействие на поверхность деталей электронных пучков приводит к нагреву поверхностного слоя материала, последующему его плавлению и испарению в зависимости от условий и режимов обработки. Улучшение триботехнических свойств деталей достигается путем оптимизации параметров электронно-лучевой обработки. Так, значительное упрочнение поверхностных слоев углеродистых сталей У8 и 45 происходит в результате применения двухкратной электроннолучевой закалки со следующими параметрами обработки: ток пучка электронов $I = 16$ мА; скорость перемещения образцов относительно электронного пучка $V = 70$ мм/с; расстояние от выпускного окна до образца $H = 130$ мм; энергия пучка $E = 1,4$ МэВ [103].

В работе [104] изучали структуру и триботехнические свойства покрытий на основе Cu-Ni-WC , полученных путем электронно-лучевой наплавки на стальных и медных поверхностях. Было установлено, что введение в состав медного сплава карбида вольфрама существенно повышает его нагрузочную способность, благодаря чему его можно применять в тяжело нагруженных узлах трения. Электронно-лучевая обработка позволяет создавать беспористые покрытия с равномерным распределением твердой фазы по всему объему наплавленного слоя. Толщину покрытия можно регулировать изменением количества проходов электронного пучка. С увеличением содержания твердой фазы уменьшается износ, увеличивается нагрузочную способность и время приработки. В работе [104] электронно-лучевой

обработкой были получены покрытия с высоким содержанием карбида хрома на низкоуглеродистой стали. При содержании хрома 12-14% покрытия обладали повышенной коррозионной стойкостью, которая повышалась с увеличением удельной поверхностной энергии. Формирование покрытий путем электронно-лучевой наплавки карбида вольфрама с введением в состав наплавочной смеси никеля и карбида титана в качестве модификатора позволяет существенно повысить твердость и износостойкость низкоуглеродистой стали за счет аустенизации и формирования дисперсной структуры наплавленного слоя [105, 106].

3.3.3. Ионно-лучевое упрочнение

В основе существующих технологий ионно-лучевой обработки твердых тел лежат процессы воздействия на вещество пучков ускоренных ионов. Иначе ионно-лучевую обработку называют ионной имплантацией, поскольку ускоренные ионы внедряются (имплантируются) в твердое тело. Также используются термины ионное легирование, ионное внедрение, ионно-лучевое модифицирование твердых тел.

Ионная имплантация является эффективным видом модифицирования поверхностных слоев при облучении импульсными мощными ионными пучками, позволяя значительно повысить износостойкость и коррозионную стойкость деталей [107-111]. Она основана на внедрении в твердое тело ионов, ускоренных в электростатическом поле, что вызывает изменение структурно-фазового и элементного состава поверхностных слоев [109]. В качестве первичных частиц используются ионы и нейтральные атомы. При внедрении в металлическую матрицу ускоренный ион теряет энергию вследствие упругих соударений с атомами матрицы и неупругого взаимодействия с электронами. Имплантируемые частицы проникают на небольшую глубину, однако толщина слоя с измененными свойствами на 2-3 порядка превышает глубину их проникновения вследствие развития диффузионных процессов и возникновения дефектов кристаллической структуры. Ионная имплантация сопровождается распылением облучаемого материала, что приводит к уменьшению шероховатости обрабатываемой поверхности. Вл время ионно-лучевой обработки температура детали остается практически неизменной. Благодаря отсутствию термических дефектов, ионную имплантацию можно использовать на финишных операциях. В работе [107] исследовали изменения структуры, триботехнических и коррозионных свойств поверхностных слоев стали 25B20K20X4Ф2М, обработанной потоками ионов азота. Износостойкость поверхностных слоев в результате насыщения ионами азота увеличилась в 2,1 раза, микротвердость – до 12300 МПа, а скорость коррозии снижалась на 20%.

В работе [112] показано, что после ионного азотирования с наложением магнитного поля микротвердость поверхности стали X12 составляет 2100

HV, а поверхности стали P6M5 – 1950 HV. Высокая микротвердость обусловлена образованием в тонком поверхностном слое сталей высокодисперсных частиц нитридов легирующих элементов (Cr, Mo, W, V). Наложение магнитного поля ускоряет формирование азотированного слоя и увеличивает его толщину (до 200 мкм). В работе [113] изучали влияние ионно-лучевого азотирования при температурах 670-870К на структуру и свойства интерметаллического сплава Fe₃Al. Было установлено, что ионно-лучевая обработка приводит к образованию поверхностных слоев, модифицированных азотом, имеющих толщину до 15-18 мкм и микротвердость до 13200 МПа.

3.3.4. Плазменное упрочнение

В работе [114] показано, что взаимодействие в вакууме импульсного потока плазмы с титановыми образцами, покрытыми тонкой (толщиной 1 мкм) диэлектрической пленкой вызывает возбуждение микроплазменных разрядов на поверхности этих образцов. В результате микроплазменной обработки на образцах титана образуется сплошной переплавленный приповерхностный слой толщиной до 10 мкм с сильно измененной структурой и повышенными физико-механическими и триботехническими свойствами, зависящими от режима обработки. Микроплазменная обработка приводит к увеличению микротвердости поверхности титановых образцов в 5 раз, при этом интенсивность изнашивания и коэффициент трения уменьшаются в несколько раз. В работе [115] исследовали структуру, триботехнические и физикомеханические свойства конструкционной стали 40X после импульсно-плазменной обработки. Покрытие, формируемое на стали 40X, имело высокую плотность дислокаций и, как следствие, высокую твердость. В ходе обработки образуется аустенит с мелкозернистой структурой, содержание которого возрастает с увеличением интенсивности обработки. После охлаждения в стали формируется высокодисперсный мартенсит с улучшенными механическими свойствами. Результаты исследований показали, что обработка импульсной плазмой многократно повышает износостойкость поверхностей трения при смазывании маслом И-45 и эмульсией (водным 3%-м раствором масла). Кроме того, износостойкость обработанной поверхности повышается с увеличением контактного давления и скорости скольжения в 5-6 раз.

3.3.5. Взрывное упрочнение

Взрывная ударно-волновая обработка [116]

Существенным вкладом в проблему упрочнения взрывом следует рассматривать работы, особенностью которых являлись исследования структурных изменений в сталях, подверженных действию различных

зарядов взрывчатых веществ (ВВ). На основании исследований установлено, что структурные изменения, обуславливающие высокую степень упрочнения при значительной пластичности материала, могут быть получены в результате использования комбинированных зарядов ВВ с определенными параметрами. Различие в эффекте упрочнения металлов при контактном взрыве, как было установлено исследованиями, связано с начальными параметрами на границе раздела «ВВ – металл», которые определяются, прежде всего, типом ВВ, условиями развития и взаимодействия детонационной волны с преградой, исходным состоянием и поведением обрабатываемого материала в условиях высокого динамического давления. Обширные эксперименты по влиянию ударных волн на малоцикловую выносливость металлов, коррозионную стойкость различных сталей показали высокую эффективность взрывной обработки.

Впервые разработана и использована на практике схема упрочнения металлов двухслойным составом ВВ, слои которого резко отличаются по своим физико–химическим свойствам, и показана высокая эффективность этой схемы по сравнению с ранее применяемыми схемами взрывного упрочнения. Установлено, что совместное действие зарядов исключает микро- и макроразрушения материала при его обработке. Исследованы детонационные режимы в комбинированных зарядах с цилиндрической и конической симметрией, на основании которых определен диапазон оптимальных углов встречи фронта детонации с поверхностью металла, при котором достигается максимально возможный эффект упрочнения. Выполненные исследования по проблемам упрочнения металлов взрывом послужили основанием для разработки технологических условий обработки деталей металлургического и горного оборудования. Логическим продолжением работ по взрывному упрочнению стали исследования по оценке влияния ударных волн на остаточные напряжения в деталях сложной геометрической формы. Суть проблемы состояла в том, что целый ряд факторов, связанных с неоднородностью материала изделия, технологией его изготовления, а также конструктивными особенностями, вносят достаточный «запас» остаточных напряжений, существенно ограничивающих ресурс долговечности деталей машин. Обработка ударными волнами заданной конфигурации и интенсивности, с использованием высокомодульных взрывчатых веществ с малой (несколько десятков микрон) критической толщиной радикальным образом изменяет (улучшает) картину напряженного состояния. Достаточно сказать, что такая обработка повышает срок службы деталей в десятки раз. Перспективность этих работ, как альтернативы термическим и другим способам, связана с возможностью локальной обработки практически неограниченных по весу и габаритам деталей машин и конструкций и существенно экономит расход энергии.

Электровзрывное легирование

Одним из перспективных методов поверхностного упрочнения деталей является электровзрывное легирование, сущность которого заключается в

модифицировании структуры металлов и сплавов при импульсном воздействии на поверхность многофазной плазменной струей, сформированной из продуктов электрического взрыва проводников. В работах [117-119] исследовали влияние легирования металлов и сплавов электровзрывом различных материалов. Установлено, что электровзрывная обработка твердого сплава ВК10КС углеродистыми волокнами и алюминиевой фольгой приводит к повышению твердости поверхностных слоев твердых сплавов [118]. Электровзрывное легирование титаном приводит к формированию двухслойной зоны легирования [119]. Поверхностный слой оказывается обогащенным сложным карбидом (Ti, W)C, промежуточный – полукарбидом W₂C. Образованием в поверхностных слоях ВК10КС карбидов титана объясняется повышение микротвердости поверхности до 25000 МПа. Коэффициент трения после электровзрывного легирования уменьшается на 30%.

3.4. Высокэнергетические технологии формоизменения

3.4.1. Высокэнергетическая штамповка [120]

В конструкциях машин применяются довольно крупные детали из сталей и других сплавов, имеющих высокую прочность, но низкие технологические свойства. Для формообразования таких деталей требуются большие усилия, так что существующее прессовое оборудование нередко не удовлетворяет требованиям производства. Увеличение же мощности прессов и прессовой оснастки до необходимых размеров резко повышает себестоимость деталей, но вместе с тем не обеспечивает требуемого их качества.

Данная проблема может быть эффективно решена с помощью высокэнергетической штамповки. Использование для формообразования деталей энергии взрыва, энергии мощного электрического разряда в жидкости и энергии мощных импульсных электромагнитных полей позволяет при небольших объемах производства создавать детали сложной формы из высокопрочных материалов с низкими технологическими свойствами, включая крупногабаритные детали, а также детали со стенками относительно больших толщин.

Штамповка взрывом

Сущность процесса штамповки взрывом заключается в том, что энергия, образующаяся при взрыве, используется для формообразования деталей из листового материала и труб. Образующиеся при взрыве давления достигают 3000 МН, а длительность их воздействия на материал заготовки составляет доли секунды. Штамповкой взрывом можно выполнять многие штамповочные операции, создавая детали любых размеров, при этом не требуется сложное дорогостоящее технологическое оборудование и оснастка.

Штамповку взрывом наиболее эффективно применять для изготовления деталей с высокой точностью в мелкосерийном производстве.

Технологии штамповки взрывом классифицируются по виду энергоносителя и способу передачи кинетической энергии.

В зависимости от вида энергоносителя различают штамповку деталей взрывчатыми веществами бризантного действия (БВВ), порохами и газовыми смесями. Давление газов, образовавшихся при взрыве, может передаваться заготовке через поршень или передающую среду (воздух, воду, песок и др.).

Среди различных БВВ чаще всего применяется тротил, подрываемый с помощью электродетонаторов. Важная особенность БВВ – их мгновенное сгорание – взрыв, который характеризуется большой концентрацией энергии. Для передачи этой энергии на заданный участок поверхности заготовки и для ее равномерного деформирования взрыв целесообразно производить не в воздухе, а в воде, которая смягчает удар и обеспечивает нагружение заготовки по всему очагу деформации. Форма ударной волны, действующей на заготовку при взрыве БВВ, определяется формой заряда: сферический заряд создает ударную волну сферической формы, цилиндрический (в виде стержня или шнура) – цилиндрической формы, плоский – плоской формы.

Особенность порохов состоит в том, что после воспламенения они горят сравнительно медленно параллельными слоями, благодаря чему можно управлять процессами штамповки взрывом порохов. Такую штамповку осуществляют в установках закрытого типа, поскольку при сгорании в открытом объеме пороха почти не дают взрывной волны.

Горючие газовые смеси по энергосодержанию не уступают порохам и БВВ, из них наиболее подходят для штамповки взрывом воздушные и кислородные смеси природного газа, ацетилена и др. Мощная ударная волна, инициированная в газовой смеси, при своем движении сжимает смесь в тонком слое до столь высоких давлений, что они вызывают самовоспламенение смеси и выделение значительного количества энергии, которая в основном затрачивается на поддержание энергии ударной волны и нагрев продуктов реакции. При этом давление в зоне реакции намного превышает нормальное горение. Ударные волн сжатого слоя еще не реагирующей смеси и зоны реакции в совокупности образуют детонационную волну.

Штамповку взрывом БВВ производят открытым или полузакрытым способом на полигонах в искусственных водоемах – бетонных бассейнах, облицованных стальными плитами для предохранения бетона от разрушения.

Установки для штамповки взрывом порохов не требуют специальных полигонов, поэтому они могут размещаться в заготовительно-штамповочных цехах. Воздействие пороховых газов на заготовку может осуществляться непосредственно, а также передаваться через промежуточные твердые тела и жидкости. Разные варианты схем установок закрытого типа, в которых энергоносителем является порох, показаны на рис. 3.16 [120].

Установка для штамповки взрывом газовой смеси содержит взрывную камеру, которая заполняется горючим газом и кислородом. При

срабатывании запальной свечи в детонационной трубке горючая смесь воспламеняется. Ее горение в трубке быстро переходит в детонацию. Образующаяся детонационная волна проникает во взрывную камеру, где происходит взрыв горючей смеси.

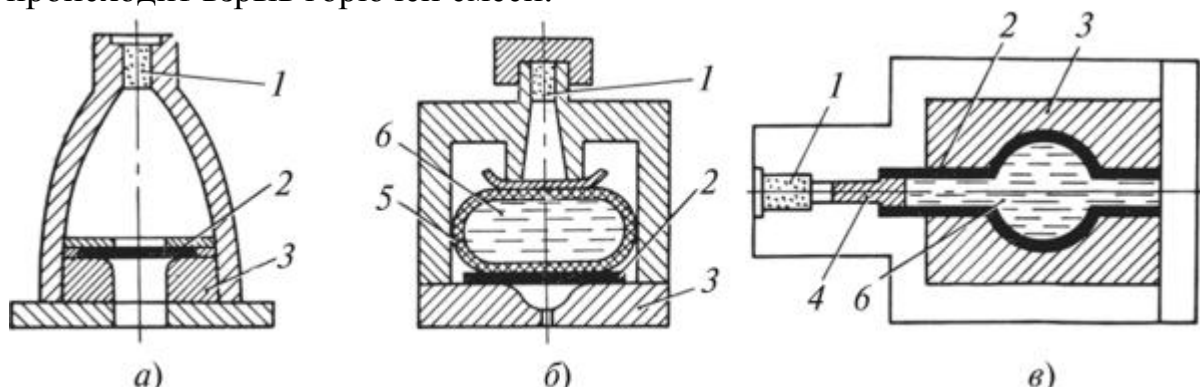


Рис. 3.16. Схемы установки для штамповки взрывом пороха
a – непосредственное воздействие на заготовку газового потока от взрыва; *б* – воздействие газа через жидкую среду; *в* – передача давления газа с помощью поршня на жидкость, а через нее – на заготовку;
 1 – заряд; 2 – заготовка; 3 – матрица; 4 – поршень; 5 – резина; 6 – жидкость

Электрогидравлическая штамповка

В основе процесса электрогидравлической штамповки (ЭГШ) лежит преобразование мощного электрического разряда в жидкости в механическую энергию ударной волны. ЭГШ может осуществляться двумя способами: 1) в результате разряда конденсаторов через зазор между электродами в жидкости и 2) в результате разряда конденсаторов через инициатор (тонкую проволоку). Первый способ штамповки применяется для изготовления деталей путем постепенного формообразования посредством большого числа разрядов. При втором способе штамповки перед разрядом между электродами устанавливается тонкая проволочка диаметром 1...2 мм из алюминия, вольфрама, тантала, ниобия и др., благодаря чему можно в несколько раз уменьшить рабочие напряжения.

Схема установки для ЭГШ детали сферической формы показана на рис. 3.17 [120]. Заготовка размещается между фланцем корпуса установки и матрицей. В нижней части корпуса, которая заполняется водой через кран, расположены электроды, которые подключены к батарее конденсаторов, питающейся от трансформатора через выпрямитель. Свободные концы электродов могут иметь искровой зазор либо соединяются тонким иницирующим проводником. Перед штамповкой из полости между матрицей и заготовкой отсасывается воздух с помощью насоса через вакуумную линию. При замыкании электрической сети разрядником заряд, накопленный в батарее конденсаторов, вызывает образование электрического разряда в жидкости между электродами мощного. В результате мгновенного выделения большого количества энергии происходит интенсивный нагрев и

испарение инициирующей проволоочки и небольшого объема жидкости с образованием парогазовой полости.

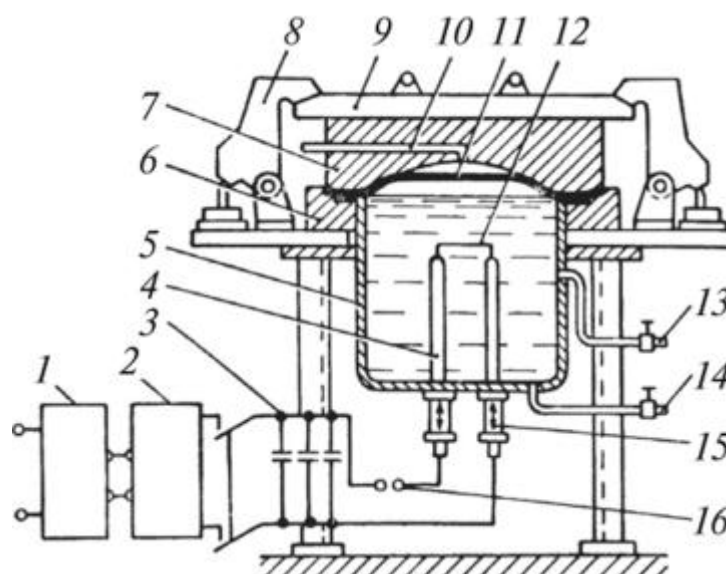


Рис. 3.17. Схема установки для электрогидравлической штамповки
 1 – трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – батарея конденсаторов;
 4 – электроды; 5 – корпус; 6 – фланец; 7 – матрица; 8 – пневмозажим;
 9 – плита; 10 – вакуумная линия; 11 – заготовка; 12 – инициирующий проводник; 13, 14 – краны; 15 – регулятор высоты подъема электродов; 16 – разрядник

Быстрое расширение парогазовой полости вызывает образование ударной волны, которая воздействует на окружающую жидкость и, следовательно, на заготовку (т.е. имеет место электрогидравлический эффект). Гидравлический удар в жидкости имеет тем сильнее, чем больше мощность и меньше длительность импульса электрического разряда в жидкости. С помощью ударной гидравлической волны осуществляется штамповка деталей из листовых и трубчатых заготовок.

Электромагнитная штамповка

Сущность процесса электромагнитной штамповки поясняется на рис. 3.18 [120]. Заготовка 5 размещается в поле соленоида 7. При замыкании разрядника 4 импульс электрического тока, накопленный в батарее конденсаторов 3, протекает через обмотку соленоида, сердечником которого служит оправка 6. При этом возникает магнитное поле, наводящее вихревые токи в заготовке. В результате взаимодействия магнитного поля соленоида с вихревыми токами возникают силы, которые направлены перпендикулярно к поверхности заготовки и служат для формоизменения. Чем больше ток и скорость его изменения в обмотке соленоида, тем сильнее его магнитное поле и ЭДС, индуцируемая в заготовке, и, соответственно, тем больше силы, оказывающие формоизменяющее действие заготовку. Для зарядки батареи конденсаторов в цепь включены трансформатор 1 и выпрямитель 2.

Путем электромагнитной штамповки можно получать детали из листовых и трубчатых заготовок. В отличие от штамповки на механических прессах материал заготовки деформируется без соприкосновения с инструментом, так что качество его поверхности не нарушается.

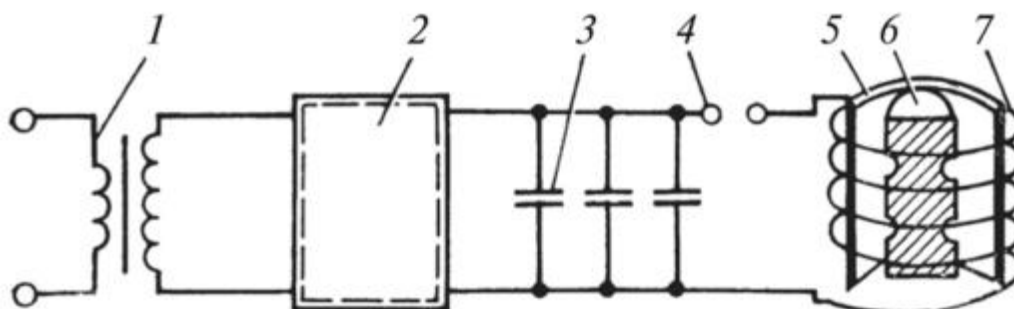


Рис. 3.18. Схема электромагнитной импульсной штамповки
1 – трансформатор, 2 – выпрямитель, 3 – конденсаторов, 4 – разрядник,
5 – заготовка, 6 – оправка, 7 – соленоид

Вибрационная штамповка

Для повышения эффективности штамповки высокопрочных малопластичных металлов на статические усилия формования налагают вибрации околосвуковых частот. При этом требуемое усилие формовки в несколько раз уменьшается, а возможная степень деформации увеличивается.

При вибрационной вытяжной штамповке пульсирующее давление может сообщаться пуансону (рис. 3.19 [120]), матрице или прижиму.

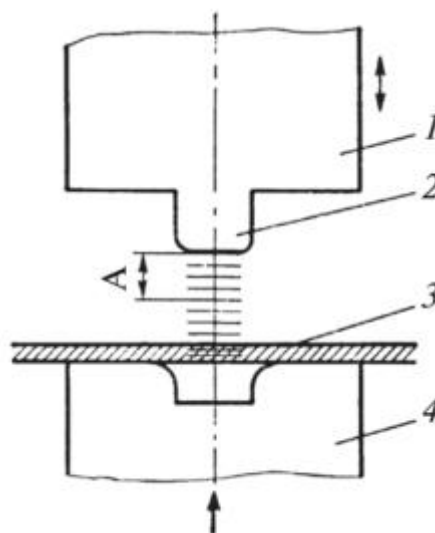


Рис. 3.19. Схема вибрационной штамповки
1 – вибратор; 2 – пуансон; 3 – заготовка; 4 – матрица

Вибрационную штамповку рационально применять в различных операциях формообразования (вытяжка, отбортовка, формовка) небольших и средних деталей из высокопрочных малопластичных металлов.

3.4.2. Электроэрозионная обработка

Электроэрозионное объёмное копирование

В процессе электроэрозионного объёмного копирования на электроде-заготовке отображается форма поверхности электрода-инструмента [121]. Этот вид электроэрозионной обработки предполагает фасонное формообразование полости, которое обычно получают обработкой на копировально-фрезерных станках или станках с ЧПУ. Обрабатываемая поверхность на заготовке является при этом обратным отражением формы соответствующей поверхности электрода-инструмента, как показано на рис. 3.20, а [122]. Данный способ характеризуется простотой рабочих движений и широко применяется при изготовлении штампов, пресс-форм, форм для литья и других изделий сложной формы.

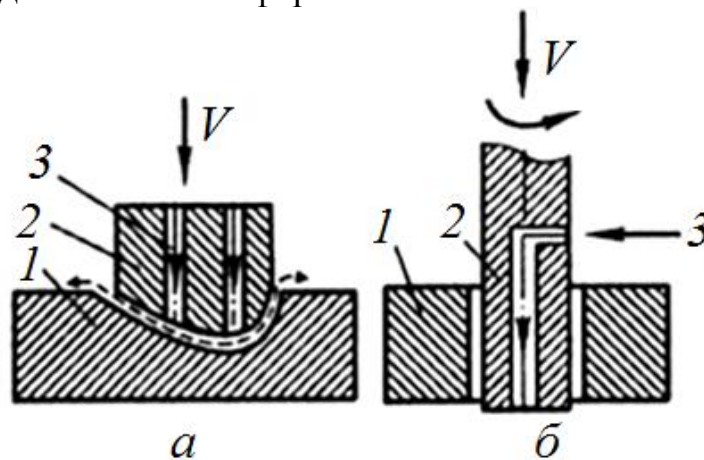


Рис. 3.20. Схемы процессов электроэрозионного объёмного копирования (а) и электроэрозионного прошивания (б)

1 – обрабатываемая деталь; 2 – инструмент; 3 – подача рабочей жидкости;
V – направление движения электродов

Для осуществления электроэрозионного объёмного копирования используют электроэрозионные копировально-прошивочные станки, точность обработки на которых в значительной мере зависит от точности электрода-инструмента и его износа в процессе работы [67]. Современное оборудование для электроэрозионного объёмного копирования оснащено устройствами ЧПУ, адаптивными генераторами импульсов и устройствами автоматической смены электродов и деталей, тем самым обеспечивается не только высокая точность обработки, но и уменьшение времени обработки. Благодаря оснащению оборудования компьютерными системами программного управления, становится возможным осуществлять задание и управление перемещениями электрода-инструмента и детали по 4 или 5 координатам, а также автоматическое программирование процесса эрозионной обработки.

Электроэрозионное прошивание профилированными электродами

В процессе электроэрозионного прошивания профилированными электродами-инструментами последние, углубляясь в электрод-заготовку, образуют отверстия постоянного сечения [121], как показано на рис. 3.20, б [122]. Наиболее широко этот способ используется для получения сквозных и глухих отверстий различной формы, например, соединительных каналов и пазов в деталях гидро- и пневмоаппаратуры, в том числе расположенных в труднодоступных местах. С помощью этого способа можно делать отверстия в тонкостенных заготовках, создавая изделия типа фильтров и сит, а также отверстия малых диаметров (в сотые доли миллиметра) в форсунках и распылителях. Кроме того, этим способом формируют сложно-профильные элементы поверхности штампов и пресс-форм.

Прошивание можно проводить с одновременным перемещением или поворотом электрода-инструмента по заданному закону в соответствии с командами устройства ЧПУ, устанавливаемого на электроэрозионном оборудовании. Это позволяет с помощью электрода одной простой конфигурации получать различные формы поверхностей (рис. 3.21 [67]).

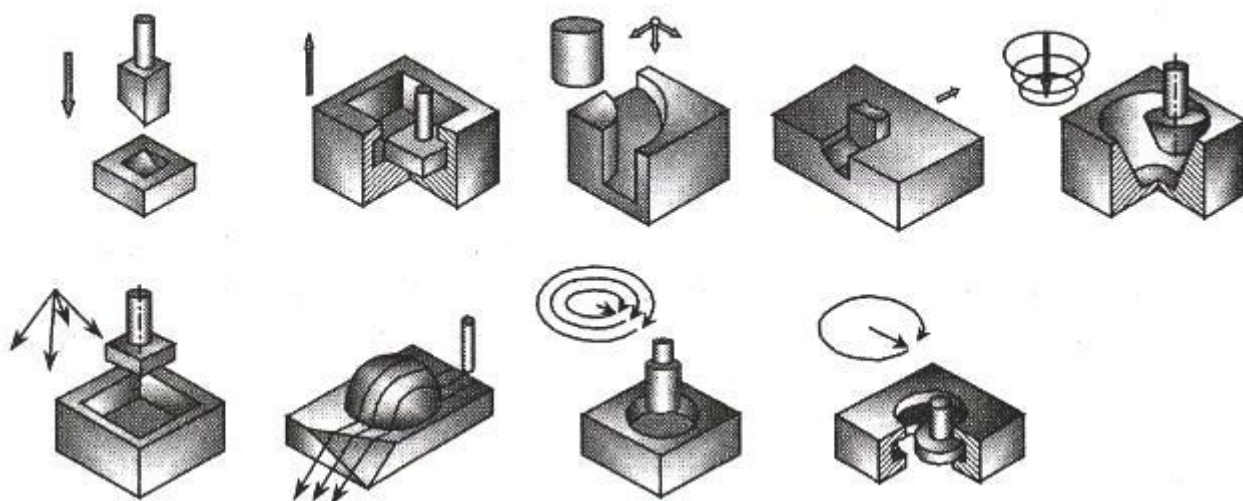


Рис. 3.21. Схемы обработки на электроэрозионном прошивном станке с ЧПУ

Примером успешного применения электроэрозионной обработки является изготовление лап культиваторов [123]. В условиях массового и серийного производства таких деталей обычно применяют листовую сталь толщиной от 4 до 6 мм. Требуемые механические свойства обеспечиваются термообработкой. Детали крепят болтами с квадратными головками, не позволяющими деталям проворачиваться. Под болты выполняют квадратные отверстия с фасками. Толщина металла на квадрате в наиболее тонких местах, как правило, не превышает 1,5 мм. В процессе термообработки металл в тонких местах может выгорать, так что опорная площадь соприкосновения болта со стенками отверстия уменьшается. Если фиксирование под рабочей нагрузкой оказывается ненадежным, то болты могут проворачиваться, меняя форму отверстия с квадрата на круг. Получить

отверстия штамповкой или резанием после термообработки, так чтобы обеспечить нужную геометрию отверстий, практически невозможно. Для решения проблемы эффективно использовать электроэрозионную обработку множественным разрядом, которая позволяет получить такие отверстия после термообработки заготовок, чем обеспечивается прочность стенок квадрата.

Электроэрозионное фрезерование

Электроэрозионное фрезерование обеспечивает более быструю и эффективную обработку, чем механическое резание или другие способы электроэрозионной обработки. При электроэрозионном фрезеровании сложных фасонных поверхностей используются сравнительно дешевые электроды-инструменты в виде стержней или проволоки, направляемой через кондукторные втулки [67]. Диаметр таких электродов-инструментов выбирается с учетом кривизны элементов обрабатываемой поверхности.

Электроэрозионное фрезерование является новым видом электроэрозионной обработки, получившим развитие в последние годы с появлением оборудования с ЧПУ, адаптированного для этих целей, и устройств поддержания величины межэлектродного зазора [66]. Благодаря электроэрозионному фрезерованию удастся существенно сократить цикл технологической подготовки производства, а также обеспечивается высокая производственная (возможность легкой переналадки на выпуск других изделий). В настоящее время оно используется в основном для обработки мелких деталей.

Получающее с каждым годом все большее распространение электроэрозионное микрофрезерование имеет ряд особенностей, связанных со свойствами используемых электродов [124]. В частности, электроды обладают стандартными размерами и, следовательно, больше нет необходимости специально подготавливать электроды, как при штамповке; они имеют малый диаметр ($< 0,8$ мм) и довольно большую длину (до 40 мм), что делает их гибкими, а также подвергаются динамическому самоцентрированию при высокоскоростном вращении. Все это делает электроэрозионное микрофрезерование довольно оригинальной технологией, интерес к которой обусловлен не только возможностью использования длинных, тонких и недорогих электродов, но также отсутствием сил резания, что позволяет обрабатывать глубокие полости с высокой точностью без риска поломки инструмента.

Электроэрозионное микрофрезерование обладает мощным инновационным потенциалом: на сегодняшний день не существует иных технологий обработки, способных обрабатывать столь точные, мелкие детали полостей с таким высоким соотношением сторон (> 30).

Электроэрозионные фрезерные инструменты представляют собой трубчатый медный электрод, вращающийся с высокой скоростью в диэлектрическом масле и удаляющий материал детали за счет искры. По аналогии с обычным фрезерованием, движение электродов формирует

геометрию заготовки за счет удаления материала. Электроэрозионное фрезерование похоже на электроэрозионное фрезерование в штампе, поскольку при этом выполняются непересекающиеся полости. Оно также похоже на электроэрозионную резку проволокой, поскольку трубчатые электроды являются стандартными расходными деталями и износ компенсируется заменой электрода (рис.3.22).



Рис. 3.22. Схемы электроэрозионного объемного копирования (а) и электроэрозионного фрезерования (б)

На рис. 3.23 показан электроэрозионный фрезерный станок, снабженный высокоскоростным шпинделем [124]. Электрод фиксируется электрододержателем, изолированным от стандартного инструментодержателя. Ток, необходимый для искры, подводится к электрододержателю через графитовые контакты.



Рис. 3.23. Оборудование для электроэрозионного фрезерования

На рис. 3.24 продемонстрированы возможности применения электроэрозионного фрезерования для формирования глубоких канавок и изготовления деталей сложной формы.



Рис. 3.24. Электроэрозионно-фрезерная обработка микрополостей сложной формы

ГЛАВА 4

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

4.1. Интегрированные технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика

Интегрированные технологии в общем случае представляют собой взаимосвязанную совокупность отдельных технологий. Известны разные принципы интегрирования технологий. Пожалуй, наиболее распространенными являются компьютерно-интегрированные производственные технологии, представляющие собой совокупность технологий производства изделий с использованием компьютеров для управления всем производственным процессом. Такая интеграция позволяет осуществлять оперативный обмен информацией об отдельных процессах, делает производство более интенсивным и менее подверженным ошибкам, открывает широкие возможности для создания автоматизированных гибких производственных процессов.

В более широком смысле под компьютерно-интегрированными производственными технологиями понимается совокупность технологий, образующих единую автоматизированную компьютерную систему, в которую объединяются инженерные, производственные, маркетинговые и вспомогательные функции производственного предприятия. В такой системе оказываются связанными между собой посредством компьютера разнообразные функциональные области: проектирование, планирование и организация производства, снабжение и сбыт, учет затрат и т.д.

Компьютерное интегрирование производственных технологий можно рассматривать как особый подход к организации производства продукции на принципах стратегии CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support), предполагающей широкое использование компьютерной техники, современных информационных и автоматизированных средств на всех этапах жизненного цикла продукции, включая маркетинговые исследования, составление технического задания, проектирование, технологическую подготовку производства, изготовление, поставку, эксплуатацию, материально-техническое обеспечение и утилизацию, и, соответственно, взаимодействие всех участников этого цикла: заказчиков продукции, поставщиков / производителей продукции, эксплуатационного и ремонтного персонала.

Управление производственными процессами на принципах стратегии CALS обеспечивает повышение качества продукции благодаря следующим возможностям компьютерной техники [125]:

- организация контроля проектной и производственной деятельности с помощью программных средств управления потоком работ;

- организация диалога различных специалистов при планировании производственной деятельности для исключения дублирования ее выполнения;

- организация прямых связей между проектными подразделениями, в том числе оперативная передача от одного подразделения другому разрабатываемой конструкторско-технологической документации в электронном виде.

Одним из важных направлений развития компьютерно-интегрированных производственных технологий являются разработка и использование технологий сквозного компьютерного проектирования технологических процессов с учетом взаимосвязи различных технологических переделов, а также возможностей новых материалов и технологий их обработки [126, 127].

К числу компьютерно-интегрированных производственных технологий, получивших распространение в техническом сервисе, относятся интегрированные технологии электронного документирования [12, 125] и интегрированные логистические технологии [128, 129].

В последние годы все шире применяются интегрированные технологии обработки материалов, которые представляют собой интеграцию двух или более технологий, характеризующихся различными по своей природе процессами, лежащими в основе каждой из этих технологий (различными по своей природе воздействиями на обрабатываемые материалы) [130-134]. Такие технологии также называют комбинированными или гибридными.

В техническом сервисе все возрастающая роль отводится интегрированным технологиям резки, финишной и упрочняющей обработки, которые позволяют существенно повысить эффективность восстановления вышедших из строя деталей и изготовления запасных деталей, необходимых для ремонта эксплуатируемой техники. С помощью таких технологий можно повысить качество изготавливаемых или восстанавливаемых деталей, снизить затраты трудовых, материальных и временных ресурсов.

Разные обрабатывающие технологии в рамках интегрирования могут реализовываться параллельно, последовательно либо параллельно-последовательно. Эффекты, получаемые в результате их интегрирования, могут быть различными по характеру своего достижения – в зависимости от той роли, какую играют отдельные технологии в рамках интегрирования. По этому признаку интегрированные обрабатывающие технологии можно условно разделить на два типа.

К интегрированным обрабатывающим технологиям первого типа относятся такие, которые представляют собой сочетание технологий, из которых одни (основные) являются собственно технологиями обработки, дающими определенные эффекты обработки (например, разрезание, снижение шероховатости, упрочнение), в то время как другие (вспомогательные) только лишь способствуют реализации основных технологий.

Пример тому – электромеханическая обработка [135], сущность которой состоит в создании искусственного источника тепла в зоне стружкообразования от ввода технологического электрического тока, что ведет к снижению контактных нагрузок на переднюю и заднюю поверхности режущего инструмента, увеличению стойкости инструмента и производительности обработки.

Другой подобный пример – плазменно-механическая обработка [133], заключающаяся в том, что при обработке резанием высокопрочных материалов перед резцом устанавливается плазмотрон, нагревающий узкую зону обрабатываемого материала. Поскольку при нагреве прочность обрабатываемого материала снижается, а пластичность увеличивается, то без ущерба для качества поверхности можно увеличить подачу и глубину резания. В этих примерах термическая обработка (электрический или плазменный нагрев) поверхности условия обработки резанием, но при этом не приводит к упрочняющему эффекту, что обычно характерно для технологий термического упрочнения.

К интегрированным обрабатывающим технологиям второго типа относятся такие, которые представляют собой сочетание технологий, каждая из которых в отдельности обеспечивает те или иные эффекты обработки. Так, интегрированной технологией обработки второго типа является термомеханическая обработка, которая совмещает в себе две технологии – пластическое деформирование и термическую обработку, каждая из которых в отдельности обеспечивает эффекты упрочнения (в результате наклепа и закалки, соответственно) [136, 137]. Особую группу интегрированных технологий второго типа представляют синергетические технологии. Они, кроме эффекта, равного сумме эффектов, даваемых каждой из интегрируемых технологий в отдельности, обеспечивают дополнительно новый эффект, который не может быть достигнут при реализации каждой из интегрируемых технологий в отдельности (либо достигается, но при чрезмерно больших ресурсных затратах, а потому является неоправданным) [130, 131]. Интегрированные технологии иногда называют комплексными технологиями, что, однако, считается не совсем корректным, поскольку комплексные технологии предполагают совершенствование производства на основе использования не столько технических, сколько организационных подходов [130]. Так, широко распространенный термин «комплексная механизация» означает максимально возможное применение различных машин на всех этапах производственного процесса.

4.2. Компьютерно-интегрированные технологии

4.2.1. Интегрированные технологии электронного документирования

Исходными предпосылками для создания интегрированной системы электронного документирования на производственном предприятии

являются, во-первых, наличие определенного парка программно-технических комплексов в основных подразделениях предприятия и, во-вторых, наличие специалистов предприятия, владеющих навыками работы с базовыми программными продуктами, обеспечивающими получение электронных документов.

Интегрированная система электронного документирования создается в несколько этапов, каждый из которых характеризуется определенными изменениями в условиях и масштабах вовлечения программно-технических средств и специалистов предприятия в процесс создания системы (табл. 1) [125].

Таблица 1. Этапы создания интегрированной системы электронного документирования на предприятии

№ этапа	Характеристика этапа
1	Методы электронного управления документами не применяются, автоматизация бизнес-процессов с их участием не проводится
	Используются как бумажные, так и электронные документы
	Компьютеры используются для создания документов, которые затем распечатываются и в бумажной форме поступают в традиционный документооборот предприятия
	Электронные документы создаются и хранятся работниками предприятия индивидуально на персональных компьютерах
2	Имеются элементы совместного использования работниками предприятия электронных документов, хранящихся в файловой системе
	Управление общим файловым пространством осуществляется на основе набора правил, закрепленных определенными распорядительными документами
3	Используется единый централизованный подход к управлению электронными документами в масштабе предприятия
	Все электронные документы предприятия хранятся в систематизированном виде в едином хранилище, обеспечивающем быстроту их поиска и выдачу в установленном порядке пользователям
4	Имеется автоматизация отдельных бизнес-процессов с участием электронных документов
5	Предприятие приобрело опыт в управлении электронными документами, который используется в решении различных производственных задач, таких как управление качеством продукции, управление разработкой новой продукции, управление технологической модернизацией и т.п.

Как правило, каждый этап создания интегрированной системы электронного документирования имеет как достоинства (в сравнении с предыдущим этапом), так и недостатки (в сравнении с последующим этапом). Особенности проявления достоинств и недостатков системы на разных этапах ее создания можно рассмотреть на примере сравнения ее состояния на 1-м и 2-м этапах.

Недостатки 1-го этапа (когда система только начинает создаваться) состоят в следующем:

- потери времени на повторное создание документов, которые на предприятии ранее уже кем-то были созданы;
- неэффективное использование компьютеров, которые фактически выступают в роли печатной машинки;
- большая продолжительность бизнес-процессов из-за долгого хождения бумажных документов на предприятии;
- большие затраты на хранение бумажных документов;
- наличие рисков утери важной информации, содержащейся в электронных документах, из-за ошибочных действий недостаточно опытного персонала;
- зависимость результативности бизнес-процессов от работы персонала, поскольку информация хранится на персональных компьютерах, так что ее владельцем оказывается не предприятие, а конкретный специалист, в отсутствие которого может остановиться производственный процесс из-за невозможности оформления нужных документов, в том числе рутинных (накладные, счета-фактуры, акты сдачи-приемки и т.д.).

Большинство недостатков 1-го этапа полностью или частично устраняется на 2-м этапе, в чем проявляются его достоинства по сравнению с 1-м этапом. Вместе с тем на 2-м этапе, по мере увеличения объема электронных документов, появляются новые проблемы, а именно:

- невозможно быстро отыскать нужный электронный документ;
- нет уверенности в том, представлен используемый ли электронный документ в последней актуальной версии;
- нет строгого контроля сохранности электронных документов, имеется опасность их бесконтрольного несанкционированного изменения или удаления;
- легкость копирования приводит к тому, что копия одного и того же электронного документа может храниться одновременно у многих пользователей, что значительно увеличивает объем ресурсов хранения;
- затрудняется совместное использование информации работниками различных подразделений из-за невозможности обеспечения удобного доступа к информации, ее эффективного поиска;
- производительность работы на компьютерной технике недостаточна для обеспечения необходимых информационных ресурсов в масштабах предприятия.

Недостатки 2-го этапа устраняются на последующих этапах создания интегрированной системы электронного документирования.

Одной из главных составляющих системы технической эксплуатации машин является нормативно-техническая документация (НТД). Обычно она рассредоточена по многим информационным источникам. Ряд компонентов НТД, в частности, относящихся к техническому обслуживанию (ТО) и техническому диагностированию (ТД) машин, постоянно развиваются, обновляются, корректируются. Поэтому оперирование такой документацией, включая подбор и систематизацию ее обновленных компонентов, представляет значительные сложности, вследствие чего специалисты, во-первых, тратят много времени на работу с документами и, во-вторых, нередко используют устаревшие или неполные комплекты документов, что в целом ведет к снижению эффективности ТО и ТД.

Одним из путей решения указанных проблем является широкое применение компьютерной техники для оперирования НТД в процессе непосредственного выполнения операций ТО и ТД, в частности, использование полного комплекта интегрированной электронной документации. Это позволяет более полно и качественно обрабатывать информационные потоки и формировать информационную базу данных технической эксплуатации машин, необходимую для эффективной организации ТО и ТД, в том числе информационно-справочные базы данных, информационные системы диагностирования и прогнозирования технического состояния машин.

Типичным примером реализации интегрированных технологий электронного документирования в техническом сервисе является система интегрированной электронной нормативно-технической полнокомплектной документации и индивидуализированного прогнозирования параметров технического состояния и технического обслуживания грузовых автомобилей (СИЭДиИП ТОГА) [12].

Основу информационной системы составляет работа с НТД. Для эффективного использования НТД необходима структура СИЭДиИП ТОГА, в которой НТД распределяется по направлениям выполняемых операций ТО и ТД. Структура информационной системы представляет совокупность различных взаимосвязанных информационных блоков. В частности, в состав системы могут входить такие блоки как: пункты ТО автомобилей; операции ТО и ТД автомобилей; основные нормы затрат времени на операции ТО и ТД автомобилей; оценка остаточного ресурса узлов и агрегатов автомобилей; оборудование, инструменты и приборы, используемые в процессе обслуживания автомобилей; горюче-смазочные и расходные материалы, их нормы расхода; основные регулировочные параметры узлов и агрегатов; модели (конструкции) обслуживаемых автомобилей; запчасти и их взаимозаменяемость.

Благодаря использованию СИЭДиИП ТОГА обеспечивается совершенствование нормативно-документальной поддержки проведения операций ежедневного ТО, ТО при обкатке, ТО-1, диагностирования Д-1 и Д-2, ТО-2, сезонного ТО грузовых автомобилей. Система позволяет более

быстро и точно прогнозировать параметры технического состояния автомобилей на предстоящие периоды их эксплуатации.

4.2.2. Интегрированные логистические технологии

Логистика представляет собой многогранную управленческую деятельность в области снабжения, сбыта, производства, транспортного, информационного обслуживания и складского хозяйства.

Современная логистика носит интегрированный характер, который проявляется в согласованных действиях субъектов-партнеров с целью сокращения логистических затрат [128]. Интеграционная логистическая система как форма межкорпоративного сотрудничества поставщиков, производителей, перевозчиков, логистических и сервисных центров, страховых, банковских и информационных служб, таможенных и налоговых органов, а также потребителей существенно меняет механизм разработки логистической политики, важной особенностью которой становится обязательное соблюдение режима заинтересованного взаимодействия субъектов этой системы.

Одним из важных потребительских параметров сложных видов техники (машин), являются затраты на поддержку их жизненного цикла, которые складываются из затрат на разработку и производство машин, а также затрат на ввод машин в действие, эксплуатацию, поддержание их в работоспособном состоянии и утилизацию по истечению срока службы [128, 129, 138]. Для машин, имеющих длительный срок использования (10-20 лет), затраты, связанные с их поддержанием в работоспособном состоянии в постпроизводственный период, могут быть равны или даже превышать затраты на их приобретение. Комплекс управленческих процессов, направленных на сокращение затрат в этот период, называется интегрированной логистической поддержкой (ИЛП). К таким процессам относятся:

- логистический анализ (ЛА) машин, проводимый на всех стадиях жизненного цикла;
- планирование процессов технического обслуживания и ремонта (ТОиР) машин, проводимое на стадии проектирования и уточняемое в ходе производства и эксплуатации;
- планирование процессов поддержки материально-технического обеспечения (МТО) эксплуатации, обслуживания и ремонта машин, проводимое на стадии проектирования и уточняемое в ходе производства и эксплуатации;
- обеспечение персонала электронной эксплуатационной и ремонтной документацией, проводимое на стадии проектирования и реализуемое в ходе производства конкретных экземпляров (партий) машин.

Логистический анализ, являющийся важнейшим элементом ИЛП, представляет собой формализованную технологию всестороннего

исследования как самих машин, так и процессов их эксплуатации и поддержки.

При проведении логистического анализа решаются следующие задачи:

- формирование требований к системе ИЛП и связанных с ней требований к конструкции машин на основе сравнения с существующими аналогами;
- корректировка проектных решений, направленная на обеспечение эффективной эксплуатации;
- разработка проекта системы ИЛП, обеспечивающей оптимальное соотношение затрат, сроков реализации и характеристик «поддерживаемости»;
- определение потребности в ресурсах для ИЛП, разработка планов постпроизводственной поддержки;
- оценка и проверка показателей эффективности системы ИЛП.

Из всех результатов логистического анализа, получаемых на разных стадиях жизненного цикла машин, особый интерес представляют те, которые связаны с процессами ТОиР, т.е. получены на стадии эксплуатации. К ним относятся информация о конструкции машин, об условиях их эксплуатации и их техническом состоянии во время эксплуатации.

В этой связи является актуальным формирование и ведение на предприятиях, эксплуатирующих машины, электронных документов, фиксирующих данные об отказах машин и его компонентов, о выполненных операциях ремонта и замены компонентов, о трудоемкости и времени на выполнение операций ТОиР, о численности и квалификации персонала, выполнявшего ТОиР и др.

Планирование процессов ТОиР предполагает разработку концепции ТОиР, анализ и конкретизацию требований к машинам в части их обслуживания и ремонта, разработку и оперативную корректировку плана ТОиР.

Система ТОиР представляет собой совокупность взаимосвязанных технических средств, специальной технической документации и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления качества машин, относящихся к компетенции этой системы.

Требования к машинам в отношении ТОиР определяются на основе данных логистического анализа и уточняются по результатам реальной эксплуатации в различных условиях, после чего разрабатываются и реализуются следующие мероприятия:

- создание единой системы управления ТОиР, предусматривающей способы улучшения показателей надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости), минимизирующие эксплуатационные затраты;
- организация распределенной системы сбора и обработки данных о вышеуказанных показателях, а также данных о номенклатуре и количестве используемых запасных частей для машин и их компонентов; эти данные извлекаются из специальных документов – формуляров изделия, в которых фиксируются результаты проведения операций ТОиР, факты замены

компонентов, календарные сроки выполнения операций (начало, конец), сведения о работниках, выполнявших операцию и т.д.

- анализ накопленных эксплуатационных и логистических данных;
- корректировка планов ТОиР;
- подготовка персонала для выполнения указанных выше мероприятий.

План ТОиР разрабатывается в альтернативных вариантах с учетом условий проведения ТОиР, квалификации обслуживающего и ремонтного персонала, наличия необходимых запчастей и расходных материалов и т.д. Также планируются календарные даты, трудоемкость и стоимость ТОиР. Заказчик выбирает подходящий вариант. При планировании ТОиР используются такие показатели, как: продолжительность, трудоемкость и стоимость ТОиР, коэффициенты готовности и технического использования.

Планирование процессов поддержки МТО эксплуатации, обслуживания и ремонта машин предполагает планирование, управление и информационную поддержку в условиях интегрированной информационной среды следующих процедур: кодификация предметов МТО; начальное МТО; текущее МТО; планирование поставок; управление поставками; управление заказами; управление счетами.

Обеспечение персонала электронной эксплуатационной и ремонтной документацией предполагает ее интерактивность, т.е. возможность для обслуживающего и ремонтного персонала получать необходимые сведения о процессах и процедурах в форме прямого диалога с компьютером.

Таким образом, ИЛП, являясь связующим звеном между процессами проектирования, производства, ТОиР, закладывает на этапе проектирования параметры, во многом влияющие на технологичность и ремонтпригодность, что оказывает существенное влияние на стоимость жизненного цикла и конкурентоспособность машин. Предпочтительным вариантом создания системы послепродажного обслуживания является интегрированный подход, который позволяет на этапе проектирования решать вопросы, связанные с послепродажным обслуживанием и, следовательно, влияющие на техническое состояние эксплуатируемой техники [139, 140].

4.3. Интегрированные технологии обработки деталей машин

4.3.1. Интегрированные технологии резки и финишной обработки

Анодно-механическая резка [132, 133]

Технология анодно-механической резки (АМР) основана на комбинированном воздействии электрохимических (ЭХ), электроэрозионных (ЭЭ), тепловых, гидродинамических и механических факторов нарезаемую заготовку и электрод-инструмент (ЭИ), который выполняется в виде диска или бесконечной ленты.

На рис. 4.1 показана схема дисковой АМР [141].

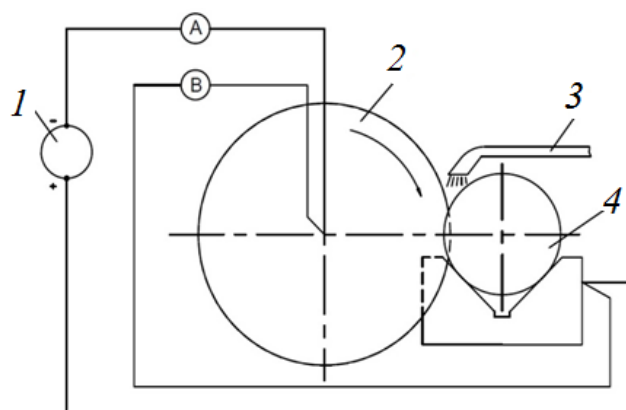


Рис. 4.1. Дисковая анодно-механическая резка
 1 – источник постоянного тока, 2 – дисковый электрод-инструмент, 3 – трубка подвода рабочей жидкости, 4 – заготовка

Зажимы источника 1 постоянного электрического тока низкого напряжения соединены с разрезаемой металлической заготовкой 2 и дисковым электродом-инструментом (ЭИ) 3. Заготовка является анодом, а ЭИ – катодом. В межэлектродное пространство в зону реза по трубке 4 подводится рабочая электропроводящая жидкость (электролит), которая при резке замыкает электрическую цепь. Под действием электрического тока металл в зоне реза разрушается, а образующийся шлам удаляется из полости раздела вращающимся ЭИ и струей рабочей жидкости.

На рис. 4.2 показана схема ленточной АМР [133], аналогичная по принципу действия дисковой АМР.

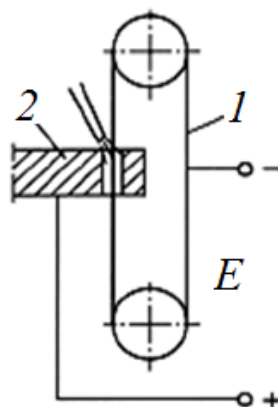


Рис. 4.2. Дисковая анодно-механическая резка
 1 – ленточный электрод-инструмент; 2 – заготовка;
 E – источник постоянного тока

АМР представляет собой сочетание анодного растворения и электроэрозионного воздействия на обрабатываемую заготовку при движущемся относительно обрабатываемой поверхности ЭИ. При этом электролит создает на аноде пассивирующую пленку (обычно водный раствор жидкого стекла).

АМР применяется для резки заготовок из высоколегированных сталей и труднообрабатываемых сплавов толщиной до 1000 мм, для шлифования твердосплавных деталей типа втулок, при круглом наружном шлифовании, суперфинишной обработке, хонинговании, полировании и т.д.

Электроконтактно-абразивная резка [132]

Технология электроконтактно-абразивной резки (ЭКАР) является разновидностью технологии электроконтактной резки и осуществляется ЭИ с абразивно-изоляционным покрытием. Схема ЭКАР показана на рис. 4.3 [132]. В качестве ЭИ используются диски, трубы, ленты, в качестве рабочей жидкости – вода.

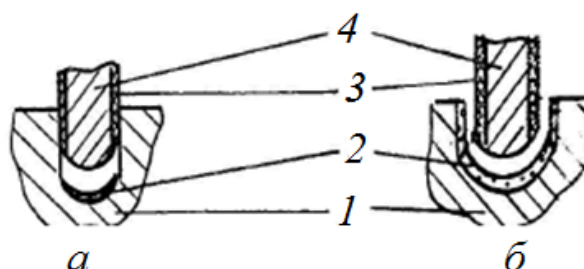


Рис. 4.3. Схема электроконтактно-абразивной резки при рабочем напряжении 15-21 В (а) и более 21 В (б)

1 – заготовка; 2 – измененный слой; 3 – абразивно-изоляционное покрытие; 4 – электрод-инструмент

ЭКАР по сравнению с абразивной резкой имеет ряд преимуществ, в частности, обеспечивает более высокую прочность ЭИ и возможность резки материалов, которые не могут обрабатываться абразивной резкой (например, монокристаллов молибдена).

Технология ЭКАР может реализовываться в двух режимах – чистовом и черновом. Чистовой резке подвергаются заготовки из труднообрабатываемых металлов и сплавов, при этом параметр шероховатости получаемой поверхности доходит до $Ra = 0,63$ мкм. При черновой резке значительно увеличивается производительность процесса, но параметр шероховатости не лучше, чем $Ra = 160$ мкм.

Электроэрозионно-химическая резка [132]

Технология электроэрозионно-химической резки (ЭЭХР) основана на совмещении электроэрозионной (ЭЭ) и электрохимической (ЭХ) обработки, в результате чего происходит разрушение материала заготовки, диспергированные частицы которой выносятся из зоны обработки движущимся ЭИ и потоком рабочей жидкости.

ЭЭХР, схематично показанная на рис. 4.4 [132], осуществляется в два этапа. На первой этапе происходит непосредственно резка. При этом основную роль в удалении металла с заготовки играют эффекты ЭЭ

обработки, а также механической обработки (последние проявляются в удалении расплавленного металла и шлама из зоны резания вращающимся дисковым ЭИ). Резка характеризуется высокими значениями рабочего электрического тока (плотность не менее 3 А/мм^2) и напряжения (не менее 10 В), продольной подачей ЭИ (не менее $0,1 \text{ м/мин}$). На втором этапе происходит снятие заусенцев, скругление острых кромок, а также частичное или полное удаление измененного слоя. Основную роль в этих процессах играют эффекты ЭХ обработки.

Основными факторами, влияющими на процесс резки, являются продольная подача ЭИ или заготовки, рабочее напряжение, частота вращения детали (если деталь вращается), состав и способ подачи рабочей жидкости (10% водный раствор NaCl). Наиболее эффективно подавать рабочую жидкость в зону резки снизу и сверху или вокруг всей заготовки с расходом не менее $0,5 \text{ л/мин}$ на 1 мм^2 площади реза.

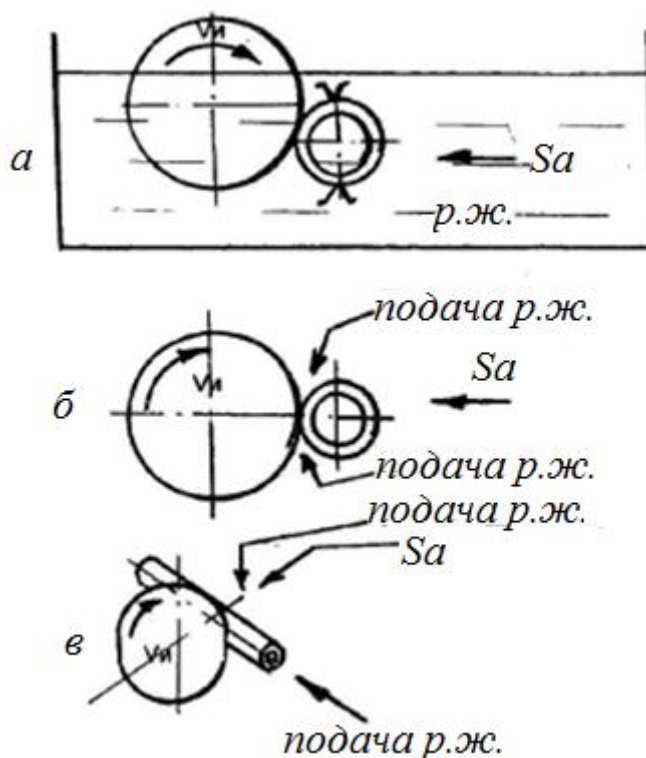


Рис. 4.4. Схема электроэрозионно-химической резки при подаче рабочей жидкости окутанием (а), струей снизу и сверху (б), сверху и через полую заготовку (в)

ЭЭХР обеспечивает повышение производительности труда (особенно при резке заготовок из труднообрабатываемых материалов), исключает необходимость зачистки торца после резки.

Электрохимическая абразивная резка [132]

Технология электрохимической абразивной резки (ЭХАР) реализуется по схеме, показанной на рис. 4.5 [132]. Она совмещает процессы ЭЭ, ЭХ и

механической обработки. Эффекты обработки проявляются в результате воздействия электрического тока, рабочей жидкости и абразивных зерен, выступающих из металлической токопроводящей связки.

Для реализации ЭХАР используется довольно жесткое шлифовальное оборудование. Резка осуществляется крупнозернистыми кругами. Рабочая жидкость интенсивно подается в зону резания, т.е. в создаваемый абразивными зернами межэлектродный зазор между обрабатываемой поверхностью и связкой круга.

Основные характеристики процесса ЭХАР: производительность не более $10 \text{ см}^2/\text{мм}$; удельный износ абразива круга $3,5 \text{ мг/г}$; эффективная мощность $1,5 \text{ кВт}$; параметр шероховатости $Ra \text{ } 0,63\text{-}1,25 \text{ мкм}$; боковой межэлектродный зазор $0,08\text{-}0,12 \text{ мм}$; напряжение $9\text{-}12 \text{ В}$; скорость продольной подачи $0,085\text{-}0,1 \text{ м/мин}$.

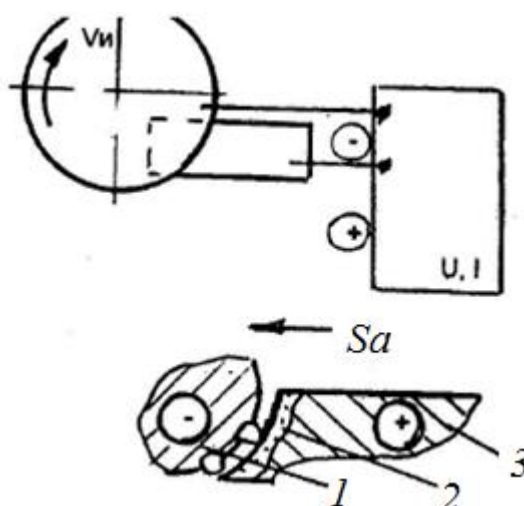


Рис. 4.5. Схема электрохимической абразивной резки

1 – отрезной абразивный круг на металлической связке; 2 – измененный поверхностный слой; 3 – заготовка

Гидроабразивная резка [132]

Технология гидроабразивной резки (ГАР) является альтернативой механической, лазерной и ультразвуковой и другим видам резки, а в некоторых случаях – единственно возможной. В ней используются эффекты гидроэрозионного (струеударного и кавитационного) и механического воздействия, а также эффект Ребиндера. Интенсивная струя жидкости по техническим возможностям близка к идеальному точечному инструменту, что позволяет обрабатывать с ее помощью сложные профили с довольно малыми радиусами скругления. Скорость рабочей жидкости на выходе из сопла доходит до 1200 м/с (давление воды в технологической системе достигает 500 Мпа) при сечении сопла – $0,1\text{-}0,5 \text{ мм}$, ширина реза составляет $0,1\text{-}3,0 \text{ мм}$.

Сущность ГАР состоит в отрыве и уносе из зоны резания частиц основного (разрезаемого) материала скоростным потоком ударяющихся и скользящих по поверхности реза абразивных частиц, что дополняет струеударные и кавитационные эффекты гидроэрозии.

Вода, нагнетаемая насосом до сверхвысокого давления, подается в режущую головку. Струя воды, вырываясь через узкое сопло с околосвуковой или сверхзвуковой скоростью, поступает в смесительную камеру, где смешивается с частицами абразива – гранатовым песком, зернами электрокорунда, карбида кремния или другого высокотвердого материала. Полученная пульпа выходит из смесительной камеры и разрезает материал. На рис. 4.6 [132] показана схема ГАР, а на рис. 4.7 [132] – схема смешивания частиц абразива.

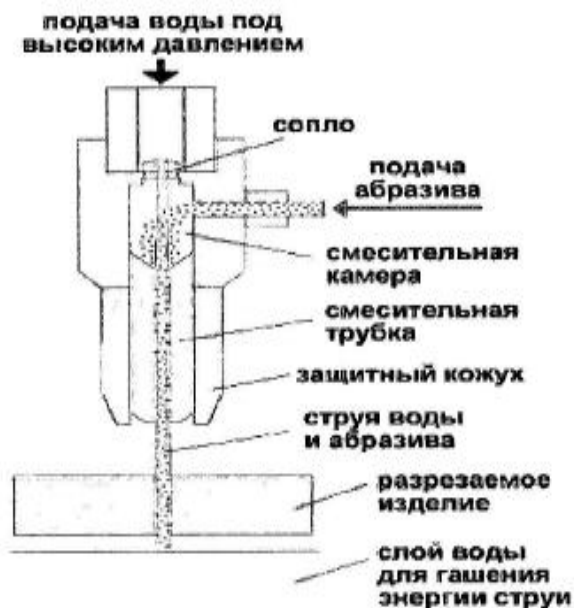


Рис. 4.6. Схема гидроабразивной резки

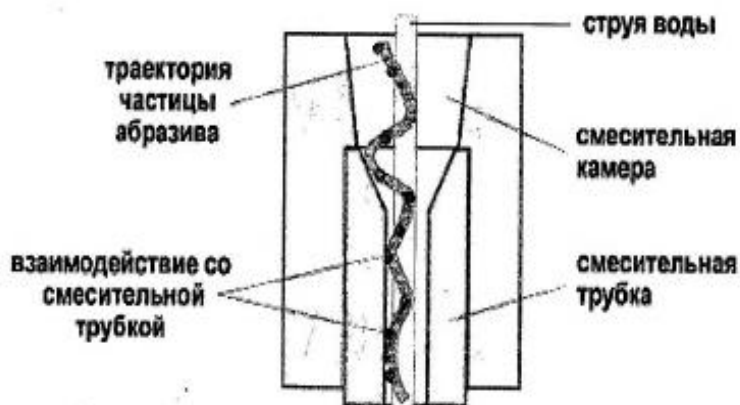


Рис. 4.7. Схема смешивания частиц абразива

При обычной гидрорезке (без абразива) схема процесса проще – вода вырывается через сопло и направляется на разрезаемое изделие.

В табл. 4.1 [132] представлены для сравнения основные области применения гидрорезки и ГАР.

Таблица 4.1.

Области применения гидрорезки и гидроабразивной резки

Гидрорезка	Гидроабразивная резка
Кожа, текстиль войлок (легкая промышленность)	Листы из металлов и сплавов
Пластики, резиновые изделия (автомобильная промышленность)	Различные металлические изделия (отливки, штамповки и др.)
Теплоизоляционные, уплотнительные и шумопоглощающие материалы	Композиционные материалы, бетоны, железобетонные, гипсовые блоки и др.
Продукты питания	Стекло, в т.ч. бронированное, керамика, материалы с покрытием

В процессе ГАР разрушительная способность струи создается в основном за счет абразива, в то время как вода выполняет преимущественно транспортную функцию. Для обеспечения эффективного воздействия и стабильного истечения режущей струи размер абразивных зерен подбирается равным 100- 250 мкм, что составляет 10-30% диаметра струи.

Сопла обычно изготавливают из сапфира, рубина или алмаза, срок их службы доходит до 2000 ч. Смесительные трубки изготавливают из сверхпрочных сплавов, срок их службы доходит до 200 ч.

Основные технологические параметры процесса ГАР: скорость резки; вид, свойства и толщина разрезаемого изделия; внутренние диаметры сопла и смесительной трубки; тип, размер, скорость потока и концентрация в режущей смеси абразивных частиц; давление.

Качество реза существенно зависит от скорости резки (скорости перемещения режущей головки вдоль поверхности обрабатываемого изделия). При чрезмерно высокой скорости происходит отклонение (занос) водно-абразивной струи от прямолинейности, что приводит к ухудшению качества реза.

С уменьшением внутреннего диаметра смесительной трубки повышаются производительность и точность резки, уменьшается ширина реза. Вместе с тем снижается срок службы трубки.

С помощью ГАР можно разрезать практически любые материалы, толщина разрезаемых материалов может достигать 500 мм и более. При этом отсутствуют практически механические и температурные деформации, что положительно отличает ГАР от термической резки (плазменной, лазерной, кислородной и др.). ГАР особенно эффективно применять в отношении алюминия, меди, латуни в сравнении с термической резкой из-за высокой

теплопроводности этих материалов и низкой способности поглощать лазерное излучение.

В машиностроении ГАР применяется при производстве деталей из меди, титановых, алюминиевых, хромо-никель-кобальтовых сплавов, высокопрочных и коррозионностойких сталей, композиционных материалов, пластиков, а также для резки стекла.

Анодно-абразивная обработка [132]

Технологии анодно-абразивной обработки (ААО) подразделяются на два вида: 1) с использованием монолитного абразивного ЭИ и 2) с использованием свободного абразива (рабочей жидкости, содержащей абразивные частицы). Схема ААО с использованием монолитного абразивного ЭИ показана на рис. 4.7 [132]. Сила G , приложенная к ЭИ извне, прижимает его к электроду-заготовке (ЭЗ), так чтобы между обоими телами не было обширного контакта и их электропроводные поверхности оказались разделенными межэлектродным зазором b_{\min} . При этом через зазор протекает рабочий ток I , а электрическая мощность, расходуемая на обработку, равна $P = UI$, где U – напряжение источника питания.

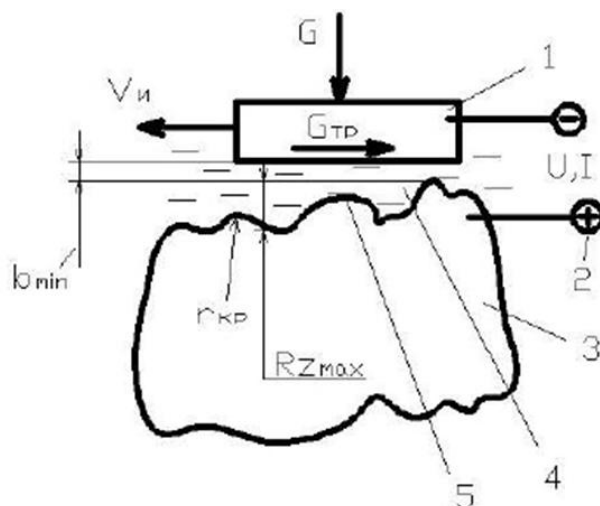


Рис. 4.7. Схема анодно-абразивной обработки с использованием монолитного абразивного электроинструмента

1 – электрод-инструмента; 2 – источник тока; 3 – заготовка; 4 – рабочая жидкость; 5 – выступы (микронеровности)

Внешняя сила G вызывает силу трения $G_{\text{тр}}$, которая приложена к поверхности ЭИ, движущейся со скоростью $V_{\text{и}}$.

В процессе ААО происходит преимущественное удаление выступов 5 на заготовке, во впадинах материал снимается менее интенсивно, что обуславливает низкую шероховатость обработанной поверхности.

Удаленное с заготовки вещество может находиться одновременно в трех конечных состояниях: оно быть химически связанным с компонентами рабочей жидкости (электролитом) (как при ЭХ обработке), в

виде застывших капель металла (как при ЭЭ обработке) и в виде механически сколотых частиц – стружки.

Чтобы усилить обработку на выступах, следует выбирать условия ААО, обеспечивающие такую геометрию межэлектродного зазора, для которой соотношения Rz_{max}/b_{min} и $b_{min}/r_{кр}$ были бы достаточно высокими. Подбор режимов обработки совместно с использованием пассивирующей (окислительной) рабочей жидкости обеспечивает высокое отношение плотности тока на выступах к плотности тока на впадинах $j_{выст}/j_{вп}$.

При протекании рабочего тока среда, заполняющая межэлектродный зазор, расширяется в результате газовыделения и теплового расширения. Для сближения электродов, т.е. для уравнивания гидростатического давления в зазоре, необходима внешняя сила G . Такое уравнивание достигается при определенном зазоре, которому соответствует некоторое среднее давление ЭИ. При большом давлении электропроводные участки касаются друг друга, нарушается пассивирующая пленка на заготовке, происходит короткое замыкание и идет ЭЭ процесс.

В случае ААО с использованием свободного абразива электроды могут устанавливаться на сравнительно большом расстоянии друг от друга. Вследствие относительного движения рабочей жидкости и заготовки абразивные частицы удаляют пассивирующую пленку преимущественно с выступов на поверхности заготовки, благодаря чему металл этих выступов быстро растворяется и межэлектродный зазор увеличивается. Однако увеличение расстояния между электродами приводит к снижению плотности тока и падению производительности обработки, поэтому данный вид ААО целесообразно применять только для улучшения качества поверхности заготовок.

В качестве абразива используются различные керамические материалы с размерами частиц 5-20 мм. Электролитом для обработки сложных алюминиевых корпусов служит 2-2,5% водный раствор азотной кислоты. На рис. 4.8 [132] представлены две технологические схемы использования ААО со свободным абразивом.

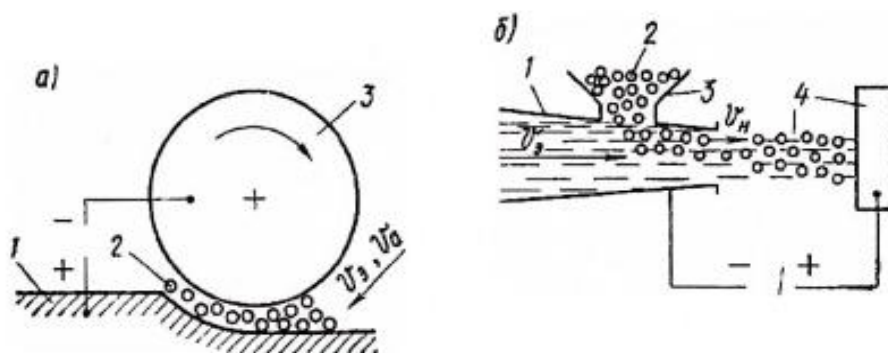


Рис. 4.8. Схемы анодно-абразивной обработки с использованием свободного абразива

а – подача поливом; б – эжекционная подача в протоке рабочей жидкости;
1 – обрабатываемое изделие; 2 – абразив; 3 – эжектор; 4 – анод

Эффективность ААО зависит от скорости вращения детали, свойств и температур электролита и других факторов. Скорость вращения детали обычно устанавливают в пределах 2-15 м/мин, направление вращения периодически меняют. Продолжительность цикла вращения в основном зависит от формы и размеров детали.

Концентрация электролита не оказывает существенного влияния на качество обработанной поверхности, но ее повышение увеличивает электропроводность электролита, что позволяет снизить напряжение, подводимое к электродам.

Анодно-механическое хонингование [132]

Анодно-механическим хонингованием (суперфинишированием) (АМХ) называют обработку продукты анодного растворения удаляются механическим воздействием абразивной суспензии (рабочей жидкости) и неметаллического притира при наличии дополнительного катода или абразивными брусками, установленными в хонинговальную головку, являющуюся катодом. При АМХ основной припуск удаляется анодным растворением, в то время как роль микрорезания сводится к механической депассивации поверхности заготовки.

Основные характеристики процесса АМХ: шероховатость поверхности, обработанной абразивными брусками, $R_a = 0,04-0,16$ мкм; отклонение от цилиндричности при обработке отверстий – 3-5 мкм на длине 100 мм; отклонение от круглости – не выше 0,8-2,0 мкм.

Схема АМХ с использованием брусков из изоляционных материалов в качестве инструмента депассивации показана на рис. 4.9 [132].

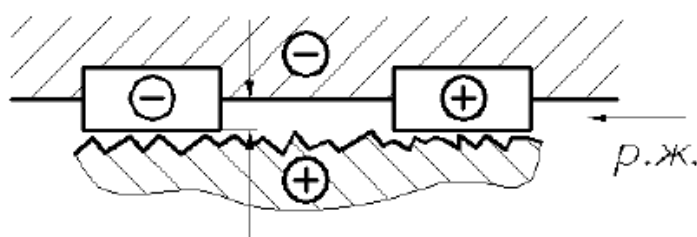


Рис. 4.9. Схема анодно-механического хонингования

Процесс АМХ основан на использовании эффектов ЭХ обработки и механического удаления образовавшихся окислов (за счет диэлектрических вставок). По производительности АМХ в 15 раз превышает обычное хонингование (суперфиниширование).

Антифрикционная электромеханическая обработка [142]

Технология финишной антифрикционной электромеханической обработки (АФЭМО) применяется для повышения антифрикционных свойств поверхностей трения деталей, для чего эти поверхности покрываются тонким (1-2 мкм) слоем меди или ее сплавов за счет использования эффекта переноса металла при трении.

Сущность ФАБО состоит в нанесении на поверхность стальных и чугунных деталей тонкого антифрикционного слоя из различных твердосмазочных материалов с последующей электромеханической обработкой. Такая обработка позволяет изменить структуру поверхностного слоя, повысить его износостойкость, улучшить эксплуатационные свойства, особенно антифрикционные.

В качестве твердосмазочных материалов используют слоистые вещества (графит, дихалькогениды тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама, ниобия) и др.), антифрикционные покрытия, образованные на рабочих поверхностях в результате химической реакции (сульфиды, фосфаты, высокотемпературные термохимические покрытия на основе молибдена и ниобия), мягкие металлы и их окислы (медь и ее сплавы, свинец, баббиты и др.), полимерные материалы.

Твердосмазочные материалы наносят на обрабатываемые поверхности разными способами: натиранием поверхности, осаждением из суспензии в смеси с поверхностно-активным веществом (ПАВ), газопламенными или газодинамическим напылением и др. Для повышения качества нанесения твердосмазочного материала обрабатываемую поверхность заранее доводят до требуемой шероховатости.

Схема АФЭМО показана на рис. 4.10 [142].

На поверхность с исходной шероховатостью (рис. 4.10, а), достигнутой на предыдущих этапах механической обработки, наносят твердосмазочный материал натиранием. В результате получается поверхность, состоящая из основного материала 1 и антифрикционного слоя 2, частицы которого располагаются во впадинах исходного профиля (рис. 4.10, б). При последующей электромеханической обработке в месте контакта обрабатывающего инструмента с деталью происходит деформация поверхности и ее местный нагрев выше температуры фазового превращения. Это приводит к сглаживанию микронеровностей с одновременным заполнением полостей, устьев микротрещин и углублений твердосмазочным антифрикционным материалом (рис. 4.10, г) и образованием «белого» слоя высокой твердости 3. На рис. 4.10, в показана схема АФЭМО с нанесением антифрикционного слоя 4 путем осаждения из суспензии. Последующая электромеханическая обработка формирует поверхность с требуемыми антифрикционными характеристиками, впадины которой заполнены твердосмазочным материалом 4 (рис. 4.10, д), продукты деструкции которого остаются на обрабатываемой поверхности и способствуют повышению антифрикционных свойств. Кроме того, за счет термодформационного воздействия образуется «белый» слой 3 повышенной твердости.

В процессе работы трибосистемы находящийся во впадинах твердосмазочный материал за счет нагрева и последующего расширения заполняет пространство между трущимися деталями, обеспечивая их смазку.

АФЭМО позволяет получать поверхность, состоящую из упрочненного слоя с твердостью до 9 ГПа (белый слой 3 (рис. 4.10, г и 4.10, д), что

повышает антифрикционные свойства поверхностного слоя деталей, а также коррозионную стойкость.

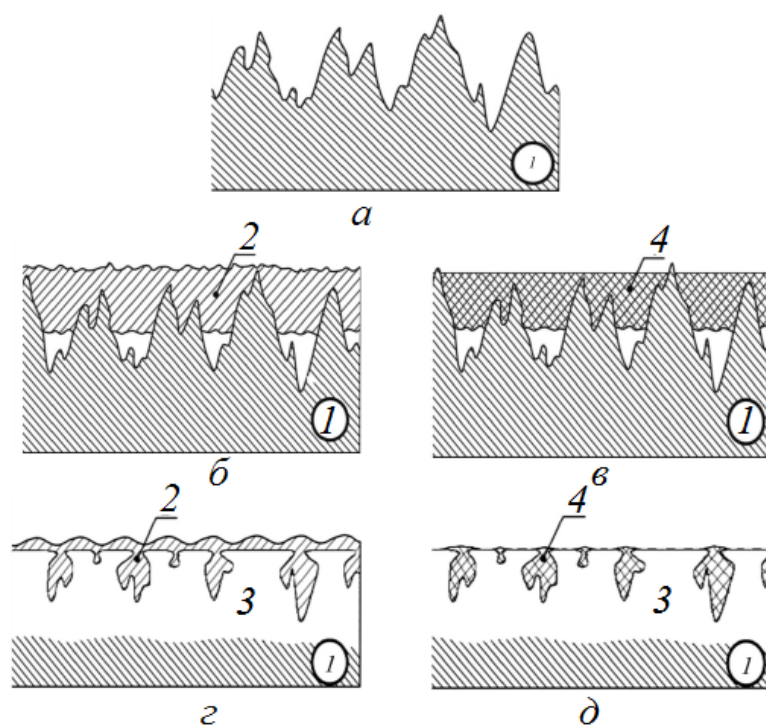


Рис. 4.10. Схемы нанесения антифрикционного материала с последующей электромеханической обработкой
 а – исходная поверхность; б – поверхность после натирания антифрикционным металлом; в – поверхность с нанесенной суспензией антифрикционной смеси на основе ПАВ; г и д – поверхности (б) и (в) после электромеханической обработкой

4.3.2. Интегрированные упрочняющие технологии

Вибрационное механохимическое нанесение покрытий [143]

Совмещение и оксидирования деталей из алюминия и его сплавов с вибрационной обработкой (ВО) позволяет улучшить качество поверхностного слоя, повысить коррозионную стойкость деталей. Это объясняется особенностями процессов ВО, заключающейся в пластическом деформировании поверхностного слоя металла, которое приводит к накоплению дислокаций в поверхностном слое, увеличивая адсорбционную активность и реакционную способность поверхности. Кроме того, скользящий удар вызывает разрушение оксидной пленки, разрыхление поверхностных слоев, образование ювенильных участков, что также способствует увеличению адсорбционной активности и реакционной способности поверхности. Таким образом, благодаря ВО достигается надлежащая структура поверхностного слоя и чистота поверхности, что способствует получению качественных покрытий и прочному сцеплению их с основой.

Важная особенность ВО состоит в создании пор в оксидной пленке, формируемой химическим способом, которые обеспечивают приток оксидирующего раствора к поверхности металла.

При совмещении ВО и оксидирования можно использовать ряд растворов, позволяющих получать покрытия с разными свойствами, что расширяет область их применения. Так, в щелочно-хроматных растворах формируются пленки с небольшой механической прочностью, что ограничивает их применение в основном в качестве грунта под лакокрасочные покрытия. Пленки, полученные в фосфатно-хроматных растворах, обладают более высокой механической прочностью и защитной способностью, что позволяет использовать их в качестве антикоррозионных покрытий. Особенностью пленок, сформированных в хроматно-фторидных растворах, является низкое электросопротивление.

Разновидностью оксидирования является химическое пассивирование, широко применяемое для защиты от коррозии деталей из алюминиевых сплавов. Получаемые при пассивировании пленки имеют небольшую толщину, но обладают сравнительно хорошими защитными свойствами. Нередко пассивирование применяют вместо анодного оксидирования в хромовокислом электролите кремнистых алюминиевых сплавов. Поэтому совмещение ВО и пассивирования представляет значительный практический интерес.

Технологические возможности комбинирования ВО и оксидирования не ограничиваются только обработкой деталей из алюминия и его сплавов. Таким комбинированным способом также можно обрабатывать детали из меди и титана.

Титан и его сплавы имеют высокую удельную прочность, однако область их применения ограничена из-за некоторых присущих им недостатков, в частности, из-за наволакивания и задиранья металла, происходящего при трении титановых деталей. Для улучшения фрикционных свойств деталей из титана достаточно нанести оксидную пленку толщиной до 1 мкм. Оксидная пленка на титане, будучи пористой, способна удерживать жиры и масла.

Существенным препятствием прочному сцеплению металлических покрытий на титане и его сплавы является естественная оксидная пленка, которая мгновенно восстанавливается после ее снятия. Совмещение процессов очистки поверхности от окислов, осуществляемой благодаря ВО, с одновременным нанесением покрытия могло бы расширить область применения титана за счет создания на его поверхности новых свойств, обеспечиваемых покрытием.

Подобный эффект может быть достигнут при нанесении металлических покрытий на алюминий и его сплавы. Для успешного нанесения металлических покрытий требуется высокое качество подготовки поверхности алюминия, которое можно обеспечить за счет ВО. Так, свободная от окислов и обладающая высокой адсорбционной активностью обрабатываемая поверхность алюминия, находясь в растворе цинката натрия,

покрывается тонкой, равномерной и плотной пленкой цинка, за счет близости электрохимических потенциалов алюминия и цинка в щелочной среде.

Обычно после химической подготовки поверхности (обезжиривания и травления), оксидная пленка, образующаяся на алюминии, является неоднородной, при ее разрушении в цинкатоном растворе на активных участках растут дендритообразные кристаллы цинка. Этот недостаток устраняется снятием пленки и ее вторичным получением. Улучшение качества поверхностного слоя и чистоты обработки за счет ВО позволяет использовать одноразовое цинкование.

Таким образом, применение ВО в процессе нанесения покрытий способствует повышению их качества благодаря улучшенной подготовке поверхности, обеспечиваемой ВО.

Легирование металлических покрытий [131]

Недостатком металлических покрытий, наносимых различными методами (наплавкой, гальваническим осаждением, газотермическим напылением и др.) является наличие в них остаточных растягивающих напряжений, которые отрицательно сказываются на усталостной прочности, износостойкости и других свойствах обрабатываемых деталей. Кроме того, эти покрытия имеют несплошности (поры) и другие дефекты структуры, которые заметно снижают их прочность.

Для устранения указанных недостатков и обеспечения высоких эксплуатационных характеристик деталей с нанесёнными на их поверхности покрытиями перспективно подвергать их химико-термической обработке. Насыщение металлических покрытий элементами из внешней среды (в основном азотом и углеродом) существенно изменяет химический и фазовый состав поверхностных слоёв, повышая твёрдость, создавая благоприятные внутренние напряжения, увеличивая прочность сцепления покрытий с основой и устраняя дефекты структуры.

Особый практический интерес представляет применение интегрированных упрочняющих технологий, которые сочетают нанесение на поверхности деталей из углеродистых сталей легированных покрытий с последующей цементацией или нитроцементацией в активных насыщающих средах. Обычно покрытия наносятся на крупногабаритные детали наплавкой или газотермическим напылением, а надетали небольших размеров – гальваническим осаждением бинарных сплавов на основе железа, содержащих хром, молибден, вольфрам или титан.

Для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, на поверхности формируют глубокие слои, содержащие большое количество карбидов цементитного типа. Это достигается наплавкой на упрочняемые поверхности покрытий с содержанием 1-1,5% Cr и их последующим науглероживанием до заэвтектоидных концентраций, в результате чего на поверхности образуется большое количество цементита в виде изоморфных включений.

После закалки и низкотемпературного отпуска карбидосодержащий слой оказывает повышенное сопротивление воздействию абразива из-за высокой твердости карбидных частиц и, кроме того, имеет вполне удовлетворительную ударную вязкость, поскольку включения карбидов имеют равноосную форму и изолированы друг от друга участками сравнительно вязкой матрицы.

Абразивная износостойкость деталей после такой обработки определяется содержанием карбидов в диффузионном слое. Так, при их содержании более 70% износостойкость в кварцевом абразиве увеличивается на порядок.

Поверхностная карбидизация хромистых сталей проводится при температурах 900-920°C в пастообразном карбюризаторе, который состоит из газовой мелкодисперсной сажи с активизирующими добавками углекислого натрия или бария. В качестве пастообразователя можно использовать любой органический клей (КМЦ, ПВА и др.). Цементацию проводят в контейнерах или в печах с герметичными ретортами с подачей в рабочее пространство углеродсодержащей жидкости или газа. Скорость насыщения стали составляет 0,15-0,20 мм/ч, глубина карбидосодержащих слоёв достигает до 1 мм и более.

Аналогичный метод применяется для повышения износостойкости деталей, работающих в сопряжениях с недостаточной смазкой или совсем без смазки. Он заключается в создании на трущихся поверхностях графитосодержащих слоёв. При этом для обеспечения графитизации на поверхности деталей наносят покрытия, содержащие повышенное количество кремния, поскольку он способствует образованию графита при науглероживании.

Цементация кремнистых покрытий проводится в упомянутом выше карбюризаторе при температуре 950-980°C и длительности обработки 10-12 ч. В результате такой обработки на поверхности кремнистого покрытия формируется графитосодержащий слой глубиной до 1 мм.

Для повышения содержания графита в диффузионном слое (до 20%) детали подвергают дополнительному графитизирующему отжигу при температуре 900-920°C и длительности обработки 8-10 ч.

Графит, содержащийся в поверхностных слоях, изделий играет роль твердой смазки в сопряжениях, снижая коэффициент трения (в 2-3 раза по сравнению со сталью) и не допуская схватывания контактирующих поверхностей.

Рассмотренный выше процесс графитизации наплавленных покрытий является довольно длительным и дорогим, поскольку требует использования высоких температур. В связи с этим целесообразно применять технологию ускоренной графитизации поверхностных слоёв стальных изделий посредством двухступенчатой (низко- и высокотемпературной) нитроцементации, для осуществления которой используется специальная паста на основе сажи, содержащая 40% железосинеродистого калия (азотосодержащий компонент) и добавки углекислого натрия и калия.

Первая ступень нитроцементации проводится при сравнительно низких температурах (600-650°C), при которых поверхность металла насыщается большим количеством азота. Для проведения второй ступени нитроцементации (собственно графитизации) температуру следует поднимать до 850°C. При этом происходит деазотирование поверхности с распадом высокоазотистых фаз и образованием дефектов структуры, которые заполняются углеродом, имеющим при этой температуре активность, гораздо более высокую, чем азот.

В итоге за довольно короткое время (650°C, 3 ч и 850°C, 3 ч) на поверхности изделия образуется графитизированный слой глубиной до 0,2 мм с содержанием графита до 7%. Степень графитизации при двухступенчатой нитроцементации ниже, чем при высокотемпературной цементации с графитизирующим отжигом, однако она достаточна для повышения износостойкости деталей.

Следует отметить, что покрытия, подвергаемые графитизации, не должны содержать хрома, который даже в небольших количествах подавляет графитизацию и способствует образованию карбидов при науглероживании.

Для деталей, работающих в условиях трения со смазкой, целесообразно использовать низкотемпературную химико-термическую обработку, которая позволяет получать на поверхности изделий нитридные и карбонитридные слои, характеризующиеся высокой твёрдостью и низким коэффициентом трения.

Покрытия, наносимые на поверхности деталей при их комбинированном упрочнении должны содержать нитридо- и карбидообразующие элементы (V, Mo, W, Ti, Cr, Al и др.), поскольку чистые нитриды (карбонитриды) железа имеют недостаточно высокую твёрдость и не могут обеспечить требуемый упрочняющий эффект.

Типичной интегрированной технологией упрочнения деталей, работающих в условиях граничного трения, является сочетание гальванического осаждения на их поверхность железохромистого покрытия толщиной 0,3 мм с последующим цианированием в соляной ванне на основе карбамида с добавками соединений натрия (NaCO_2 , NaCl и NaOH). Активность такой ванны при температурах 550-650°C весьма высока. Цианирование железохромистого покрытия в ней при температуре 570°C приводит к образованию тонкого поверхностного карбонитридного слоя. Этот слой имеет высокую твёрдость (15 000 МПа) и не склонен к хрупкому разрушению, твёрдость переходной зоны (подслоем карбонитридов) плавно уменьшается от поверхности к сердцевине, что является преимуществом данной технологии упрочнения, поскольку не вызывает резкого перепада напряжений по сечению слоя.

Глубину цианированного слоя выбирают равной толщине нанесённого покрытия. При толщине гальванического покрытия 0,3 мм длительность обработки в ванне составляет 4,5 ч (скорость роста карбонитридного слоя при температуре 570°C равна 0,07 мм).

Для получения более толстых карбонитридных слоёв на поверхности следует повышать температуру цианирования до 650°C. При такой температуре скорость роста карбонитридной корки возрастает почти в 2 раза, но твёрдость её при этом немного уменьшается, хотя остается вполне достаточной для обеспечения высокой износостойкости.

В результате низкотемпературного цианирования в поверхностном слое гальванического железохромистого покрытия (после охлаждения в воде) возникают сжимающие напряжения, величина которых доходит до 380-650 МПа, что благоприятно сказывается на усталостной прочности упрочняемых деталей.

Износостойкость цианированных слоёв в условиях граничного трения в 8-10 раз больше износостойкости закалённой стали.

При цианировании гальванических покрытий возрастает прочность сцепления их с основой, а при достаточно длительном процессе глубина насыщения превышает толщину покрытия и граница между покрытием и основой исчезает.

Благодаря низкотемпературной обработке можно упрочнять гальванические покрытия не только на основе железа, но и чисто хромовые – азотированием в тлеющем разряде [144]. Полученные таким способом композиционные покрытия содержат на поверхности нитриды хрома и обладают высокой твердостью (до 26 000 МПа), а их износостойкость в 3 раза выше, чем износостойкость гальванического хрома. Кроме того, азотирование повышает коррозионную стойкость хромовых покрытий, поскольку трещины в слое хрома заполняются в процессе обработки нитридами хрома.

Легирование поверхностных слоёв стальных изделий при интегрированном упрочнении можно проводить с помощью лазера. Азотирование после предварительного лазерного легирования поверхности стали повышает твёрдость, созданную лазерным легированием, а также уменьшает перепад внутренних напряжений на границе зоны лазерного воздействия с матрицей. Применение такой схемы обработки наиболее эффективно, если при лазерном легировании вводят нитридообразующие элементы [145], так как при этом можно получить весьма высокую микротвёрдость поверхности на низколегированной стали (до 20 000 МПа), повысить до 3 раз износостойкость по сравнению с азотированной сталью, а также перераспределить внутренние напряжения в поверхностных слоях и тем самым устранить возможность возникновения трещин на границе легированного слоя матрицы.

Известно интегрированное упрочнение стальных деталей нанесением гальванических железных покрытий с последующим диффузионным борированием [146]. Насыщение бором осуществляется в порошковой смеси, содержащей 65% карбида бора и 35% оксида алюминия, при температуре 980°C в течение 2-6 ч. В результате формируются борированные слои глубиной 0,1-0,25 мм с микротвердостью 14000-16000 МПа. Борирование повышает прочность сцепления с основой и износостойкость. Этот способ

рекомендуется применять для восстановления и упрочнения деталей, работающих в абразивных средах.

Статико-импульсная обработка с последующей цементацией [147]

На поверхности многих деталей (зубчатые колеса, подшипники качения, рельсы и рельсовые колеса, прокатные валки, толкатели кулачков, бойки, элементы червячных, гипоидных, винтовых, цепных и глобоидальных передач, направляющие, шлицевые соединения с телами качения, обгонные роликовые муфты и т.д.) действуют циклические контактные нагрузки, являющиеся причиной потери работоспособности деталей.

Для повышения контактной выносливости поверхностей деталей применяется интегрированная упрочняющая технология, включающая поверхностное пластическое деформирование (ППД), осуществляемое путем статико-импульсной обработки (СИО), и последующие цементацию и закалку.

СИО, в отличие от других способов ППД, за счет воздействия на поверхность волной деформации позволяет в широких пределах изменять структуру упрочненного слоя и его свойства на глубине, превышающей глубину цементации. При этом имеется возможность создавать гетерогенно (неравномерно) упрочненную поверхность, эффективную при работе деталей в условиях контактно-усталостных нагрузок.

О перспективности такой интегрированной технологии свидетельствуют результаты ее применения для упрочнения плоских заготовок из сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А. Деформационное упрочнение проводили на установке для статико-импульсной обработки, в качестве инструментов служили стержневые ролики из стали Р18. Газовую цементацию выполняли в камерной печи, в качестве насыщающей среды служил природный газ. Для окончательной механической обработки поверхностей, подвергнутых интегрированному упрочнению, использовали шлифование.

Результаты испытания показывают, что деформационное упрочнение перед цементацией позволяет повысить максимальную степень упрочнения поверхностного слоя до 1,5 раз по сравнению с одним только науглероживанием. При этом не только повышается контактная выносливость, но также сокращается необходимая длительность цементации.

Электроконтактная обработка газотермических покрытий [148]

Для повышения износостойкости малоресурсных деталей на их рабочих поверхностях формируют износостойкие газотермические покрытия, для нанесения которых широко используют газопламенное (ГПН) и электродуговое (ЭДН) напыление.

Покрытия, полученные ГПН и ЭДН, имеют пористую поверхность, благодаря чему они легко прирабатываются, сохраняют смазку, удовлетворяют основным свойствам антифрикционности

(самосмазываемость, самопритираемость). Для улучшения свойств таких покрытий их структуру подвергают модифицированию.

В этой связи является весьма перспективным применение интегрированных упрочняющих технологий, сочетающих нанесение газотермических покрытий деталей из низкоуглеродистых сталей наметодами ГПН или ЭДН и их последующее модифицирование путем электроконтактной обработки (ЭКО).

Модифицирование покрытий с помощью ЭКО имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами модифицирующей обработки. Так, лазерная и электронно-лучевая обработка приводят к неоднородной макроструктуре поверхности, химико-термическая обработка характеризуется большой продолжительностью процесса и не позволяет проводить обработку крупногабаритных изделий.

Высокие эффекты упрочнения ЭДН- и ГПН-покрытий достигаются при использовании способов механотермической обработки, среди которых наибольшее распространение получила схема электроконтактного нагрева при прокатке покрытий роликом.

ЭКО покрытий не только обеспечивает упрочнение деталей, но также позволяет заменить высоколегированные дефицитные материалы для покрытий на менее затратные; снизить требования к механическим свойствам напыляемого материала; заменить финишную механическую обработку на поверхностное пластическое деформирование до требуемых размеров деталей и чистоты их поверхности; заменить традиционную наплавку с необходимостью последующей финишной обработки при обеспечении толщины покрытий более 3 мм с высокой адгезионной прочностью и низким уровнем остаточных напряжений.

Интегрированная технология нанесения газотермического покрытия и его последующей ЭКО схематично показана на рис. 4.11 [140]. Достоинствами ЭКО являются высокая производительность; низкая энергоемкость; отсутствие светового излучения и газовыделения; отсутствие необходимости в защитных средах; минимальные тепловложения.

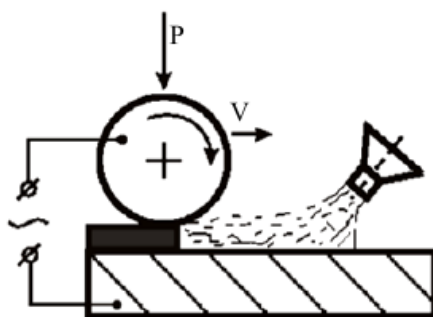


Рис. 4.11. Схема электроконтактной обработки наносимого покрытия

Зона термического влияния при воздействии электрического тока на деталь составляет 0,2-1,0 мм из-за малой длительности нагрева. Отсутствие

жидкой фазы в зоне нанесения покрытия позволяет повысить долговечность электрода, снизить потери материала покрытия, увеличить толщину износостойкого слоя в 3-6 раз при минимальном уровне остаточных напряжений и прочности сцепления более 200 МПа. При этом пористость покрытий не превышает 5%. Повышение качества покрытий за счет ЭКО обеспечивается импульсным характером процесса обработки. ЭКО позволяет проводить финишную обработку ЭДН- и ГПН-покрытий до требуемого размера и чистоты поверхности без припусков или при значительном их уменьшении.

Данную интегрированную упрочняющую технологию наиболее эффективно применять для сталей мартенситного и ферритного классов, особенностью которых является способность к структурно-фазовым превращениям при термомеханическом воздействии.

Электромеханоультразвуковая обработка [149]

Технология электромеханоультразвуковой обработки (ЭМУЗО) представляет собой сочетание термомеханического воздействия электромеханической обработки (ЭМО) и поверхностного пластического деформирования ультразвуковой обработки (УЗО), что позволяет формировать поверхностный слой стальных деталей с высокой прочностью и микротвердостью и малой шероховатостью.

Эффективность ЭМУЗО подтверждена результатами испытаний образцов в виде плоских цилиндрических дисков, изготовленных из стали 38ХС и 40Х, а также стали 45. Эти стали обладают высокой прочностью, но умеренной вязкостью и предназначены для изготовления деталей, к которым предъявляются требования высокой прочности, упругости и износостойкости. Для проведения ЭМУЗО применялась специальная установка, созданная на базе токарного станка. На установке обрабатывалась наружная цилиндрическая поверхность образцов, закрепленных в оправке.

ЭМО проводилась при термомеханическом воздействии на поверхность обрабатываемых образцов с усилиями прижатия рабочего инструмента к поверхности до 1500 Н и прохождением через зону контакта электрического тока большой величины (до 2000 А) и низкого напряжения (до 6 В). Термическая обработка осуществлялась на сверхвысоких скоростях нагрева и охлаждения до 10^5 °С/с. В качестве рабочего инструмента использовались закрепленные неподвижно пластины, а также вращающиеся ролики из твердого сплава Т15К6.

УЗО проводилась с использованием магнитострикционного преобразователя с частотой колебаний 22 кГц, излучатель прижимался к обрабатываемой поверхности с усилием до 1000 Н.

Результаты испытаний показывают, что ЭМО сопровождается высокоскоростной закалкой поверхностного слоя образцов на глубину до 0,2-0,3 мм с образованием ультрадисперсной мартенситной структуры, характеризующейся повышенной твердостью. Последующая УЗО улучшает механические свойства поверхностного слоя, в частности, увеличивает

усталостную прочность, пределы текучести и прочности, износостойкость, твердость, коррозионную стойкость, а также снижает шероховатость.

В процессе ЭМУЗО поверхность образцов подвергается пластическому деформированию, в результате чего образуется модифицированный слой с повышенной концентрацией дислокаций и твердостью, а также невыраженной границей раздела с основным материалом, что позволяет замедлить формирование в поверхностном слое опасных концентраторов напряжений и усталостных трещин, блокируя развитие усталостных процессов в поверхностном слое и тем самым повышая работоспособность деталей.

Химико-термическая обработка и скоростная закалка [63]

Химико-термическая обработка (ХТО) широко применяется в промышленности для повышения твердости, износостойкости, сопротивления усталости и контактной прочности.

Комбинирование традиционной химико-термической обработки с индукционным, электроконтактным и лазерным нагревом повышает эксплуатационные свойства деталей. Благодаря скоростной закалке устраняются окисление и обезуглероживание поверхности деталей, уменьшаются термические деформации, вследствие чего становится возможным упрочнять окончательно обработанные детали без последующего шлифования.

Так, образцы из стали 40Х нагревали пропусканием тока со скоростью 50 К/с до температуры 1020-1270 К и закачивали в воде, после чего закаленные образцы подвергали ионно-лучевому азотированию. Было установлено, что с увеличением температуры нагрева повышается твердость образцов от 21 HRC в исходном состоянии до 55-57 HRC. При температурах азотирования 670-720 К снижается интенсивность изнашивания стали до 2 раз по сравнению с исходным материалом.

ГЛАВА 5 НАНОТЕХНОЛОГИИ

5.1. Нанотехнологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика

Нанотехнологии, начавшие интенсивно развиваться на рубеже XX-XXI веков, ныне активно вторгаются практически во все сферы человеческой деятельности. Они стали причиной происходящих в настоящее время кардинальных изменений в характере производственных процессов, привели к созданию принципиально новых методов и средств переработки и преобразования информации, энергии и вещества.

В последние годы нанотехнологии все более широко распространяются в различных отраслях агропромышленного комплекса (АПК) [150]. Однако разработка и практическое освоение нанотехнологий в АПК связаны с немалыми сложностями, что обусловлено рядом обстоятельств. Во-первых, нанотехнологии находятся в состоянии постоянного развития. С каждым годом возрастает объем знаний в нанонауке, совершенствуются существующие и возникают новые виды нанотехнологий, расширяется круг их всевозможных применений. Во-вторых, нанотехнологии как область научных знаний имеют ярко выраженный междисциплинарный характер. Они базируются на физических, химических и биологических процессах, которые часто оказываются тесно связанными между собой. Все это создает определенные трудности при прогнозировании нанотехнологического развития АПК, главной целью которого является выбор приоритетных направлений, установление характера и условий применения нанотехнологий в агропромышленной сфере с учетом особенностей отраслевой структуры и тенденций экономического роста АПК. Кроме того, указанные обстоятельства создают определенные трудности и при реализации выбранных приоритетов нанотехнологического развития АПК.

Для осуществления процессов агропромышленного производства применяются разнообразные по своему назначению технические средства [151, 152]. Они используются в земледелии и животноводстве, в переработке сельскохозяйственных продуктов, в пищевом и кормовом производстве. Многие детали машин испытывают значительные механические нагрузки. Детали узлов трения подвергаются износу. Особенно значительный абразивный износ имеет место у деталей рабочих органов в результате взаимодействия с почвой, сельскохозяйственным сырьем, пищевыми продуктами или кормами (лемеха плугов, лапы культиваторов, диски борон, масловыжимные шнеки, винты гидравлических прессов, ножи кормоизмельчителей и т. д.).

Кроме того, детали машин подвергаются значительной коррозии. Наиболее сильно она развивается на деталях, находящихся в контакте с почвой, сточными водами (особенно с высоким содержанием навоза), соками трав и зерновых культур. В наиболее опасных условиях, провоцирующих развитие

коррозии, находятся детали машин для внесения удобрений и ядохимикатов. В технике пищевых и кормовых производств корродируют в первую очередь детали, которые контактируют с пищевыми и кормовыми средами, а также обрабатываются моющими и дезинфицирующими растворами (с учетом тепловых воздействий, скоростей истечения рабочих сред, больших перепадов давления и т. д.).

Следует отметить особенность сельскохозяйственной техники, заключающуюся в сезонном характере ее использования. При этом в период длительного хранения (без консервации) под действием влаги, солнечных лучей, ветра, колебаний температуры и других факторов происходят разрушения и деформация ряда деталей и покрытий, а также их коррозия.

В силу указанных обстоятельств повышенные требования предъявляются к надежности конструкционных материалов, из которых изготавливаются детали машин. Также уделяется значительное внимание совершенствованию вспомогательных материалов, которые обычно не входят в состав создаваемых конструкций в качестве основных компонентов, а служат для решения разнообразных производственных и эксплуатационных нужд. Среди них особую роль играют смазочные и топливные материалы, обеспечивающие нормальную работу машин.

В последние годы наметился ряд прогрессивных направлений повышения эффективности машин, связанных с применением различных наноматериалов. К наиболее распространенным конструкционным наноматериалам относятся нанокристаллические и нанокпозиционные материалы, обладающие улучшенными механическими свойствами. Для изготовления определенных типов деталей служат нанопористые материалы. Для повышения надежности деталей машин их поверхность подвергают наномодифицированию, а также наносят на поверхность нанопокртия, выполняющие упрочняющие, защитные и некоторые специальные функции. Для снижения износа деталей узлов трения используют смазочные наноматериалы, для повышения эффективности работы двигателей внутреннего сгорания – топливные наноматериалы.

5.2. Конструкционные наноматериалы

Металлические нанокристаллические материалы

Металлические материалы с нанокристаллической структурой обладают необычными механическими свойствами, которые существенным образом зависят от размера составляющих их зерен. С уменьшением размера зерен уменьшается плотность содержащихся в них дислокаций и вместе с тем увеличивается объемная доля границ раздела (границ зерен и тройных стыков), что приводит к изменению механических свойств материалов. Существует некоторый критический размер нанозерен R^* (приблизительно 10–20 нм), которым определяется степень устойчивости в них дислокаций: в нанозернах с размером $R < R^*$ вероятность существования дислокаций мала, наоборот, в нанозернах с размером $R > R^*$ может содержаться довольно

большое число дислокаций [153]. Если нанокристаллический материал состоит из нанозерен с размером $R < R^*$, то он обладает высокой прочностью, и, кроме того, сверхтвёрдостью. Например, предел текучести и микротвёрдость у нанокристаллической меди в 4 раза выше, чем у крупнозернистой меди [154]. Если нанокристаллический материал состоит из нанозерен размером $R > R^*$, то он обладает сверхпластичностью, которая проявляется при сравнительно низких температурах и высоких скоростях деформации. Например, относительное удлинение до разрушения никеля с размером зерен 35 нм при температуре 420 °С и скорости деформации 10^{-2} с^{-1} составляет около 1000 % [154]. Такой характер проявления механических свойств нанокристаллических материалов в зависимости от изменения размеров зерен принципиально отличает их от крупнозернистых материалов, для которых прочность и твердость однозначно повышаются с уменьшением размера зерен (согласно эмпирическому закону Холла-Петча) [155].

Низкотемпературная сверхпластичность металлических наноматериалов открывает новые возможности для развития перспективных технологий сверхпластичной штамповки и формовки, а также комбинированных технологий, сочетающих сверхпластическую формовку и сварку давлением, что позволяет существенно расширить ассортимент сложнопрофильных изделий [156].

Особенностью металлических нанокристаллических материалов является их большая износостойкость. Так, при уменьшении размера зерна в никеле от 10 мкм до 10 нм скорость износа снижается с 1330 до 7,9 мкм³/мкм [154].

Среди металлических материалов наиболее распространенными являются стали (доля сталей в общем объеме конструкционных материалов превышает 90 %) [154]. Соответственно, применению сталей с нанокристаллической структурой уделяется особое внимание, прежде всего в силу присущих им повышенных прочностных свойств. Например, сталь 12Х18Н10Т с размером зерна 100 нм имеет предел текучести 1340 МПа, что в 6 раз больше предела текучести этой же стали с крупнозернистой структурой [154]. Кроме того, в нанокристаллической стали этой марки резко возрастает внутреннее трение по сравнению с ее крупнозернистыми аналогами, что обеспечивает повышение ее демпфирующих свойств. Стали с нанокристаллической структурой, приобретая более высокую прочность, сохраняют высокие показатели пластичности и ударной вязкости, в том числе при отрицательных температурах.

К широко применяемым металлическим материалам относятся алюминиевые сплавы, достоинством которых являются легкость и коррозионная стойкость (на воздухе алюминий покрывается прочной пленкой Al_2O_3 , которая препятствует его дальнейшему окислению). Из алюминиевых сплавов изготавливают корпусные детали машин и агрегатов, подшипники скольжения, емкости для жидкостей, трубопроводы, двери, оконные рамы и т.д. Алюминиевые нанокристаллические сплавы обладают высокой износостойкостью, которая значительно выше износостойкости аналогичных крупнозернистых сплавов. Кроме того, в алюминиевых сплавах

с уменьшением размеров зерен до нанометровых могут проявляться сверхпластичные свойства, что расширяет технологические возможности изготовления из них изделий путем обработки давлением. Например, в субмикроструктурном сплаве Al-3% Mg-0,2% Sc при температуре 400 °C и скорости деформирования $3,3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ наблюдается удлинение 2280 % [154].

В пищевой промышленности в последние годы все более широко применяется титан благодаря высокой стойкости к действию пищевых сред [157]. Из него изготавливают котлы для приготовления рассолов, томатных продуктов и соусов, оборудование для переработки овощей и т. д. Прочность свойства титана существенно возрастает (предел прочности составляет 1100 МПа) при формировании в нем нанокристаллической структуры [154]. Кроме того, в нанокристаллическом титане и его сплавах наблюдается уменьшение адгезионной составляющей коэффициента трения, а также склонности к схватыванию (налипанию, сварке), типичной при наличии крупнозернистой структуры [158].

Эффективным способом упрочнения металлических деталей является формирование на их поверхности нанокристаллического слоя в результате интенсивной многократной пластической деформации, которая может осуществляться, в частности, в процессе трения [159].

Металлические нанокompозиты

Металлические нанокompозиционные материалы делятся на матричные и слоистые. Наибольшее распространение имеют матричные нанокompозиты, типичными представителями которых являются твердые сплавы системы WC-Co. В них с переходом размеров зерен карбида вольфрама в нанометровую область увеличивается твердость зерен и уменьшается толщина межзеренной кобальтовой прослойки. Это приводит к уменьшению пластичности и затрудняет вырывание зерен при износе и, как следствие, способствует значительному улучшению механических свойств сплавов [160]. Так, в твердом сплаве состава WC-6% Co при уменьшении среднего размера зерен карбида вольфрама с 1,5 до 0,5 мкм прочность, твердость и износостойкость возрастают в 1,5–2 раза [154].

Нанокompозиты на стальной матрице армируют преимущественно наночастицами оксидов металлов (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2), которые играют роль упрочняющих компонентов [153]. Выбор в качестве таких компонентов оксидов, а не карбидов или нитридов, обусловлен тем, что кислород значительно меньше растворяется в матричном материале, чем углерод или азот.

Легирование порошкового железа нанопорошковой медью (3 мас. %) вызывает значительное улучшение механических свойств спеченных порошковых сталей: относительное удлинение возрастает в 5 раз, ударная вязкость – в 3, твердость в 1,25 раза по сравнению со сталями, легированными крупнодисперсным порошком меди [161].

Нанокompозиты на алюминиевой матрице, упрочненные наночастицами керамики (SiC , B_4C , BN) или синтетического алмаза, обладают более

высокими антифрикционными свойствами и износостойкостью, чем матричные алюминиевые сплавы [154, 162, 163]. Особенно широко применяются нанокompозиты типа САП (спеченная алюминиевая пудра), в которых алюминиевая матрица армирована наночастицами Al_2O_3 [153].

Нанокompозиты на медной матрице с включениями наночастиц оксидов металлов (Al_2O_3 , BeO_2 , ThO_2) или синтетических алмазов приобретают повышенную прочность, сохраняя при этом высокую электропроводность медной матрицы, что делает их перспективными для изготовления электроконтакторов, работающих при высоких динамических нагрузках [153, 163].

Подобно металломатричным нанокompозитам высокие механические свойства демонстрируют металлические слоистые нанокompозиты. Так, многослойный наноламинат Mo-W толщиной 50 мкм, состоящий из слоев молибдена и вольфрама толщиной 4 нм, по прочности и твердости в 15 раз превышает сплав соответствующего состава [154].

Полимерные нанокompозиты

При изготовлении деталей машин и агрегатов, наряду с металломатричными нанокompозитами, все большее применение находят нанокompозиты с полимерной матрицей, которая наполняется наночастицами глинистых минералов, металлов и их соединений, а также наноалмазами, фуллеренами или углеродными нанотрубками [161, 164, 165]. Такие композиты обладают повышенной износостойкостью. Так, скорость изнашивания для нанокompозитов на основе политетрафторэтилена, наполненного нанопорошком $MgAl_2O_4$ (2–5 мас. %), составляет 0,6–3,4 мг/ч, в то время как для традиционных аналогов, содержащих в качестве наполнителя кокс и дисульфид молибдена – 12–16 и 40–45 мг/ч соответственно. При этом прочность и пластичность для всех материалов остаются практически одинаковыми [154].

Для герметизации различных соединений, а также в качестве уплотнителей используются нанокompозиты на основе эпоксидной смолы, модифицированной углеродными нанотрубками [161]. У таких композитов наблюдается значительное повышение предела прочности при растяжении (на 400 %) и при изгибе (на 120 %). Из таких композитов также можно изготавливать детали, обладающие низким коэффициентом трения [161]. На основе эпоксидной смолы с добавками фуллеренов разработаны клеящие композиции, которые применяются в ремонтном производстве [153, 161].

Керамические нанокристаллические материалы и нанокompозиты

При изготовлении деталей машин и агрегатов особая роль отводится конструкционной керамике, которая формируется на основе карбида и нитрида кремния, оксидов циркония и алюминия, нитридов алюминия, титана, бора, циркония и некоторых других соединений и обладает повышенной прочностью, твердостью, износостойкостью, температурной и коррозионной стойкостью. Из нее изготавливают режущие элементы,

экструзионные головки, сопла, штуцеры, фильеры, уплотнители, крыльчатки и др. детали машин и агрегатов [166, 167]. В частности, она является перспективным материалом для изготовления режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающей техники [168]. К основным недостаткам керамики относятся низкая трещиностойкость и пластичность. Этим недостаткам лишена нанокристаллическая керамика. Для нее характерна повышенная низкотемпературная пластичность, которую можно использовать в промышленных процессах экструзии и прокатки керамики [154]. С уменьшением размеров зерен до нанометровых возникает возможность деформировать керамику при довольно высоких скоростях деформации (около 10^{-2} с^{-1}).

Нанопористые материалы

Среди нанопористых материалов наиболее широкое распространение получили нанопористые мембраны, служащие в качестве фильтрующих элементов, применяемых в процессах производства пищевых продуктов. Для осуществления эффективной нанофильтрации такие мембраны должны обладать механической и химической стабильностью в органических средах, демонстрировать высокие значения удерживания целевых компонентов и транспорта органических растворителей. Этим требованиям отвечают мембраны из керамических и полимерных материалов. Керамические мембраны обычно изготавливают из оксидов металлов (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 и др.), полимерные – из стеклообразных полимеров (полиамидов, полиимидов, полисульфонов и др.) и эластомеров (сшитых силиконовых каучуков) [153, 169].

Нанофильтры применяются для очистки воды, соков, пива, вина, уксуса. С их помощью можно управлять ароматом, цветом и другими свойствами пищевых продуктов, а также удалять избыток воды из фруктовых соков, сиропов и экстрактов (выход фруктовых соков из исходного продукта увеличивается до 95-99 %) [153, 170-173].

При приготовлении виноградных вин через мембраны проходят вода и этиловый спирт, в то время как ионы калия и винная кислота остаются в концентрате, из которого выпадает осадок примеси – винного камня. После удаления этого осадка смешивают фильтрат и концентрат, что повышает стабильность продукта и увеличивает срок его хранения [153].

Мембраны весьма эффективно используются в молочной промышленности, в частности, для фракционирования молочных белков при переработке сырной сыворотки в высококачественный заменитель жира [171], а также для очистки молока от бактерий, вызывающих его порчу [173, 174]. Проводимая таким образом стерилизация продлевает срок годности молока в 1,5 раза. При этом через мембраны проходят белки, витамины, ферменты и минеральные вещества, которые составляют ценность молока как пищевого продукта.

При помощи мембран можно извлекать различные вещества из растворов, в частности, экстрагировать продукты пищевого происхождения

(растительные масла, белки, биологически активные препараты и т. п.) [153, 169]. Их также можно использовать для отмывки и обезжиривания деталей и узлов машин и аппаратов [169].

Для длительного хранения фруктов и овощей применяют так называемые газоселективные мембраны, ограничивающие поступление кислорода в емкость и вместе с тем пропускающие диоксид углерода [153].

Довольно широкое применение находят мембраны особого типа – так называемые ядерные фильтры, которые получают с использованием ядерной технологии. Такие мембраны обладают калиброванными размерами пор, формируемых тяжелыми ионами, которые проходят сквозь пленку облучаемого вещества (слюда, стекло, полимер) и образуют каналы размерами от 0,1 до 5 нм (в зависимости от толщины пленки) [153].

Эффективность мембранных наночистот повышается в результате нанесения на них наночастиц серебра, благодаря чему становится возможным осуществлять одновременно и фильтрационную, и бактерицидную обработку пищевых продуктов [171].

Значительное место среди нанопористых материалов отводится цеолитам ввиду их особых свойств, таких, как способность к обратимой адсорбции, наличие пор с входными отверстиями строго определенных размеров, большая величина внутренней поверхности. С помощью цеолитов осуществляется сушка и очистка газов и жидкостей, сорбция токсичных веществ в жидких и газовых средах, разделение смесей различных веществ [153].

Нанорезина

При ремонте машин большой объем работ составляет замена изношенных резинотехнических изделий (шин, ремней, уплотнителей и т. д.). Для повышения срока службы, а также эксплуатационных свойств резины в нее вводят нанодисперсные наполнители: графит, технический углерод, продукты биохимической переработки природных углей [161]. Для повышения механических свойств шинной резины (условной прочности, сопротивления раздиру и прочности сцепления с металлокордом) ее наполняют металлическими нанопорошками (0,25–0,5 мас. %) [161].

Наностекло

Для придания стеклу противопожарных свойств, его изготавливают из двух слоев обычного стекла, между которыми заключают прозрачный слой нанопористого оксида кремния [175]. При пожаре нанопена затвердевает и мутнеет, позволяя стеклу выдерживать гораздо более сильные тепловые нагрузки и одновременно становясь надежным барьером для теплового потока. Аналогично, для улучшения его теплозащитных свойств, между двумя слоями обычного стекла заключают поливинилбутиратную пленку, содержащую наночастицы гексаборида лантана (LaB_6), которая служит фильтром для инфракрасного излучения [176].

Наногерметики

Долговечность и эффективность работы машин в значительной мере зависит от герметичности неподвижных фланцевых соединений [177]. Потери рабочих жидкостей в автомобилях из-за недостаточной герметичности фланцевых соединений доходят до 30 %. Около 60 % тракторов имеют дефекты в уплотнениях двигателей, 44 % - коробок передач, 69 % - тормозных камер и 31 % - гидравлических систем. Улучшение герметичности уплотнений способствует снижению расхода топливосмазочных материалов, увеличению ресурса деталей и уменьшению негативного влияния машин на экологическую обстановку.

До недавнего времени для герметизации неподвижных фланцевых соединений в основном использовали прокладки из резины, картона, фторопласта и т.п., которые не всегда обеспечивают требуемую герметичность из-за низкого качества соединяемых поверхностей, нарушения геометрии деталей в процессе их эксплуатации, невозможности создания необходимого контактного давления. Этих недостатков лишены герметики, поскольку они полностью заполняют неровности герметизируемых поверхностей фланцев, не требуют высоких контактных давлений, обладают высокой механической прочностью и эластичностью.

Наибольшее применение получили силиконовые и анаэробные герметики, которые имеют высокую герметизирующую способность в широком диапазоне давлений и температур. Для улучшения свойств герметиков в их состав вводят различные наполнители. Особенно перспективно использовать в качестве наполнителей наночастицы, которые позволяют получать герметики с нанокompозитной структурой.

Примером тому являются нанокompозитные анаэробные и силиконовые герметики, содержащие бемит (10 %), наночастицы серебра (2%) и углеродные наногрубки (1%), у которых герметизирующая способность значительно выше, чем у ненаполненных герметиков [177]. Введение нанонаполнителей в полимерную матрицу герметиков приводит к снижению остаточной деформаций до 33 %, времени полимеризации до 25 %, ползучести до 20 %, повышению модуля упругости до 35 %, коэффициента восстанавливаемости до 26 % и теплостойкости до 25 %, стойкости к процессам набухания и растворения до 39 %, стойкости к вибрационным нагрузкам до 18 %, стойкости к старению до 15 %.

5.3. Наномодифицирование поверхности

Под технологиями поверхностного наномодифицирования компактированных материалов понимаются разнообразные технологии обработки поверхности материалов, приводящие к формированию наноструктурного приповерхностного слоя, а также наноразмерного рельефа поверхности.

В последние годы особенно быстрыми темпами развивается поверхностное наноструктурирование [178]. Объемное наноструктурирование, т.е. создание наноструктурных компактов представляет собой довольно сложный технологический процесс, в сравнении с которым поверхностное наноструктурирование гораздо проще в реализации и требует меньших затрат. При этом по эксплуатационным свойствам изделия с наноструктурированными поверхностями, как правило, мало отличаются от объемно наноструктурированных изделий. В результате формирования наноструктурных приповерхностных слоев конструкционных и инструментальных материалов достигается значительное повышение служебных свойств материалов: усталостной прочности, жаропрочности, жаростойкости, износостойкости.

Одним из эффективных направлений поверхностного наноструктурирования является обработка поверхности концентрированными потоками энергии (КПЭ), к числу которых относятся интенсивные импульсные лазерные, электронные и ионные пучки, а также потоки импульсной плазмы [179]. При их воздействии происходит сверхбыстрый нагрев, плавление, испарение, сверхбыстрое затвердевание материала, возникают динамические поля температур и волны напряжений. В результате этих процессов в приповерхностных слоях создаются новые структурные состояния: нанокристаллические и аморфные структуры, сплавы из несмешиваемых элементов и др. Столь значительные изменения структуры приповерхностных слоев могут вызывать улучшение физико-химических и прочностных свойств материалов, которые не достигаются при традиционных методах поверхностной обработки.

К наиболее распространенным технологиям поверхностного наномодифицирования материалов относятся поверхностная наноакалка, поверхностное нанолегирование, а также магнитно-абразивное нанополирование.

Поверхностная наноакалка

Сущность поверхностной наноакалки состоит в термической (электронно-лучевой, плазменной, лазерной, электроискровой, индукционной) обработке металлов в условиях оплавления и последующего сверхбыстрого охлаждения поверхности, в результате чего в приповерхностном слое формируется нанокристаллическая структура с повышенной твердостью и прочностью, а также сглаживается рельеф поверхности [178].

В процессе термической обработки металла происходит сверхбыстрый нагрев (10^8 - 10^9 К/с) поверхности до температуры плавления. Затем происходит сверхбыстрое (10^6 - 10^8 К/с) охлаждение за счет отвода тепла в более глубокие холодные слои металла. В результате осуществляемой таким образом сверхбыстрой закалки из расплава в приповерхностном слое (толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков микрометров) формируется закалочная нанокристаллическая структура и, как следствие, повышается твердость поверхности. Кроме того, в оплавленном слое

поверхности за счет сил поверхностного натяжения происходит выглаживание рельефа поверхности.

Возможны два разных механизма реализации процесса поверхностной нанозакалки: 1) непосредственное формирование нанокристаллической структуры при высоких скоростях охлаждения расплава и 2) формирование аморфной структуры при превышении некоторого критического значения скорости охлаждения расплава и последующая контролируемая термическая обработка, приводящая к переходу из аморфной фазы в нанокристаллическую [178].

Для поверхностной нанозакалки металлов перспективно проводить обработку поверхности низкоэнергетическими импульсными электронными пучками [178, 180]. Действие сильнофокусированного импульсного электронного пучка приводит к сверхбыстрому нагреву, расплавлению и последующей сверхбыстрой кристаллизации тонкого поверхностного слоя металлической детали. При этом сама деталь остается практически холодной. Модифицированный таким способом приповерхностный слой толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков микрон приобретает нанокристаллическую структуру. Кроме того, достигается существенно меньшая шероховатость поверхности, что позволяет использовать электронно-пучковую обработку вместо механической полировки деталей. Также приповерхностный нанокристаллический слой защищает поверхность от коррозии. Обработка режущего инструмента на импульсной электронно-лучевой установке позволяет получить материал с высокими прочностными свойствами, высокой стойкостью к ударным нагрузкам и термоциклированию. Данная технология позволяет модифицировать поверхность инструмента даже из такого тугоплавкого материала, как карбид вольфрама, при этом срок службы инструмента повышается вдвое.

Также перспективно осуществлять поверхностной нанозакалки, обрабатывая поверхность деталей низкотемпературной плазмой комбинированного разряда [181]. Обработка проводится в установке, основными элементами которой являются камера обработки, генератор СВЧ-энергии, блок питания генератора, блок подачи потенциала на поверхность детали, система газонапуска (технологический газ – азот), вакуумная система.

Под действием низкотемпературной плазмы поверхность деталей приобретает новые свойства: шероховатость поверхности снижается в 1,7-6,7 раза (на поверхности образуется пленка, которая заполняет микронеровности поверхности); микротвердость (по Виккерсу) поверхности повышается, что обеспечивает увеличение износостойкости в 3-4 раза. Микрорельеф поверхности претерпевает изменения, вызванные оплавлением микронеровностей, а также измельчением структуры приповерхностных слоев с образованием мелкодисперсной фазы с размерами зерна 20-50 нм на глубине до 20 мкм и формированием слоистой структуры толщиной 100-150 нм и шагом 300-400 нм на глубину до 4 мкм. Мелкодисперсная фаза состоит из распределенных у поверхности

карбидов. Микроструктура мелкодисперсного слоя представляется собой мелко-игольчатый мартенсит. Глубина модифицированного слоя достигает до 300 мкм.

Наномодифицирование поверхности деталей происходит в результате действия скомпенсированного потока заряженных частиц (ионов и электронов), сформированного в низкотемпературной плазме комбинированного разряда. Модификация приповерхностных слоев начинается в тот момент, когда активные частицы плазмы, ускоряясь, приобретают энергию, достаточную для того, чтобы преодолеть потенциальный барьер кристаллической решетки. Высокоэнергетические ионы внедряются в кристаллическую решетку и передают ей свою энергию. Внедрению ионов способствуют потоки электронов плазмы, вызывающие усиление электропереноса.

Воздействие плазмы на поверхность вызывает ее оплавление и сглаживание ее микронеровностей. В результате воздействия плазмы происходит сильный нагрев поверхности. Последующее охлаждение в вакууме приводит к резкому охлаждению поверхности, что вызывает измельчение структуры приповерхностных слоев с образованием мелкодисперсной фазы.

Поверхностное нанолегирование

В последние годы получил развитие способы поверхностного упрочнения металлов, согласно которым в них формируют тонкие легированные приповерхностные слои путем обработки поверхности с использованием КПЭ. Одним из таких способов является электровзрывное легирование (ЭВЛ) [182-184].

В результате электровзрыва образца токопроводящего материала образуется сверхзвуковая импульсная плазменная струя, взаимодействие которой с поверхностью обрабатываемого металла приводит к оплавлению приповерхностного слоя и его насыщению продуктами взрыва с последующим сверхбыстрым охлаждением. При этом вблизи поверхности формируется ударно-сжатый слой с высокими значениями температуры и давления, а в зоне оплавления, насыщаемой компонентами плазмы, интенсивно развиваются процессы конвективного перемешивания, вызывающие перераспределение легирующих элементов по всей глубине расплава.

Химический состав плазменного потока задается материалом взрываемого образца. Так, может быть электровзрывное меднение, железнение, алитирование, никелирование, науглероживание, борирование, бороалитирование, боротитанирование, карбоборирование и т.д. Кроме того, в плазменную струю можно вводить порошковые частицы различных веществ (карбидов, оксидов, нитридов, боридов и др.), которые при формировании струи увлекаются ею и переносятся на обрабатываемую поверхность, увеличивая тем самым возможности изменения структуры и фазового состава зоны легирования.

Особый интерес представляет электровзрывная обработка при высокоинтенсивных режимах воздействия на поверхность, когда глубина зоны легирования и степень ее насыщения легирующими компонентами достигают наибольших значений.

При электровзрывном легировании образуется наноструктурная зона легирования, состоящая из четырех характерных слоев (рис. 5.1...5.4) [184, 185]:

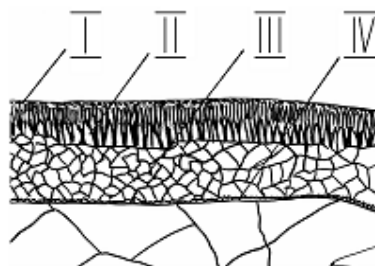


Рис. 5.1. Схема строения зоны электровзрывного легирования по глубине
I – приповерхностный слой, II – промежуточный, III – приграничный,
IV – нанокристаллический подслой

- 1-й тонкий (1 мкм) приповерхностный наноконпозиционный слой (рис. 5.2), содержащий частицы синтезируемых фаз с размерами кристаллитов 1-10 нм;

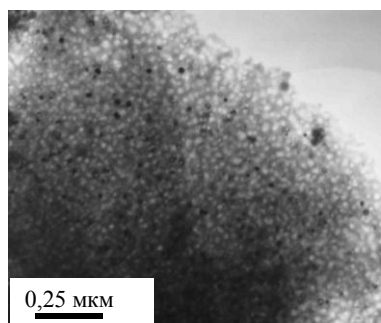


Рис. 5.2. Структура приповерхностного нанокристаллического слоя зоны электровзрывного меднения никеля

- 2-й промежуточный слой с ячеистой структурой (рис 5.3), состоящей из ряда параллельных элементов, имеющих форму стержней и расположенных в направлении кристаллизации); диаметр ячеек в нем с глубиной увеличивается, а разделяющих их прослоек уменьшается, размер кристаллитов в прослойках ~10 нм;

- 3-й приграничный слой с зеренной структурой (рис. 5.4), внутри зерен которого с размером 10-100 нм имеются частицы упрочняющих фаз с размером ~1 нм;

- 4-й тонкий (1-2 мкм) нанокристаллический подслой с низкой степенью легирования на границе с основой; размеры кристаллитов материала основы в нем составляют 30-40 нм, а частиц упрочняющих фаз – 3-5 нм.

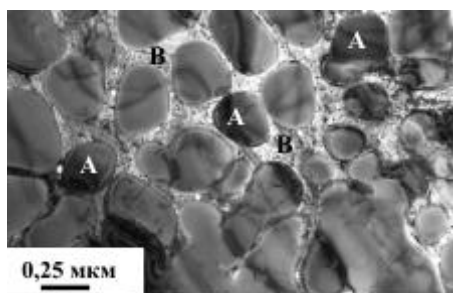


Рис. 5.3. Структура слоя ячеек кристаллизации, формирующихся в никеле при электровзрывном боромеднении
 А – кристаллиты Ni(Cu), В – боридные прослойки



Рис. 5.4. Структура приграничного слоя в никеле при электровзрывном науглероживании (кристаллиты Ni₃C)

Электровзрывное легирование приводит к значительному повышению эксплуатационных свойств металлов: твердости, жаро- и износостойкости, устойчивости к фреттинг-коррозии. Так, обработка поверхности с плавлением и насыщением поверхностных слоев инструментальной стали Х12 компонентами многофазной струи, сформированной электровзрывом алюминиевой фольги с порошковой навеской ультрадисперсного порошка карбида кремния, позволяет получить зону легирования толщиной 20 мкм [184, 186]. При этом микротвердость поверхности повышается в 3 раза, абразивная износостойкость – в 8 раз, жаростойкость в атмосфере воздуха (при температуре 800°C) – в 9 раз.

В работе [187] исследовали процесс формирования поверхностного слоя стали 40Х, которую подвергали, во-первых, облучению высокоинтенсивным импульсным электронным пучком и, во-вторых, легированию путем плавления системы медная пленка – стальная подложка при облучении высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Обработке подвергали сталь 40Х, которая была в отожженном состоянии, т.е. имела поликристаллическую структуру, представленную зернами феррита и перлита.

Процесс обработки заключался в следующем: на поверхность стали наносили тонкую (1,5-2,0 мкм) пленку меди вакуумно-дуговым методом, затем сформированную систему пленка - подложка обрабатывали высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Высокоскоростная кристаллизация и последующая закалка стали приводили к формированию модифицированного слоя толщиной до 30 мкм. В поверхностном слое

возникла ячеистая структура, средние размеры ячеек увеличивались от 240 до 500 нм при росте плотности энергии пучка электронов от 10 до 20 Дж/см². Облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком системы пленка – подложка сопровождалось образованием поверхностного сплава с закалочной структурой, упрочненной наноразмерными выделениями частиц меди.

В работе [188] представлены результаты поверхностного легирования сплава ВТ6 (Т1-6Л1-4У) цирконием. Эксперименты проводили на многослойной пленке (24 нанослоя) общей толщиной 480 нм, нанесенной на подложку из сплава ВТ6 магнетронным способом. Образцы подвергали облучению электронным пучком. Облучение приводило к плавлению всех нано-слоев пленки. Общая толщина расплавленного слоя составляла около 1 мкм. В результате импульсного плавления происходило равномерное по глубине перемешивание всех нанослоев и проникновение циркония в подложку на глубину около 0,5 мкм.

Магнитно-абразивное нанополирование

Эффективным способом формирования нанорельефа поверхности и приповерхностного слоя с оптимальными функциональными свойствами является магнитно-абразивное полирование (МАП) [189].

Сущность МАП заключается в том, что ферроабразивный порошок под действием магнитного поля приобретает вид «эластичной щетки», полирующей поверхность детали. При этом импульсное магнитное поле оказывает решающее влияние на формируемый нанорельеф и дефектную структуру приповерхностного слоя.

В процессе МАП наноразмерный приповерхностный слой обрабатываемой детали наряду с упругопластической деформацией подвергается активному действию магнитного поля на атомно-вакансионные связи и структуру за счет механизмов магнитострикции, магнито- и электропластического эффектов. Все эти факторы в совокупности выводят на поверхность слабо закрепленные дефекты (дислокации, дисклинации и др.), в результате чего формируются приповерхностный слой с минимумом дефектов структуры и нанорельеф поверхности с высотой неровностей менее 3 нм.

Экспериментально установлено, что процесс МАП в 1,5-3 раза повышает износостойкость, контактную и усталостную прочность деталей по сравнению с операцией шлифования. Это процесс также может применяться для повышения коррозионной стойкости поверхностей изделий из алюминиевых и циркониевых сплавов, сталей и других материалов.

5.4. Нанопокрyтия

Для получения конструкционных и инструментальных металлов и сплавов, поверхности которых обладают высокими прочностными, антифрикционными и антикоррозионными свойствами, эффективно

использовать специально создаваемые упрочняющие и защитные нанопокрyтия [190].

Наибольшее распространение получили нанопокрyтия из неорганических материалов – металлов и сплавов, химических соединений (карбидов, нитридов, оксидов и т.п.), а также углерода [191]. Как правило, нанопокрyтия характеризуются многокомпонентным составом с большим набором легирующих элементов и особой структурой, благодаря чему они придают материалу деталей новые свойства. Такие покрyтия наиболее востребованы при изготовлении деталей машин, работающих в экстремальных условиях (высокая температура, агрессивные среды), при форсированных режимах, а также металлообрабатывающего инструмента.

Различают следующие виды нанопокрyтий: наноструктурные, включая нанокристаллические и нанокомпозитные, и нанослойные [192].

Нанокристаллические (нанозернистые) покрyтия имеют кристаллическую структуру, состоящую из наноразмерных кристаллитов (зерен). Свойства нанокристаллических материалов в значительной мере зависят от размеров зерен. В частности, поведение нанокристаллических материалов с размерами зерен 10 нм и менее определяется в основном процессами, происходящими в пограничных областях, поскольку количество атомов в зернах сравнимо или меньше, чем в межзеренных границах. Это обстоятельство существенно изменяет характер взаимодействия соседних зерен, в частности, тормозит генерацию дислокаций, концентрация которых в зернах становится практически равной нулю.

Нанокомпозитные покрyтия состоят из матричной кристаллической фазы, в объеме которой распределены наночастицы упрочняющей фазы. Нанокомпозитные материалы, благодаря наличию армирующих наночастиц, обладают повышенной износостойкостью и прочностью, в том числе и в условиях действия циклических термомеханических напряжений.

Нанослойные покрyтия характеризуются наноразмерной толщиной. Они бывают как одно-, так и многослойными и могут иметь разную по характеру структуру, в том числе нанокристаллическую и нанокомпозитную.

Для нанесения нанопокрyтий применяют различные технологии. Соответственно, существуют и различные типы нанопокрyтий: напыленные, наплавленные, гальванические, фрикционно-наносимые и др. Отдельную группу образуют лакокрасочные нанопокрyтия.

Напыленные покрyтия

К технологиям напыления нанопокрyтий относятся газотермическое, холодное газодинамическое и магнетронное напыление.

Газотермическое напыление является наиболее распространенным способом поверхностного упрочнения деталей, представляющим собой процесс нагрева, диспергирования и переноса частиц напыляемого материала газовым или плазменным потоком на поверхность детали. Структура материала покрyтия формируется при ударе, деформации и затвердевании нагретых частиц на поверхности детали или ранее нанесенных остывших

частиц [193]. При этом образуется слоистое покрытие, стоящее из деформированных частиц, соединенных между собой контактными участками. Этот способ позволяет создавать наноструктурные покрытия путем использования напыляемого материала в виде нанодисперсных частиц (нанопорошков) [193, 194]. При этом достигаются существенно более высокие свойства покрытий, чем при напылении традиционных порошков с размерами частиц 10-200 мкм.

Для получения нанопокровтий применяют различные разновидности газотермических технологий (газопламенное, плазменное, детонационное напыление).

Газопламенное напыление. Сущность процесса газопламенного напыления заключается в нагреве напыляемого материала (порошка) газовым пламенем и его переносе на обрабатываемую поверхность струей сжатого газа.

При обычном газопламенном напылении скорость газопламенной струи сравнительно невысока (150-200 м/с). Поэтому частицы напыляемого материала, переносимые этой струей, длительное время находятся в зоне высоких температур и, как следствие, подвергаются сильному нагреву (температура пламени составляет около 3000оС) [195, 196]. Это ограничивает возможности применения данного способа для напыления нанокристаллических покрытий, так как используемые в этом случае наночастицы напыляемого материала расплавляются или сплавляются, так что покрытия теряют нанокристаллическую структуру.

Решить данную проблему позволяет высокоскоростное газопламенное напыление, которое по сравнению с обычным газопламенным напылением обеспечивает гораздо более высокую скорость газового потока (до 2000 м/с) за счет повышения давления в камере сгорания (до 1,5 МПа), а также создания специальной конструкции выходной части камеры сгорания – в форме расширяющегося сопла Лавая, обеспечивающего ускоренное истечение газового потока [196, 197]. Схема установки для высокоскоростного газопламенного напыления показана на рис. 5.5 [198]. Благодаря высокой скорости воздействия частиц на поверхность детали, получаемые покрытия характеризуются высокой плотностью (до 99%) и высоким показателем адгезии [199].

В основе технологии высокоскоростного газопламенного напыления лежит принцип придания максимально возможной кинетической энергии мелкодисперсным частицам напыляемого материала, введенным в газовую струю [200]. Это приводит к кратковременному пребыванию наночастиц в зоне высоких температур, благодаря чему они не доводятся до расплавления или сплавления, как это происходит при обычном газопламенном напылении. Как следствие, изменения гранулометрического и фазового состава исходного материала в процессе напыления становятся минимальными, благодаря чему создаются благоприятные условия для формирования нанокристаллических покрытий.

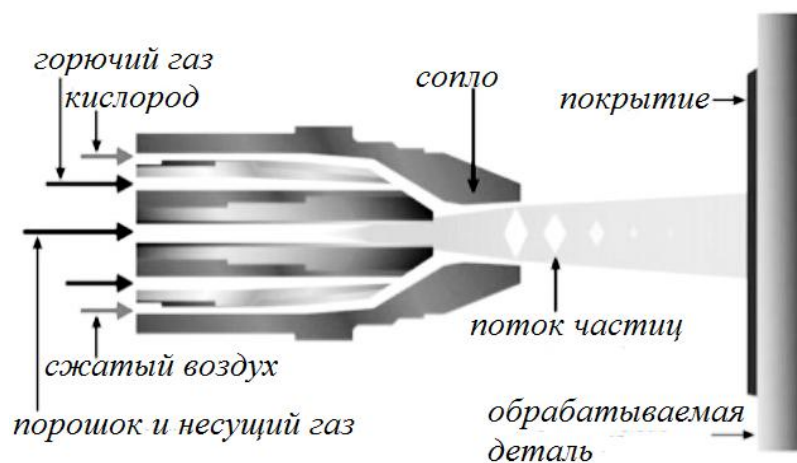


Рис. 5.5. Установка для высокоскоростного газопламенного напыления

Для получения нанокристаллических покрытий в качестве наносимого материала используются нанопорошки сплавов на основе Fe, Ni, Cu и других металлов, которые вводятся в газовый поток, нагреваются и с высокой скоростью направляются на обрабатываемую деталь [197]. Также используют композиционные нанопорошки, например, WC-Co (в этом случае получаются, соответственно, наноконпозиционные покрытия).

В некоторых вариантах высокоскоростного газопламенного напыления наносимый материал подается в камеру сгорания вместе с топливом в виде суспензий, содержащих наночастицы, или в виде растворов, являющихся прекурсорами наночастиц [200-203]. Суспензии подвергаются распылительной сушке, в результате которой образуются агломерированные наноструктуры, формирующие нанопокрытие. В свою очередь, растворы подвергаются диспергированию с помощью вихревого инжектора, в результате чего образуются капли раствора с размерами около 3 нм, которые в ходе физико-химических процессов, активированных тепловым воздействием, преобразуются в аналогичные агломерированные наноструктуры.

Плазменное напыление. Сущность процесса плазменного напыления заключается в том, что в плазменную струю, образуемую в электродуге плазмотроне при подаче в нее инертного газа, вводится напыляемый материал (порошок), который нагревается, плавится и направляется на обрабатываемую поверхность.

Скорость истечения плазменной струи из сопла плазмотрона составляет 350-400 м/с, а ее температура доходит до 5500°C [193]. Напыляемый материал в виде порошка с размерами частиц 40-100 мкм вводится в струю плазмы с помощью транспортирующего газа (аргона или воздуха). Скорость частиц напыляемого материала в плазменной струе при подлете к обрабатываемой поверхности достигает 80-100 м/с.

При обычном плазменном напылении из-за высокой тепловой мощности плазменной струи ограничиваются возможности использования напыляемых материалов в виде нанопорошков, поскольку наночастицы, находясь в струе,

расплавляются или сплавляются (по аналогии с обычным газопламенным напылением). Для предотвращения этого нежелательного явления применяют микроплазменное напыление, которое характеризуется сравнительно малой мощностью используемых плазмотронов и длиной плазменной струи. При этом за счет снижения нагрева и времени пребывания в плазменной струе наночастицы не доводятся до расплавления и сплавления, в результате чего формируются нанокристаллические покрытия [193, 204].

Плазменным напылением получают наноструктурные покрытия в основном из керамических и металлокерамических материалов.

Плазменным напылением получали наноструктурные покрытия из Al_2O_3 [203]. Их формировали из нанопорошков с разными размерами частиц: 200 нм, 100 нм и 60 нм. С уменьшением размера частиц напыляемых нанопорошков уменьшалась шероховатость покрытия. Структура полученных покрытий наследовала размер частиц напыляемых порошков.

Плазменным напылением и лазерным оплавлением получали металлокерамические покрытия с ультрадисперсной упрочняющей фазой Al_2O_3 для тяжело нагруженных узлов трения [154]. По показателям износостойкости, задиростойкости и антифрикционности такие покрытия были значительно эффективнее твердого электролитического хромирования, а по экономическим показателям в условиях серийного производства и по экологии процесса существенно лучше. Нанесение таких покрытий на внутреннюю цилиндрическую поверхность корпуса роторно-пластинчатого насоса для перекачки травящего раствора в производстве печатных плат позволяет повысить ресурс работы насосов более чем в 20 раз.

Особый интерес представляет процесс формирования плазменных наноструктурных покрытий через промежуточную аморфную фазу. Пример тому – напыление нанопорошковой смеси оксидов Al_2O_3 - Y_2O_3 , в результате которого получается покрытие с аморфной структурой [203]. Образование аморфной структуры является следствием высокой скорости охлаждения частиц при их затвердевании на подложке, которая достигает 108 К/с. После отжига при температурах 1273, 1473 и 1673 К покрытие с аморфной структурой переходит в кристаллическое состояние, после отжига при 1473 К в покрытии формируется наноструктура.

Детонационное напыление. При детонационном напылении напыляемый материал (порошок) нагревается, плавится и переносится на обрабатываемую поверхность за счет энергии газового взрыва.

Сравнительные исследования трибологических характеристик детонационных покрытий из нанокристаллических (размер зерна карбида вольфрама 17 нм) и крупнозернистых порошков твердых сплавов WC-Co показывают, что наноструктурированное покрытие имеет предельную нагрузку, при которой наблюдается катастрофическое разрушение поверхности, на 20 % выше, чем крупнозернистое покрытие [154].

Коэффициент трения для нанокристаллического покрытия на 40–50 % меньше, чем для крупнозернистого покрытия.

Детонационное напыление наноструктурных покрытий использовали для повышения ресурса подшипников скольжения погружных центробежных насосов [205]. Керамический порошок для напыления представлял собой гранулы размером 20-60 мкм, содержащие зерна размером 17 нм. В процессе напыления формировались наноструктурные покрытия с содержанием монокарбида (62%). Испытания таких покрытий показали, что они обладают пониженным коэффициентом трения и более высокой нагрузкой заедания по сравнению с обычным покрытием из керамического порошка.

Холодное газодинамическое напыление. Технология холодного газодинамического напыления основана на эффекте образования прочного слоя металлического покрытия при соударении холодных (с температурой, значительно меньшей температуры плавления) металлических частиц, ускоренных сверхзвуковым воздушным потоком, с обрабатываемой поверхностью [193].

При ударах нерасплавленных металлических частиц о поверхность детали они подвергаются пластической деформации. При этом кинетическая энергия частиц преобразуется в тепло и, частично, в энергию связи с поверхностью, обеспечивая формирование сплошного слоя из плотно упакованных металлических частиц, что обеспечивает получение покрытия с низкими температурными напряжениями без сквозных пор и микротрещин с высокими прочностными и антикоррозионными свойствами [193].

Используя технологию холодного газодинамического напыления, можно получать покрытия из большинства металлов и сплавов (алюминий, медь, никель, кобальт, ванадий, железо, цинк и др.), а также из смесей металлических порошков с различными порошками твердых керамических материалов (нитридов, карбидов и др.) на поверхности деталей из металлов и неметаллов. Эта технология также позволяет формировать наноструктурные покрытия. Так, на примере системы Ti/TiCN показано, что холодное газодинамическое напыление обеспечивает сохранение наноструктуры исходного порошка, снижая при этом пористость в покрытии с 9% до 1,5% и повышая его твердость с 4 ГПа до 12 ГПа по сравнению с напылением традиционного титанового порошка [193].

Преимущества холодного газодинамического напыления позволяют применять его не только для нанесения покрытий, но и для восстановления изношенных деталей машин.

Магнетронное напыление Сущность технологии магнетронного напыления заключается в нанесении тонкопленочных покрытий ионным распылением мишени в плазме магнетронного разряда.

Магнетронное напыление можно применять как для металлических, так и для неметаллических мишеней (и, следовательно, для получения соответствующих пленок). При магнетронном напылении температуры

обрабатываемых поверхностей невелики (не более 100-200°C), что обеспечивает возможности получения наноструктурных покрытий [206].

В работе [207] получены покрытия системы Ti-Al-Si-Cu-N методом магнетронного напыления в среде аргона и азота мишеней титана (BT 1-0), меди и сплава Al-Si при температуре осаждения около 150°C. Состав и условия осаждения покрытий определяли невысокое (менее 5 ат.%) содержание легирующих элементов и структурное состояние, соответствующее фрагментированным на наноразмерные домены субмикроструктурным зернам.

В работе [208] получены легированные алмазоподобные покрытия методом реактивного магнетронного напыления в среде, представлявшей смесь аргона и химически активных газов, один из которых был углеводородом. Для легирования покрытий использовали хром и активную смесь ацетилен-азот. Нанесенные покрытия имели нанокompозитную структуру, которая создавалась наноразмерными включениями металлического хрома и его различных карбидных и нитридных фаз в углеводородной матрице. Как следствие, покрытия обладали высокими механическими и трибологическими свойствами.

В работе [209] методом магнетронного напыления получены нанокompозитные покрытия на основе аморфного углерода с наночастицами карбида титана. Толщина покрытий, равномерно распределенных по поверхности образцов из титана, составляла 2,8–2,9 мкм. Структура покрытий представляла собой сложный композит, состоящий из наночастиц размерами 3-5 нм, соответствующих фазам TiC, TiCN, TiN, а также наночастиц Ni размерами до 100 нм в аморфной углеродной матрице (объемное содержание аморфной фазы около 75%). Твердость исходных титановых образцов составляла 2 ГПа, твердость покрытий – 7-11,6 ГПа. Покрытия характеризовались высокой прочностью и износостойкостью и низким коэффициентом трения.

Магнетронным напылением можно получать нанокристаллические тонкопленочные покрытия из диоксида титана TiO₂, обладающие уникальными электрофизическими, оптическими, химическими и бактерицидными свойствами [210].

Наплавленные покрытия

Обычно в покрытиях, получаемых наплавкой, образуется крупнозернистая структура металла: размер зерен матрицы и частиц упрочняющей фазы составляет от 40 до 110 мкм и более [211]. Как следствие, детали с наплавленными покрытиями имеют низкую усталостную прочность и износостойкость. Для существенного механических свойств эти покрытия должны наноструктурными. Такие покрытия можно создавать разными способами, в частности:

- аргонодуговой наплавкой неплавящимся электродом на постоянном токе в среде присадочного материала, содержащего железо, хром, никель, вольфрам, ванадий, углерод и другие элементы (при этом структура

наплавленного слоя будет состоять преимущественно из наночастиц размерами 80-100 нм и упрочняющей фазы размерами 2-10 мкм);

- скоростной пластической деформацией наплавленных слоев, при которой происходит дробление зерен до наноразмерного уровня [211].

Для получения наноструктурных покрытий перспективно использовать электроискровую наплавку, причем наилучший упрочняющий эффект достигается при формировании многослойных электроискровых покрытий [211]. Наноструктурные покрытия, полученные электроискровой наплавкой, применяются при ремонте гидрораспределителей, турбокомпрессоров, гидростатических трансмиссий, рулевых механизмов тракторов и т.д.

Примером эффективного применения наплавленных наноструктурных покрытий является упрочнение рабочих органов почвообрабатывающей техники [212]. Так, после наплавления комбинированных микро- и наноструктурных покрытий на стрелчатые лапы сеялок их ресурс увеличился в 3-4 раза. Полученные покрытия имели нанокompозитную структуру, содержащую карбиды и бориды тугоплавких металлов.

Гальванические покрытия

В основе технологии нанесения гальванических (электрохимических) покрытий лежит процесс электролиза, т.е. процесс протекания химических реакций под действием постоянного электрического тока на электродах в водных растворах солей металлов (электролитах). Гальванические покрытия наносят на поверхности металлических деталей для придания им твердости, износостойкости, антикоррозионных, антифрикционных свойств.

Более эффективно использовать гальванические композитные покрытия. Их получают из электролитов с добавкой высокодисперсного порошка. При этом на поверхности детали осаждается металл (никель, железо, кобальт, хром, медь и др.) и частицы порошка (бориды, карбиды, нитриды, силициды, а также абразивные порошки на основе оксидов железа FeO, кремния SiO₂, алюминия Al₂O₃, магния MgO, кальция CaO), которые скрепляются осаждаемым матричным металлом. Гальванические композитные покрытия обладают гораздо более высокими прочностными свойствами по сравнению с обычными гальваническими покрытиями.

Подобным способом получают гальванические нанокompозитные покрытия, для чего в электролиты добавляют нанодисперсные порошки (обычно в них вводят наночастицы керамики: Al₂O₃, CrB₂, SiC и др.) [150].

Например, для осаждения нанокompозитных гальванических покрытий на основе хрома использовали нанодисперсные порошки оксида алюминия Al₂O₃ с размерами частиц 10-30 нм [190]. Полученные нанокompозитные по сравнению с обычными хромовыми покрытиями обладали микротвердостью выше в 1,4 раза, износостойкостью – в 2,2 раза и коррозионной стойкостью – в 1,8 раза. Этот способ нанесения покрытий был применен для восстановления и упрочнения плунжерных пар топливного насоса высокого давления. Проведенные испытания показали, что ресурс плунжерных пар с

нанокompозитным хромовым покрытием в 1,8 раза выше, чем у плунжерных пар с обычным хромовым покрытием.

Широкое применение находят гальванические металломатричные покрытия, содержащие наноалмазы [150]. Включение наноалмазов в структуру Cr-покрытий приводит к повышению их износостойкости и микротвердости, благодаря чему такие покрытия позволяют повысить эффективность режущего инструмента [213]. Наличие наноалмазов в структуре Ag-покрытий обеспечивает повышение износостойкости при сохранении высоких электрофизических свойств, что важно при их использовании для изготовления скользящих контактов электротехнических устройств [214]. В Ni-покрытиях, модифицированных наноалмазами, износостойкость увеличивается в 2-4 раза при одновременном увеличении коррозионной стойкости на 50-120 % [161]. Аналогичный эффект обеспечивается металлополимерными покрытиями с добавками наноалмазов, которые способны надежно защищать детали от совместного воздействия износа и коррозии [213].

Фрикционно-наносимые покрытия

В промышленности широко применяется фрикционное (с помощью трения) нанесение медьсодержащих покрытий [190]. Такие покрытия толщиной от 50 до 500 нм наносятся в присутствии специальной технологической среды на трущиеся поверхности деталей – коренные и шатунные шейки коленчатого вала, гильзы цилиндров, реборды и поверхности качения вагонных колесных пар, различного вида штоки, пальцы, резьбовые соединения и т.д. Они обеспечивают снижение интенсивности изнашивания и повышение задиростойкости трущихся поверхностей, интенсифицируют процессы образования защитных пленок в период приработки после изготовления или ремонта изделий.

Особый характер структурных изменений поверхностных слоев пар трения наблюдается в условиях интенсивной пластической деформации при наличии в масле нанопорошка сплава меди [159]. Поверхностные слои в результате деформирования приобретают нанокристаллическую структуру, в которой значительно возрастает зернограничная диффузия меди, выделяющейся на поверхности в процессе трения. Как следствие, структура поверхностных слоев становится не только нанокристаллической, что приводит к повышению твердости, но и нанокompозиционной, что вызывает повышение пластичности.

Лакокрасочные покрытия

Наносимые на поверхности металлических деталей лакокрасочные покрытия являются одним из самых распространенных и надежных способов защиты их от коррозии.

Значительные перспективы имеют лакокрасочные нанопокpытия. Модифицирование лакокрасочных материалов наночастицами различного состава дает возможность обеспечить сочетание в них таких свойств, как

высокая эластичность, твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, гидрофобность [215, 216]. Неорганическими компонентами таких материалов могут быть нанопорошки металлов, диоксидов кремния и титана, сульфата бария, оксидов алюминия, циркония и других веществ, включая полимеры. Эффективными модификаторами лакокрасочных материалов также являются фуллерены, углеродные нанотрубки, наноалмазы [217, 218].

5.5. Смазочные наноматериалы

Постоянно возрастающие требования к качеству смазочных материалов приводят к необходимости совершенствования их состава, в частности, применения различных присадок, улучшающих их функциональные свойства. Одним из путей создания высокоэффективных присадок является использование принципов нанотехнологий, а именно, создание дисперсий наночастиц в моторных и трансмиссионных маслах, а также в пластичных смазках [219].

Важнейшая задача повышения качества смазочных материалов – обеспечение снижения износа деталей машин.

Износ деталей в узлах трения является одной из наиболее распространенных причин нарушения режима нормального функционирования и, в конечном итоге, выхода из строя машин. Для снижения износа используются различные виды смазочных масел, которые обеспечивают эффект жидкостного трения, заключающийся в образовании жидкой прослойки между трущимися поверхностями, препятствующей их непосредственному соприкосновению. При жидкостном трении работа на преодоление сил трения в основном направлена на преодоление сил молекулярного притяжения жидкой смазки.

Жидкостное трение зависит от различных факторов, к числу которых относятся смазывающая способность масла, в значительной мере определяемая его вязкостью, а также скорость относительного движения трущихся деталей, нагрузка на них и величина зазора между ними. При чрезмерно высокой вязкости масла возрастает работа на преодоление сил трения и, кроме того, затрудняется подача масла в зазор. Чем больше зазор, т. е. чем толще слой смазки, тем надежнее жидкостное трение. Однако при чрезмерно большом зазоре становится все более возможным выдавливание масла. Вероятность выдавливания масла возрастает с понижением его вязкости, а также с повышением нагрузки на детали. По мере вытекания масла из зазора жидкостное трение сменяется на менее благоприятное граничное трение, при котором поверхности разделяются только лишь адсорбированными молекулярными масляными пленками. Если прочность сцепления таких пленок с поверхностью невелика, то они разрушаются, что приводит к полусухому или даже сухому трению, при котором резко возрастает износ трущихся поверхностей, на них появляются задиры и происходит сваривание деталей.

Традиционный путь улучшения свойств смазочных масел – добавление к ним противоизносных присадок. Эти присадки состоят из поверхностно-активных веществ, образующих на поверхности деталей прочные адсорбированные масляные пленки, благодаря чему повышается сопротивление масел выдавливанию. Кроме того, такие пленки способны оказывать полирующее воздействие на поверхности. В качестве присадок используются различные продукты на основе высокомолекулярных жирных кислот, а также синтетические соединения, содержащие серу, хлор, фосфор.

В последние годы, в связи с развитием нанотехнологий, ведется разработка смазочных масел, модифицированных наночастицами различного состава, т. е. представляющих собой наносuspензии [153].

Изучением фрикционных процессов, происходящих на наноуровне, занимается новая научная область – нанотрибология, в развитии которой можно выделить два основных направления [220]. Первое направление связано с исследованием фрикционных процессов, характеризующихся наличием нанорельефных контактирующих поверхностей и нанотолщинных смазочных слоев [221, 222]. Особенности таких процессов, типичных для механических наносистем, определяются атомно-молекулярным взаимодействием поверхностей, контактирующих наночастицами (включая единичные наноконтакты) и находящихся под малой нагрузкой. Второе направление связано с исследованием фрикционных процессов, характеризующихся наличием наноструктурных контактирующих поверхностей и наноструктурных смазочных слоев. Такие процессы могут иметь место в различных узлах трения, в том числе содержащих поверхности, контактирующие макро- и микроучастками, обладающие макро- и микрорельефом и находящиеся под большой нагрузкой, а также содержащих макро и микротолщинные смазочные слои. Нанотрибологические исследования, проводимые в обоих направлениях, тесно взаимосвязаны. Это обусловлено тем, что фрикционное взаимодействие нанотел является частным случаем фрикционного взаимодействия макро- и микротел, контактирующие поверхности которых содержат множество макро-, микро- и нанонеровностей.

Известны различные виды нанодисперсных присадок к смазочным маслам, количество которых ежегодно увеличивается на рынках автохимической продукции [161, 223, 224]. Среди них наибольшее распространение получили нанопрепараты, позволяющие осуществлять безразборный технический сервис машин, под которым понимается комплекс мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту машин в процессе их непрерывной эксплуатации, проводимых без разборочно-сборочных работ [218, 225, 226].

Безразборный технический сервис может включать операции приработки (обкатки), диагностики, профилактики (сезонной подготовки), автохимического тюнинга, очистки и восстановления как отдельных узлов, так и машин в целом [218].

Для проведения безразборного технического сервиса используются различные ремонтно-восстановительные наносредства, к которым относятся

как нанодобавки к смазочным материалам, так и самостоятельные нанопрепараты [190].

По принципу действия наноприсадки к смазочным маслам делятся на следующие основные типы [227]:

- детергентно-диспергирующие – коллоидные системы, содержащие мицеллы, которые состоят из наноразмерных карбонатных ядер, олеофилизированных по поверхности молекулами сульфонов или алкилсалицилатов щелочноземельных металлов (Ca, Mg, Ba); оказывают моющее действие;

- антифрикционные (модификаторы трения) – олеофильные нанодисперсии сульфида молибдена MoS_2 , графита, фуллеренов, карбоната кальция CaCO_3 , фторопласта; оказывают противоизносное действие;

- металлоплакирующие – олеофильные нанодисперсии пластичных металлов ((меди, олова, свинца, серебра, алюминия); применяются для заполнения микротрещин на поверхностях трения;

- прирабочные – нанодисперсные абразивы (алмазные или керамические нанопорошки); ускоряют приработку поверхностей трения;

В отдельную группу входят микрокапсулированные наноприсадки, представляющие собой нанодисперсии, содержащие наночастицы присадочного вещества, покрытые пористой полимерной оболочкой, благодаря которой обеспечивается постепенное (замедленное) выделение присадочного вещества [227].

В последние годы получили распространение интеллектуальной присадки, которые проявляют свое действие в так называемые критические периоды эксплуатации машин (пуск-останов, приработка, перегрузка, перегрев и др.) [190].

В рамках указанных выше типов наноприсадок выделяются некоторые их виды, отличающиеся особым составом или механизмом действия.

К таким наноприсадкам, в частности, относятся [218]:

- кондиционеры металла, образующие в результате трибохимических реакций защитный граничный слой нанометровой толщиной, который обладает антифрикционными свойствами и одновременно стойкостью к большим нагрузкам;

- рекондиционеры металла, содержащие наноразмерные кластеры органических соединений, которые структурирует граничную масляную пленку и увеличивает адгезию масла к металлу;

- геомодификаторы – нанопрепараты на основе минералов естественного и искусственного происхождения, которые, попадая на поверхность трения вместе с маслом или пластичной смазкой, инициируют процесс формирования металлокерамической наноразмерной структуры с малым коэффициентом трения и высокой износостойкостью.

Особенности проявления механизмов влияния присадок к смазочным материалам на процессы трения определяются свойствами применяемых присадок и смазочных материалов, качественными характеристиками поверхностей трения, условиями их взаимодействия.

Повышение износостойкости стальных деталей в узлах трения при введении в смазку нанопорошков пластичных металлов обусловлено взаимодействием присадочных наноконпонентов с трущимися поверхностями с образованием на поверхностях в местах точечных контактов тонких пленок, предотвращающих непосредственный контакт поверхностей [228].

Введение в масло силикатных нанопорошков улучшает температурные характеристики масла и расширяет диапазон рабочих температур [229], что связывается со структурированием масла под влиянием наночастиц [230].

Все нанотрибопрепараты различаются по способам применения (введения в трущиеся соединения) [190]. Большинство присадок вводят в масла или пластичные смазки. Некоторые препараты подаются непосредственно в зону трения, например, в цилиндропоршневую группу. Порядок применения препаратов определяется техническим состоянием машин. Часто выпускаются препараты комплексного действия.

Благодаря применению нанотрибопрепаратов обеспечивается повышение износостойкости деталей; сокращение продолжительности и улучшение качества приработки поверхностей трения; повышение задиростойкости и снижение питтинга контактирующих поверхностей в тяжело нагруженных парах трения; снижение температуры работающих узлов, уровня шума и вибрации [190]. Их применение является наиболее эффективным в условиях граничного трения, при высоких нагрузках и скоростях скольжения, повышенной температуре трения и «масляном голодании», характерных для изношенных трущихся соединений техники с большим сроком службы, при режимах приработки и перегрузках [190].

С каждым годом нанотрибопрепараты все шире применяются для обеспечения надежной работы различной техники, о чем свидетельствует анализ мирового рынка нанотрибопрепаратов для автомобилей, выполненный в работе [231]. Одним из первых нанопрепаратов является препарат Energy Release, разработанный американской компанией Entech Corp для узлов машин, работающих в тяжелых условиях, в которых обычные смазочные материалы не обеспечивают требуемый уровень смазочных свойств. На поверхностях трибосопряжений, обработанных этим препаратом, образуется пленка толщиной 25 нм, на поверхности которой устанавливается динамическое равновесие между атомами железа самой пленки и переходными комплексами продукта Energy Release в составе моторного масла. Обработка нанопрепаратом Energy Release двигателя автомобиля приводит к уменьшению шероховатости поверхностей деталей до 0,01 мкм и уменьшению износа деталей двигателя в 5 раз.

В настоящее время выпускается большое количество разнообразных по составу нанотрибопрепаратов. Их производят всемирно известные компании, как Mobil, Shell, Castrol, British Petroleum, Neste, Comma, Total [231].

Детергентно-диспергирующие наноприсадки

Для предотвращения или уменьшения образования отложений продуктов окисления на рабочих поверхностях, а также для поддержания продуктов загрязнения во взвешенном состоянии в смазочные масла вводят моющие (детергенты) и диспергирующие (дисперсанты) присадки [232]. В качестве таких присадок широко используют соли (салицилаты, феноляты, сульфонаты) щелочноземельных металлов, в основном кальция. Основная их функция сводится к уменьшению образования осадков и отложений на поверхности деталей у двигателей [223].

В рамках сложившейся нанотехнологической терминологии [153] детергентно-диспергирующие присадки можно рассматривать как коллоидные наночастицы карбоната кальция, стабилизированного слоем поверхностно-активных веществ (ПАВ) [223, 232, 233]. Схема мицеллярного строения частицы такой присадки показана на рис. 5.6 [223].

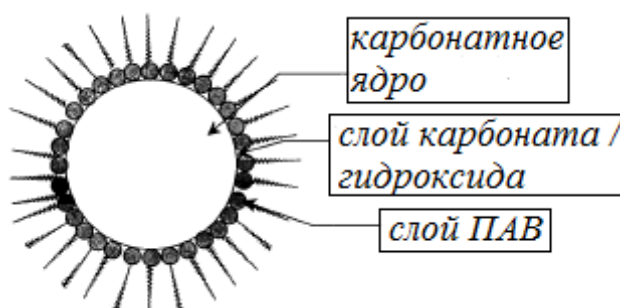


Рис. 5.6. Схема строения частицы детергентно-диспергирующей присадки

Размер частиц присадки зависит от структуры ПАВ и условий приготовления. Обычно радиус карбонатного ядра составляет 1-10 нм (15- 40 % масс.), стабилизированного растворимыми в масле ПАВ, окружающих ядро слоем толщиной 1-4 нм (20- 45 % масс.) [233, 234].

Главная роль в механизме действия детергентно-диспергирующих присадок отводится их способности к солюбилизации, т.е. способности включать в свои мицеллы продукты окисления и другие загрязнения [233]. Согласно существующим электрокинетическим представлениям о механизме моющего действия присадок, в частности сульфонатов, при растворении сульфоната в масле образуются мицеллы, несущие определенный заряд, поэтому масла ведут себя как неводные электролиты и эффективность их моющего действия обусловлена их электрической проводимостью. В связи с этим считается, что наибольшей моющей эффективностью обладают присадки, которые при растворении образуют наибольшее количество мицелл наименьших размеров, несущих более высокий электрический заряд.

Антифрикционные наноприсадки

Среди различных присадок, влияющих на трение и износ, наиболее значительный интерес представляют антифрикционные присадки – так

называемые «модификаторы трения» [223]. При введении в смазочные масла они способствуют экономии топлива, уменьшению расхода масла и снижению износа трущихся деталей. В последние годы все шире применяют разнообразные антифрикционные присадки.

В моторное масло предложено добавлять антифрикционную присадку в виде смеси наноразмерных частиц дисульфида молибдена и сплава латуни с фосфором [190].

Сравнительные испытания дизельных двигателей типа А-01 с использованием этой присадки к маслу М-10-Г2, которые проводились на обкаточно-тормозном стенде, показали, что присадка приводит к снижению момента механических потерь в дизелях. Смазочная среда, содержащая присадку, обладает лучшими противоизносными свойствами в отношении пары трения «шейка коленчатого вала – вкладыш», поскольку обеспечивает повышение давления масла в главной масляной магистрали дизелей. Так, она вызывает снижение износа шатунных шеек в 1,49 раза, коренных – в 1,35 раза, коренных вкладышей в 1,25, шатунных – в 1,29 раза. Также установлено, что дизели, прошедшие испытания на масле с присадкой, работают более эффективно. Так, при номинальной частоте вращения коленчатого вала средняя эффективная мощность обычно составляет 93 кВт, средний удельный расход топлива – 257 г/кВт·ч, а при использовании масла с присадкой – соответственно 96 кВт и 242 г/кВт·ч. Таким образом, эффективная мощность дизеля, испытанного на масле с присадкой увеличивается на 3,2%, а удельный расход топлива снижается на 6,1%.

Влияние предложенной присадки на антифрикционные и противоизносные свойства моторного масла объясняется образованием на трущихся поверхностях тонких граничных пленок, в которых отдельные компоненты присадки выполняют разные функции. Наличие в пленках наночастиц дисульфида молибдена, характеризующихся пластинчатой структурой, приводит благодаря свободному взаимному перемещению пластинок этого вещества к уменьшению коэффициента трения, снижению износа и предотвращению повреждения поверхностей деталей. В свою очередь, наличие на поверхностях трения пластичной пленки, состоящей из сплава латуни с фосфором, способствует локализации деформационных процессов в тонком поверхностном слое самой пленки без отделения частиц основного материала.

Для улучшения антифрикционных свойств смазочных материалов в них предложено вводить углеродсодержащие ультрадисперсные добавки [235].

Модифицированию подвергали как пластичные, так и жидкие смазочные материалы. В качестве базовых пластичных смазочных материалов использовали смазки Литол-24 и ЦИА-ТИМ-201, которые смешивали с порошками ультрадисперсного алмазографита (УДПАГ) в количестве 0,5-2,5% масс. В качестве базовых жидких смазочных материалов использовали трансмиссионные, промышленные и моторные масла, в которые вводили порошок УДПАГ и ультрадисперсный порошок модифицированной технической сажи (УДП-МТС) с содержанием 1-2% масс.

Об эффективности использования модифицированных смазочных материалов свидетельствуют результаты их стендовых и эксплуатационных испытаний в подшипниковых узлах и зубчатых передачах трансмиссий и приводов подвижного транспорта. Так, использование Литола-24 с 1,5% добавкой УДПАГ приводит к снижению износа подшипников в 1,5-2,2 раза, а использование трансмиссионного масла ТМ-5-18 с 1% добавкой УДП-МТС приводит к увеличению передаваемого вращающего момента на 7-10% и снижению температуры смазочного материала на 14-17%.

Применение смазочной композиции на основе моторного масла М-10-В₂ с добавкой 0,5% масс. УДПАГ при обкатке дизельных двигателей марки ЯМЗ-238 (8 ч непрерывной работы) вызывает уменьшение износа в 1,5 раза. Кроме того, наблюдается уменьшение нагрева охлаждающей жидкости и более стабильная работа двигателя (вращение двигателя происходит с постоянной частотой, равной 950 мин⁻¹).

Применение смазочной композиции на основе индустриального масла ИСп-65 с добавкой 1% масс. УДП-МТС улучшает работу трехступенчатых редукторов, содержащих прямозубые цилиндрические передачи, в частности, обеспечивает повышение контактной выносливости на 45-50%, повышение передаваемого момента, оцениваемого по величине тока электродвигателя в установившемся режиме, на 8-12%, снижение уровня шума и вибраций на 20-40 %.

Установлено, что антифрикционные и противоизносные свойства масел, а также пластичных смазок улучшаются при их модифицировании алмазо-графитовыми и сажевыми наночастицами [235]. Аналогичное улучшение свойств масел наблюдается при их модифицировании углеродными нанотрубками [236].

Особым видом антифрикционных наноприсадок являются геомодификаторы – порошковые минерало-силикатные композиции на основе подвидов минерала серпентинита [237]. При введении мелкодисперсных порошков серпентина в смазочные материалы на поверхности трения деталей образуется упрочненный металлокерамический слой. Частицы порошка, попадая в узкие зазоры между поверхностями трения, проводят их микрошлифовку, сопровождающееся сильным нагревом поверхностей, которому способствует выделение внутренней энергии при разрушении серпентина. Из-за высоких температур микронеровности поверхностей трения размягчаются вплоть до их перехода в пластическое состояние. В размягченные слои внедряются твердые частицы минералов, образуется композиты типа «металл-минерал», т.е. металлокерамику. Это приводит к значительному улучшению триботехнических свойств смазок, снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

В последние годы разрабатываются наногеоомодификаторы, представляющие собой минерало-силикатные композиции в виде нанодисперсных порошков [190]. Попадая на поверхности трения вместе с маслом или в составе пластичной смазки, наногеоомодификаторы

инициируют формирование на трущихся поверхностях металлокерамической наноразмерной структуры с малым коэффициентом трения и высокой износостойкостью.

Металлоплакирующие наноприсадки

К металлоплакирующим наноприсадкам (нанореметаллизантам) относятся нанопорошковые металлоорганические соединения, которые реализуют трибохимический механизм металлоплакирования поверхностей трения вследствие образования на них металлосодержащей наноструктурированной защитной пленки с минимальными значениями коэффициента трения и интенсивности изнашивания [190, 218]. В качестве плакирующих металлов используются медь, свинец, олово, цинк, алюминий и др. [227, 238].

С помощью металлоплакирующих смазок восстанавливаются нано- и микродефекты поверхностей трения, обеспечивается частичное безразборное восстановление микроизносов подшипников качения и скольжения и других смазываемых поверхностей, повышение износостойкости деталей, сокращается продолжительность и повышается качество приработки поверхностей трения, повышается задиростойкость и снижается питтинг контактирующих поверхностей в тяжело нагруженных парах трения, понижаются температура работающих узлов, уровни шума и вибрации [190].

Наибольший эффект применения металлоплакирующих смазок достигается в условиях граничного трения, при высоких нагрузках и скоростях скольжения, повышении температуры трения, что характерно для изношенных трущихся соединений с большим сроком службы, при режимах приработки и перегрузках.

Особой разновидностью металлоплакирующих наноприсадок являются магнитные жидкости, которые находятся в узлах трения под действием магнитного поля [239]. Магнитные наночастицы, удерживаемые магнитным полем в зоне трения, заполняют микронеровности трущихся поверхностей, что приводит к значительному уменьшению износа поверхностей.

Приработочные наноприсадки

Приработкой называется процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материалов в начальный период трения, заключающийся в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания [219]. Приработку деталей проводят в ходе обкатки двигателей и элементов трансмиссии, обусловленной наличием дефектов изготовления и сборки деталей и узлов, приводящих к схватыванию и возможному появлению задира поверхностей трения, а также необходимостью выявления возможных скрытых дефектов изготовления. Обкатка осуществляется на стендах на машиностроительных и ремонтных предприятиях, а также в организациях-потребителях во время эксплуатации.

В состав многих приработочных присадок к смазочным маслам входят наноалмазы (алмазные наночастицы размером 4-6 нм) [190, 240, 241]. Они

структурируют масляную пленку, повышают ее динамическую прочность, действуют на кристаллическую решетку поверхности металла, упрочняя ее, формируют новые поверхности трения, снижая граничное трение и износ (особенно при больших нагрузках и дефиците смазочного материала). Благодаря этому сокращается длительность обкатки двигателей, улучшается качество трущихся соединений, экономятся топливо и масло, снижается количество вредных выбросов и облегчается запуск двигателей.

В зависимости от условий применения наноалмазы могут играть роль либо тонкого абразива, либо модификатора трения. Они способны оказывать структурирующее действие как на поверхности трения, внедряясь в поверхности деталей, армируя ее, так и на смазочный материал, изменяя его свойства. Находясь в смазочной среде в малых количествах (0,01-0,003 %), наноалмазы обеспечивают безабразивную приработку поверхностей трения деталей двигателей и трансмиссий, способствуя сокращению продолжительности и улучшению качества приработки. При этом приработка осуществляется не за счет скалывания и разрушения микрошероховатостей поверхностей, а в результате пластифицирования, деформирования (вдавливания) и наклепа микровыступов шероховатости поверхностей. Такая приработка позволяет повысить в 1,5-2 раза износостойкость и задиростойкость деталей двигателей, трансмиссии и рулевого управления; повысить до 2 раз межремонтный ресурс деталей; повысить до 5% мощность двигателя за счет увеличения компрессии и уменьшения потерь на трение; снизить на 5-10% расход топлива и смазочных материалов; уменьшить до 2 раз вредные выбросы в атмосферу; снизить температуру работающих узлов, уровень шума и вибрации, а также затраты на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт техники.

Интеллектуальные наноприсадки

К интеллектуальным наноприсадкам относятся такие наноприсадки, действие которых проявляется в так называемые критические периоды эксплуатации машин (пуск-остановка, приработка, перегрузка, перегрев и др.) [190]. При нормальной эксплуатации машин компоненты интеллектуальных наноприсадок находятся в зарезервированном состоянии и практически не срабатывают, что обусловлено наличием периода пассивации поверхностей трения, когда образовавшиеся на них защитные структуры останавливают дальнейшее взаимодействие и срабатывание активных комплексов присадок. Образующаяся в результате введения порошковых интеллектуальных наноприсадок в масло дисперсная система приобретает свойства самоорганизации, в результате чего становится возможной возникновение самопроизвольной структурной упорядоченности масла в виде взаимосвязанных молекулярных образований [190]. Эта упорядоченность возникает в процессе эксплуатации машин при достижении некоторых критических значений параметров в смазочной системе (температуры, давления, концентрации). Благодаря развитию интеллектуальных наноприсадок появляется новое поколение масел,

способных адаптироваться к различным условиям функционирования узлов трения.

5.6. Топливные наноматериалы

Основными видами топливных материалов для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) являются бензин и дизельное топливо. Для улучшения условий их использования в них вводят нанокатализаторы – нанодисперсные добавки, обладающие высокой каталитической активностью [219, 242, 243]. Наличие нанокатализаторов в бензине и дизтопливе существенно снижает образование загрязнений и отложений в системах подачи топлива, впускных и выпускных системах, в камерах сгорания, в каталитических нейтрализаторах отработавших газов и в целом способствует улучшению экологических, энергетических и ресурсных характеристик двигателей.

Свойства нанокатализаторов, используемых для сжигания топлива, определяются наноструктурными особенностями носителей и наноразмерностью частиц активных компонентов [243].

Каталитическое сжигание принципиально отличается от факельного: оно протекает без образования пламени на поверхности твердых катализаторов при сравнительно невысоких температурах (500–900 °С) и характеризуется отсутствием токсичных выбросов углеводородов, СО, NO_x; высокой эффективностью сжигания.

Основой нанокатализаторов являются нанопористые носители, на которые наносятся активные компоненты. Каталитические реакции протекают при взаимодействии молекул газообразных веществ на поверхности активного компонента, поэтому необходимо обеспечивать максимальную реакционную способность поверхности активного компонента в единице веса, что достигается в первую очередь увеличением удельной поверхности оксидного носителя и уменьшением размера индивидуальных частиц активного компонента. В качестве носителей используются оксиды алюминия, титана, кремния (с размерами пор до 40–60 нм), а также цеолиты (с размерами пор до 1 нм). Активными компонентами служат наночастицы благородных металлов, главным образом платины Pt, палладия Pd и родия Rh (размером 1–5 нм), а также оксидов переходных металлов – меди, хрома, марганца, кобальта и др. (размером 25–40 нм и менее). Благородные металлы более активны в реакциях окисления топлива, однако их использование ограничено высокой стоимостью и склонностью к дезактивации при высоких температурах.

Одним из эффективных путей снижения эмиссии вредных веществ с отработавшими газами ДВС является использование растворимых в моторном топливе производных мочевины вместе с наночастицами диоксида церия CeO₂ (размером 10–40 нм) [244]. Данная композиция добавляется непосредственно в моторное топливо любого типа и обеспечивает понижение температуры оптимального горения топливной смеси и дополнительный резерв кислорода для ее более полного сгорания. Кроме того, она способствует уменьшению образования отложений в камере сгорания и

выпускной системе, сокращению расхода топлива, снижению эмиссии вредных веществ с отработавшими газами.

На основе этой композиции разработан ряд других функциональных нанодобавок к бензину и дизельному топливу [242-244]:

- нанотюнинг топлива (добавка к бензину) – способствует увеличению мощности двигателя, снижению расхода топлива и токсичности выхлопа, очищает топливную систему и стабилизирует ее работу в целом;

- наночиститель инжекторов (добавка к бензину) – очищает систему подачи топлива от отложений и нагара, способствует удалению губчатых образований с впускных клапанов и нагара со стенок камеры сгорания; облегчает запуск двигателя, снижает износ и повышает защиту деталей от коррозии; снижает расход топлива и токсичность выхлопа;

- наночиститель каталитического нейтрализатора (добавка к бензину) – очищает нейтрализаторы выхлопных газов бензиновых двигателей, электроды кислородного датчика, способствует повышению приемистости двигателя, снижению расхода топлива и токсичности выхлопа, увеличению срока службы нейтрализатора;

- наночиститель форсунок (добавка к дизельному топливу) – обеспечивает очистку распылителей, топливной аппаратуры и стенок камеры сгорания от углеродистых отложений и нагара; облегчает запуск двигателя, способствует восстановлению распыла топлива и мощности дизеля, снижению износа, защите от коррозии, снижению расхода топлива и токсичности выхлопа.

Повышение эксплуатационных свойств топлива обеспечивается введением в него различных металлсодержащих добавок, причем их действие тем эффективнее, чем выше дисперсность частиц металла [190]. Это открывает большие перспективы в использовании в качестве добавок к топливу металлсодержащих наноматериалов.

ГЛАВА 6 АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

6.1. Аддитивные технологии и их роль в техническом сервисе: общая характеристика

Аддитивные технологии – это обобщенное название технологий изготовления трехмерных (3D) изделий по их компьютерным моделям путем последовательного (как правило, послойного) добавления (наращивания) материала [245-247]. Свое название (в буквальном переводе с английского – «добавляющие») они получили от английского слова «add» (добавлять) – в противоположность традиционным «вычитающим» технологиям, предусматривающим достижение требуемой формы изделия путем удаления («вычитания») материала с заготовки в результате ее механической, электроэрозионной и т.п. обработки. Сокращенно их принято называть АМ-технологиями (от англ. Additive Manufacturing – аддитивное производство) [245].

АМ-технологии начали интенсивно развиваться с конца 1980-х годов. Их развитию способствовало широкое распространение цифровых технологий в области проектирования, прежде всего, систем САД (Computer Aided Design) – программных пакетов, предназначенных для создания 3D-моделей [248].

Первоначально АМ-технологии называли технологиями быстрого прототипирования (англ. Rapid Prototyping), поскольку в основном они предназначались для создания прототипов (опытных образцов) изделий. В настоящее время технологии быстрого прототипирования рассматриваются как часть АМ-технологий, которые позволяют создавать не только прототипы изделий, но и готовые изделия.

Нередко АМ-технологии с учетом характерных особенностей процессов, лежащих в их основе, называют технологиями послойного синтеза. Имеется еще одно их популярное название – 3D-печать. Соответственно, устройства, с помощью которых они реализуются, называют 3D-принтерами.

Существуют разнообразные виды АМ-технологий, однако все они реализуются по общей схеме, которую можно представить в виде следующей последовательности операций (рис. 6.1) [249]:



Рис. 6.1. Схема реализации АМ-технологий

- построение 3D-модели изделия в САD-системе;
- экспорт 3D-модели в STL- файл;
- разделение 3D-модели на горизонтальные сечения (слои) с помощью специальной программы-слайсера;
- 3D-печать – послойный синтез натурального объекта (изделия) по данным САD-модели, считываемым 3D-принтером с STL-файла;
- финишная обработка полученного изделия.

Послойный синтез осуществляется путем последовательного нанесения материала слой за слоем снизу-вверх. Каждый наносимый слой по своему сечению совпадает с соответствующим слоем 3D-модели. В процессе нанесения смежные слои связываются между собой различными способами (спеканием, сплавлением, склеиванием, полимеризацией), так что в результате формируется цельное изделие.

С каждым годом АМ-технологии получают все большее распространение в различных областях человеческой деятельности, прежде всего, связанных с необходимостью быстрого изготовления изделий сложных форм, в частности, кастомизированной продукции, рассчитанной на удовлетворение конкретных требований потребителей [247, 250]. С их помощью медики создают протезы и имплантаты, строители – здания, модельеры – одежду и обувь. Они используются для производства детских игрушек, бытовой и канцелярской утвари, мебельной фурнитуры, ювелирных изделий, различных сувениров.

На сегодняшний день АМ-технологии наиболее широко применяются в машиностроении, в первую очередь в авиа- и автомобилестроении [245, 251]. Они позволяют создавать детали машин со сложным, криволинейным профилем, которые трудно изготовить обычной станочной обработкой: лопатки турбин, лопасти пропеллеров и шнеков, кулачки и т.п. Их используют для изготовления различной формообразующей оснастки (для литья, штамповки и т.д.).

Разновидности аддитивных технологий

На сегодняшний день известно несколько десятков разновидностей АМ-технологий, которые различаются не только особенностями процессов создания 3D-изделий, но также особенностями конструкции и функционирования 3D-принтеров. Кроме того, они, как правило, различаются своими фирменными названиями.

Например, известны несколько фирменных названий АМ-технологии, в основе которой лежит процесс связывания частиц послойно наносимого порошка с помощью капель связующего:

- Three Dimensional Printing, 3DP (Z Corporation, США)
- Binder jetting, BJ (3D Systems, США)
- Ink-Jet (ExOne, США; 3D Systems, США; Voxeljet, Германия) [245].

Аналогично, известны несколько фирменных названий АМ-технологии, в основе которой лежит процесс подачи исходного порошка непосредственно в зону лазерного плавления:

- Laser Engineered Net Shaping, LENS (Sandia National Laboratories & Sandia University, USA);
- Direct Metal Deposition, DMD (Michigan University, USA);
- Direct Metal Transfer, DMT (InssTek, Южная Корея);
- 3D Laser Cladding (Liverpool University, UK);
- 3D Laser Welding (Southern Methodist University, USA);
- 3D Laser generating (Fraunhofer-Institute of Production Technology (IPT), Germany) [252].

АМ-технологии классифицируют по различным признакам [245]. Важнейшими из них являются:

- виды исходных материалов, используемых для построения изделий;
- методы нанесения слоев исходного материала;
- виды превращений исходного материала в процессе нанесения слоев, приводящие к формированию структуры изделия.

В качестве основных исходных материалов служат полимеры, металлы и неорганические материалы (гипс, песок, керамика), которые могут использоваться как индивидуально, так и в сочетаниях друг с другом. Некоторые из них являются жидкостями (жидкие фотополимеры), но большинство их находится в твердом состоянии – в виде порошков (термопластики, металлы, гипс, песок, керамика и др.), волокон, проволок или прутков (термопластики, металлы), листов (термопластики, металлы, бумага и др.). Также в качестве дополнительных компонентов используются различные связующие, служащие для связывания (склеивания) основных материалов.

Различают два основных метода нанесения слоев исходного материала (соответственно, два типа АМ-технологий), которые имеют следующие англоязычные названия: «Bed Deposition» и «Direct Deposition».

Согласно АМ-технологиям типа Bed Deposition исходный материал наносят на какую-либо платформу сплошным слоем, затем его в этом слое подвергают селективной обработке (с помощью локально-избирательных воздействий), в результате чего он изменяет свое первоначальное состояние (структуру, свойства), т.е. претерпевает определенные превращения, формируя слоистый фрагмент создаваемого изделия. При этом остальная (необработанная) часть исходного материала остается неизменной. Далее процесс повторяется, на сформировавшийся первый слоистый фрагмент наращивают очередные фрагменты до тех пор, пока не завершится создание всего изделия.

Согласно АМ-технологиям типа Direct Deposition исходный материал непосредственно осаждают последовательными слоями. При этом сначала на платформу в конкретных местах наносят первый слой, затем на него наращивают очередные слои. В процессе осаждения материал изменяет свое первоначальное состояние (подобно тому, как это имеет место в случае Bed Deposition), в результате чего формируются слоистые фрагменты создаваемого изделия.

Исходные материалы в процессе нанесения слоев и формирования структуры изделия подвергаются следующим превращениям [253]:

- фотополимеризация (отверждение жидких фотополимеров);
- размягчение (перевод в жидкое/полужидкое состояние) и последующее отверждение термопластичных полимеров.
- спекание или переплавка порошков;
- связывание (склеивание) порошков или листовых материалов связующими компонентами;

Ниже кратко рассмотрены некоторые основные виды АМ-технологий, получившие сравнительно широкое распространение.

SLA, Stereolithography Apparatus – слой жидкого фотополимера, образованный над платформой, погруженной в залитый фотополимером бак, селективно затвердевает под действием луча ультрафиолетового лазера, сканирующего поверхность слоя, в результате чего создается первый слоистый элемент изделия; затем платформа погружается в бак, так что над этим элементом образуется новый слой жидкого фотополимера, который также селективно затвердевает, и т.д. до полного построения изделия (рис. 6.2 [254]).

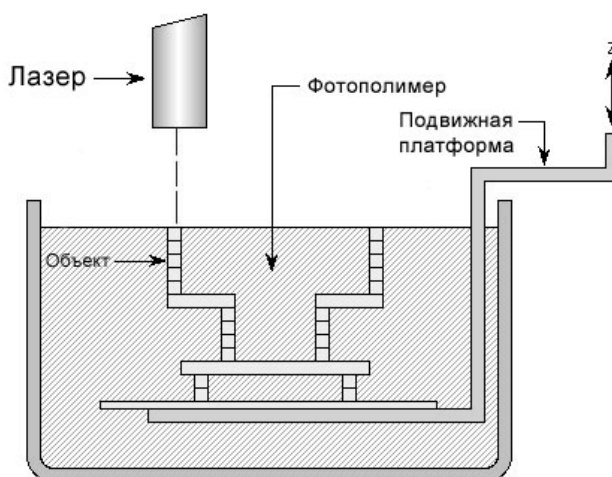


Рис. 6.2. Схема SLA-процесса

SGC, Solid Ground Curing – процесс осуществляется по аналогии с SLA, отличие состоит в том, что фотополимер затвердевает под действием потока излучения ультрафиолетовой лампы, проходящего через маску (фотошаблон) (рис. 6.3 [255]).

DLP, Digital Light Processing – процесс осуществляется по аналогии с SLA, отличие состоит в том, что фотополимер затвердевает под действием потока излучения, сформированного матрицей точечных источников ультрафиолетового света (цифровым светодиодным проектором) (рис. 6.4 [256]).

3DP, Three Dimensional Printing – порошок металла, полимера, стекла или др. материала наносится послойно на платформу, на каждый слой с помощью струйной головки селективно каплями подается связующее, которое

связывает (склеивает) частицы порошка между собой и с предыдущими слоями (рис. 6.5 [257]).

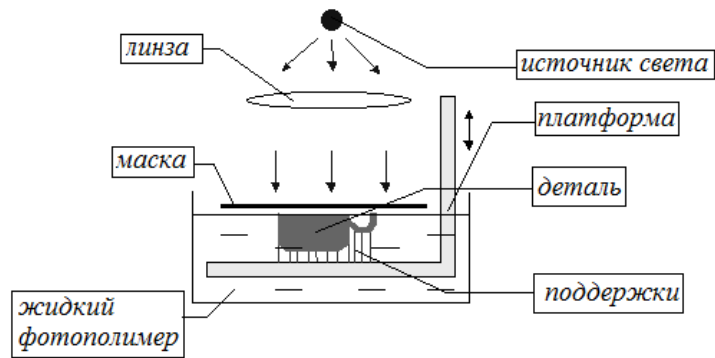


Рис. 6.3. Схема SGC-процесса



Рис. 6.4. Схема DLP-процесса

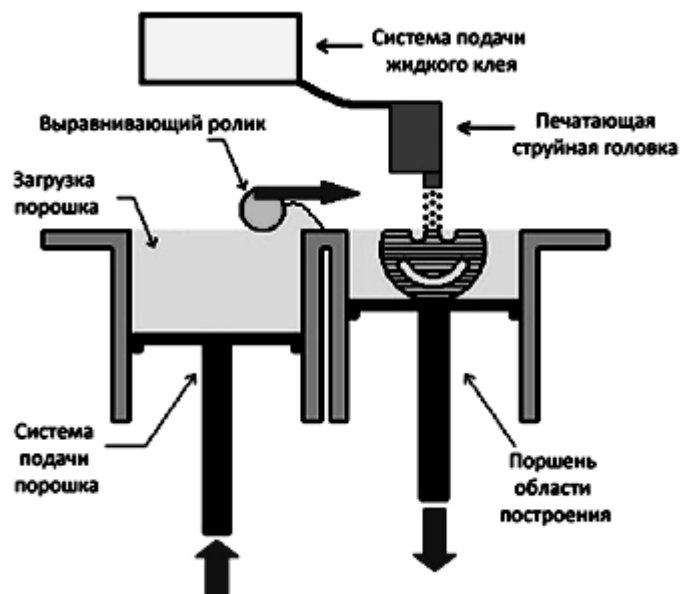


Рис. 6.5. Схема 3DP-процесса

MJM, Multi-Jet Modeling – жидкий фотополимер или нагретый до полужидкого состояния термопластичный полимер подается каплями через многосопловую головку непосредственно в место построения изделия, где он затвердевает под действием излучения ультрафиолетовой лампы или в результате охлаждения.

FDM, Fused Deposition Modeling – волокно из термопластичного полимера, нагретое до полужидкого состояния, подается послойно непосредственно в место построения изделия, где нанесенные слои соединяются между собой и затвердевают в результате охлаждения (рис. 6.6 [258]).

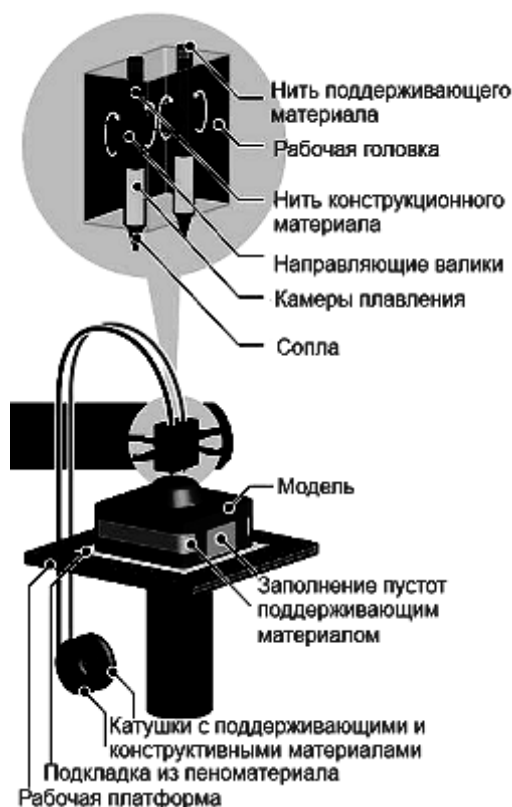


Рис. 6.6. Схема FDM-процесса

MJS, Multiphase Jet Solidification – процесс осуществляется по аналогии с FDM, отличие состоит в том, что в место построения изделия подается пастообразная смесь металлического порошка и связующего (пластификатора), которая выдавливается через подогреваемый экструдер.

SLS, Selective Laser Sintering – металлический или полимерный порошок наносится послойно на платформу, каждый слой подвергается селективному спеканию лазерным лучом, сканирующим поверхность слоя (рис. 6.7 [259]).

SHS, Selective Heating Sintering – процесс осуществляется по аналогии с SLS, отличие состоит в том, что порошки спекаются не с помощью лазера, а с помощью теплового излучателя (тепловой печатающей головки).

SLM, Selective Laser Melting – процесс осуществляется по аналогии с SLS, отличие состоит в том, что металлический порошок под действием лазерного луча подвергается не спеканию, а переплавке.

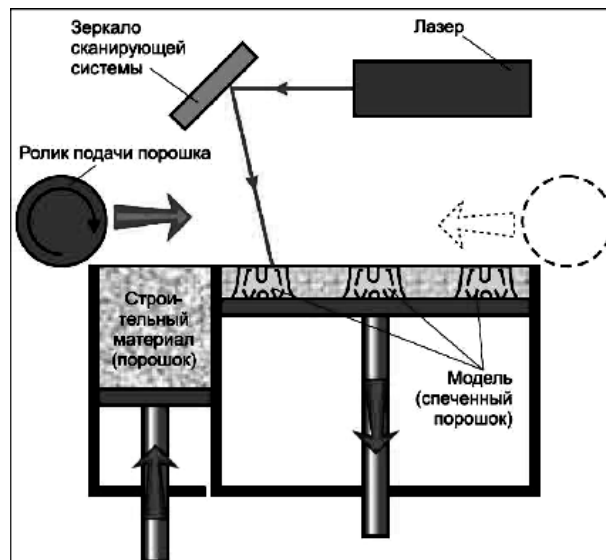


Рис. 6.7. Схема SLS-процесса

LMD, Laser Metal Deposition – металлический порошок или проволока подается непосредственно в место построения изделия и подвергается лазерной послойной наплавке (рис. 6.8 [260]).

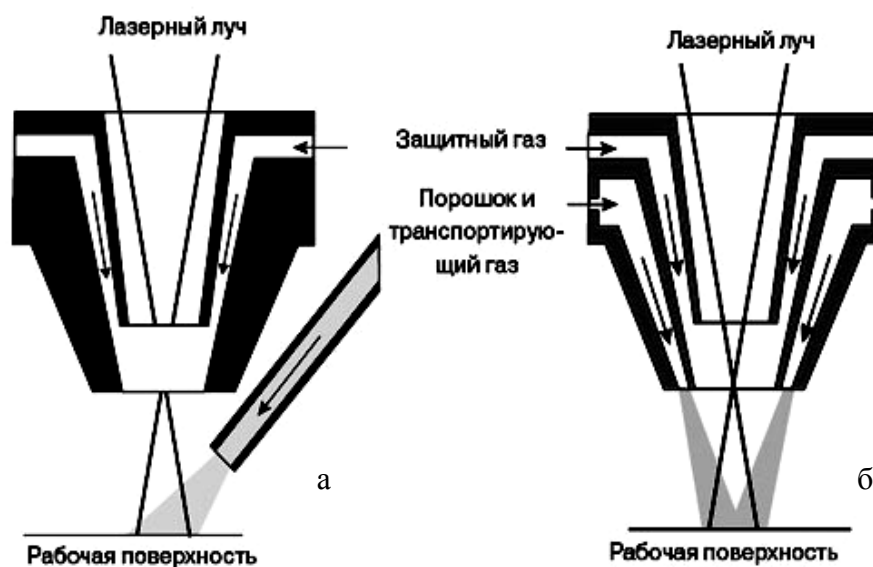


Рис. 6.8. Схемы LMD-процесса с боковой (а) и коаксиальной (б) подачей порошка

LENS, Laser Engineered Net Shape – процесс осуществляется по аналогии с LMD, отличие состоит в том, что в зону лазерного плавления может подаваться не один вид, а два или более видов металлических порошков, в результате создаются изделия с градиентным составом .

EBM, Electron Beam Melting – процесс осуществляется по аналогии с SLM, отличие состоит в том, что металлический порошок подвергается переплавке под действием не лазерного, а электронного луча (в вакуумной камере) (рис. 6.9 [261]).

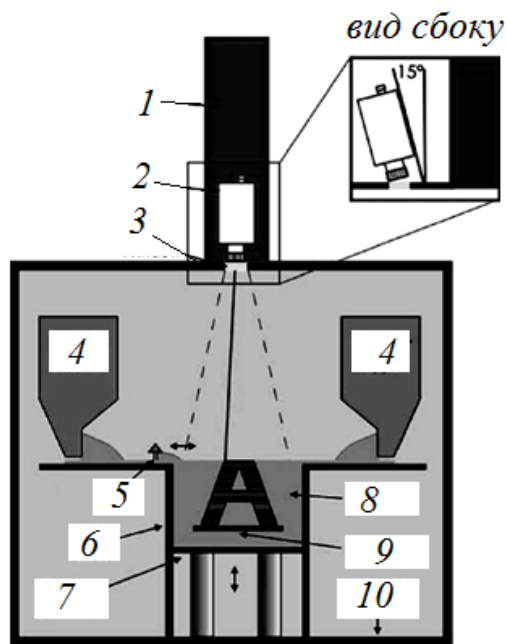


Рис. 6.9. Схема EBM-процесса

1 – электронно-лучевая пушка, 2 – ИК-камера, 3 – ZnSe-окно, 4 – бункер для порошка, 5 – ракель, 6 – строительная емкость, 7 – строительная платформа, 8 – порошок, 9 – стартовая пластина, 10 – вакуумная камера

EBFz, Electron Beam Freeform Fabrication – процесс осуществляется по аналогии с EBM, отличие состоит в том, что металл подается в зону электронно-лучевого плавления в виде проволоки, а не порошка (рис. 6.10 [262]).

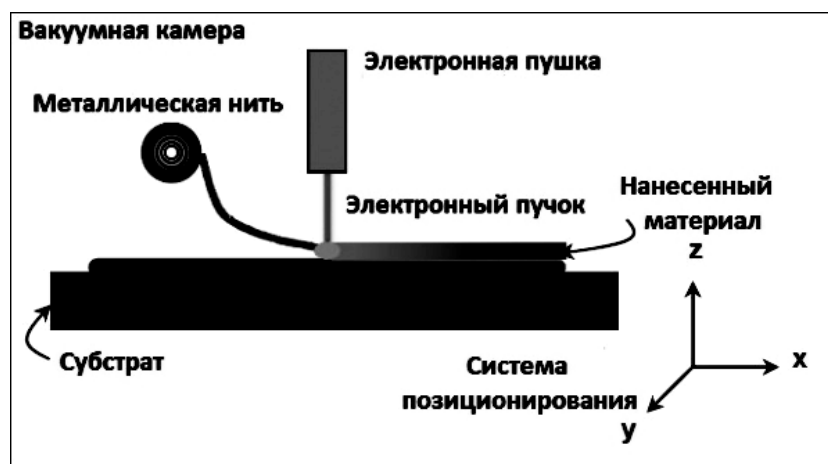


Рис. 6.10. Схема EBFz-процесса

IFF, Ion Fusion Formation – процесс осуществляется по аналогии с EBM, отличие состоит в том, что в качестве источника энергии для плавления используется плазматрон, ионизирующий инертный газ и генерирующий поток плазмы [263].

LOM, Laminated Object Manufacturing – листовые выкройки из бумаги, пластика, металла или др. материалов, полученные путем контурного раскроя исходных листов лазером или лезвийным инструментом, последовательно налагаются друг на друга и связываются между собой с помощью адгезива, сваркой, пайкой или механическим креплением (рис. 6.11 [264]).

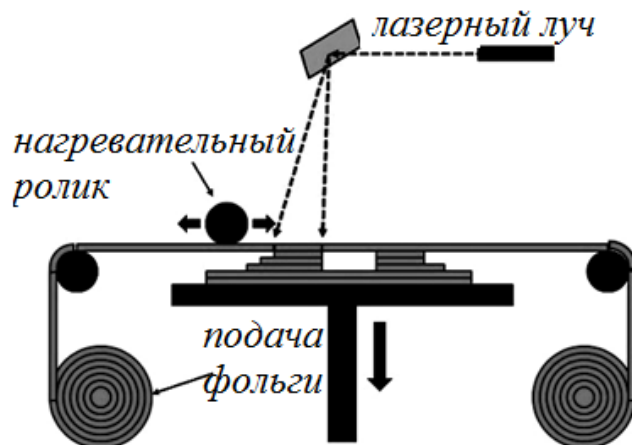


Рис. 6.11. Схема LOM-процесса

Достоинства и недостатки аддитивных технологий

Уникальные возможности АМ-технологий быстро создавать детали сложной формы непосредственно по их компьютерным 3D-моделям обеспечивают им следующие преимущества по сравнению с традиционными технологиями машиностроительного производства (литье, обработка давлением и резанием и др.) [247, 265-267]:

- повышение производительности и снижение стоимости производства деталей благодаря сокращению сроков технологической подготовки производства, уменьшению количества технологических операций, высокой автоматизации технологического процесса, отсутствию необходимости в специализированной инструментальной оснастке, снижению энергозатрат;
- возможность и экономическая целесообразность организации мелкосерийного производства;
- внесение оперативных изменений в конструкцию изделий на этапе производства;
- гибкое перепрофилирование одного и того же технологического оборудования под производство различных видов деталей, в том числе с различной формой и из различных материалов;
- создание деталей с улучшенными эксплуатационными характеристиками, что позволяет увеличивать срок их службы, в том числе в особых условиях эксплуатации;
- сокращение комплектующих частей создаваемых узлов машин за счет изготовления деталей более сложной формы и с более широкими функциональными свойствами;

- сокращение потерь материалов, возможность вторичного использования их излишков.

Важным преимуществом АМ-технологий является возможность практически мгновенно передавать 3D-модели в любую точку мира, что позволяет организовать глобальную сеть гибких локальных производств [265, 268].

Вместе с тем АМ-технологии имеют ряд недостатков [250, 265, 269]:

- ограниченный выбор используемых материалов;
- недостаточно высокая скорость изготовления деталей в силу послойного характера их построения;
- недостаточно высокая точность изготовления и качество поверхности деталей (как правило, детали, полученные с помощью АМ-технологий, требуют последующей механической обработки);
- различия в геометрических характеристиках и функциональных свойствах одних и тех же деталей, изготовленных на разных 3D-принтерах;
- закрытая архитектура большинства 3D-принтеров, что ограничивает возможности варьирования условий реализации АМ-технологий.

Существенным фактором, сдерживающим широкое распространение АМ-технологий, является высокая стоимость 3D-принтеров, а также используемых материалов (АМ-технологии требуют специальных форматов материалов (порошковых, волоконных, листовых и т.п.), которые могут быть гораздо дороже традиционных).

Приоритетные направления развития АМ-технологий связаны с совершенствованием систем автоматизированного проектирования; 3D-принтеров (в том числе на основе использования интеллектуальных систем управления) и АМ-процессов (в том числе на основе использования композиционных, градиентных, наноструктурных, биоразлагаемых и др. эффективных материалов) [247].

Примером успешного применения АМ-технологий может служить опыт компания Daimler AG (Германия), которая заменила этими технологиями дорогостоящие и длительные процессы литья в кокиль и в песчаные формы, использовавшиеся для изготовления крупных металлических деталей автомобилей, что позволило оптимизировать геометрию деталей и снизить их вес [264]. Еще один пример успешного применения АМ-технологий продемонстрировала компания Local Motors (США), которая в 2014 г. с помощью 3D-печати изготовила всего за шесть дней первый пригодный для эксплуатации автомобиль – двухместный электрокар [270]. Большинство деталей для него были созданы из ABS-пластика, усиленного карбоновыми волокнами (исключение составляли источник питания, электромотор, электропроводка и некоторые другие специальные детали).

Гибридные технологии

Не следует полагать, что АМ-технологии смогут полностью заменить традиционные технологии металлообработки, они, скорее, будут дополнять их [268]. В последние годы получил развитие гибридный подход, согласно

которому на одном и том же оборудовании выполняется и 3D-печать, и обычная обработка резанием [271]. При этом изделие создается по АМ-технологии, после чего мелкие элементы формируются резанием. Так, крупнейшие компании-производители станков начали создавать гибридные обрабатывающие центры, в которых совмещаются функциональные возможности станка с ЧПУ для металлообработки и установки для лазерной наплавки. Компания Okuma (Япония) разработала серию станков LASER EX, в которых традиционные технологии обработки (фрезерование, точение, шлифование, сверление, зубообработка) дополнены лазерной АМ-технологией [272]. Компания Mitsubishi (Япония) выпускает 3D-принтер LUMEX Avance-25, который объединяет возможности SLS-технологии и фрезерования: он расплавляет металлический порошок лазером и спекает его, одновременно обрабатывая поверхности фрезой, в результате создаются металлические детали сложной формы [273]. Еще один подобный пример – машина Lasertec 65, выпускаемая компанией DMG MORI (Германия) [274].

Рис. 6.12 демонстрирует функциональные возможности гибридного обрабатывающего центра, созданного фирмой ИРЭ-Полюс (Россия) на базе металлообрабатывающего станка с ЧПУ путем его дооснащения лазерным устройством [274].



Рис. 6.12. Селективная послойная наплавка с одновременной механической обработкой

В настоящее время практически все авиастроительные компании индустриально развитых стран имеют в арсенале своего опытного производства десятки АМ-машин, которые используются в единой технологической цепи производства автомобилей [275].

Примером успешного применения гибридного подхода в производстве является деятельность литейного завода ASTech (Германия) [276]. Завод оснащен передовым технологическим оборудованием, включая металлообрабатывающие станки с ЧПУ, плавильное, литейное и термическое оборудование, измерительную технику, и, кроме того, были АМ-машины для создания песчаных форм (от немецкой компании EOS).

Клиентами завода являются многочисленные автомобильные и авиационные фирмы разных стран мира. Для того чтобы изготовить необходимое изделие, заказчику достаточно передать 3D-файл этого изделия и описать требования к его изготовлению (используемый материал, количество экземпляров). Сроки выполнения заказа от 7 дней до 8 недель – в зависимости от того, что будет изготовлено: отливка или полностью обработанная деталь. Анализ работы завода показывает, что около 20% заказов – единичные детали, около 40% – заказы на 2-5 деталей; почти половина производимых отливок из чугуна, около трети – из алюминия, остальное – сталь и другие сплавы.

Аддитивные технологии в техническом сервисе

АМ-технологии позволяют существенным образом повысить эффективность ремонтного производства. Их применяют как для изготовления новых деталей взамен вышедшим из строя деталям, так и для восстановления вышедших из строя деталей.

Анализ современных тенденций развития ремонтного производства показывает, что восстанавливать детали часто более выгодно, чем заменять их новыми [277]. Изношенные металлические поверхности обычно восстанавливают, используя технологии наплавки или газотермического напыления, которые по ряду показателей уступают АМ-технологиям [277, 278]. Так, получившая большое распространение плазменная наплавка позволяет наносить слои толщиной до 5 мм, обеспечивая при этом повышение усталостной прочности до 90% от прочности новой детали. Однако применение наплавки ограничено формой деталей, подлежащих восстановлению (обычно это тела вращения), кроме того, наплавленные слои с увеличением толщины проявляют склонность к трещинообразованию. Для восстановления деталей более эффективно использовать SLS/SLM-технологии, которые позволяют с высокой точностью формировать необходимое количество слоев, исключая необходимость в черновой механической обработке [277].

С помощью АМ-технологий можно успешно решать задачи обеспечения требуемых запасов деталей, идущих на ремонтные нужды [263]. Недостаток запасных деталей приводит к длительным сверхплановым простоям машин в ремонте. На ремонтных предприятиях требуемые запасы деталей обеспечиваются за счет ремонта дефектных деталей (восстановления их изношенных поверхностей) либо за счет приобретения новых деталей, которыми заменяют дефектные детали, если их ремонт невозможен или экономически нецелесообразен, а также детали, выработавшие свой ресурс. Однако приобретение новых деталей нередко оказывается весьма затруднительным. В частности, стоимость приобретаемых запчастей может быть чрезмерно высокой, а сроки их поставки – чрезмерно длительными (такие ситуации являются типичными в случаях приобретения импортных запчастей). Кроме того, нередко требуемая для ремонта деталь продается в

комплекте (в сборке) с другими элементами конструкции, причем стоимость комплекта гораздо выше стоимости детали [279].

Приобретение новых деталей становится особенно трудным, а порой невозможным, если приходится ремонтировать устаревшие образцы техники, которые уже сняты с производства.

Анализ работы ремонтных предприятий [280] показывает, что затраты на закупку запчастей могут быть довольно значительными, если учесть, что кроме выполнения большой программы планового ремонта приходится выполнять многочисленные неплановые ремонты. В условиях большого оборота запасных частей со склада в ремонтные цеха затрудняется контроль прохождения деталей, поступающих в ремонт со склада и находящихся в ремонте в цехах и, кроме того, не прослеживается должным образом взаимосвязь поставляемых деталей и ремонтируемых узлов, что может приводить либо к сверхнормативным запасам деталей и узлов, либо, наоборот, к их нехватке.

Используя АМ-технологии, ремонтные предприятия могут создавать собственные склады запасных деталей. Изготовление запасных деталей может быть организовано на базе механических цехов ремонтные предприятия, оснащенных необходимым оборудованием и материалами для 3D-печати. Применение АМ-технологий на ремонтных предприятиях позволяет существенно сократить расходы на покупку запасных деталей, исключить вероятность сверхнормативного простоя машин в ремонте по причине нехватки запасных частей и ускорить выпуск машин с неплановых ремонтов, упростить инфраструктуру материально-технического обеспечения [251, 278, 280]. Анализ практики технического сервиса в России показывает, что из-за постоянного роста затраты на техническое обслуживание и ремонт простой машин, вызванные утратой работоспособности деталей из-за поломки, износа или повреждения, вызывают значительные финансовые потери предприятий, эксплуатирующих эти машины, вследствие упущенной прибыли, размеры которой могут быть соизмеримы со стоимостью новой машины [275]. При этом главной причиной столь финансовых потерь предприятия из-за отказа машины является длительное время ожидания поступления запасных частей, достигающее 2-3 месяцев.

Ремонтные предприятия также могут пользоваться услугами специализированных фирм, изготавливающих детали на основе АМ-технологий. Для получения требуемой детали ремонтному предприятию достаточно переслать ее 3D-модель в одну из таких фирм. При этом существенно упрощается логистика и сокращается время поставки деталей, что в итоге приводит к ускорению ремонта и уменьшению объемов складских запасов [265].

В настоящее время интенсивно разрабатываются планы развития локальных ремонтных производств с использованием АМ-технологий в военной сфере, в частности, изучаются возможности создания таких производств непосредственно на борту авианосцев [251]. Дело в том, что

значительную часть объема современного авианосца составляют складские помещения, в которых хранятся многочисленные запчасти, необходимые для выполнения возможных ремонтных работ. Поэтому специалисты военно-морских сил заинтересованы в том, чтобы существенно сокращать запасы складированных на борту деталей, а вместо них размещать 3D-принтеры, способные работать на сырье, которое либо специально доставляется борт, либо создается на борту путем переработки пластмассовых отходов (использованной тары, посуды и т.п.).

Об эффективности проведения таких ремонтных работ свидетельствует случай, произошедший в 2014 г. со штурмовиком AV-8B Harrier ВВС США, который совершил экстренную посадку на палубу авианосца Bataan [267, 280]. На нем потребовалось срочно заменить вышедшие из строя детали передней стойки шасси. В короткий срок специалисты базы морской пехоты в Северной Каролине совместно с техниками авианосца заменили неисправные детали новыми, изготовленными с помощью AM-технологий [267, 281]. С помощью 3D-принтеров перспективно создавать в полевых условиях самые разнообразные детали военной техники: поддерживающие стойки внешних элементов корпуса, лонжероны и др. элементы самолетов, компоненты антенно-фидерных трактов радиотехнических устройств, комплектующие для беспилотных летательных аппаратов, в том числе микропланов, и т.д. [251, 267, 268].

В последние годы повысился интерес к использованию 3D-принтеров для проведения ремонтных работ в космосе. Поскольку практически невозможно оперативно поставлять на космические станции или хранить на них в больших количествах запчасти и инструменты, то приобретает особую важность решение задач по их созданию непосредственно на борту станций, особенно в дальних космических экспедициях, когда возможности каких-либо поставок с Земли будут вообще исключены. В 2014 и 2016 г.г. на Международную космическую станцию (МКС) были доставлены 3D-принтеры, с помощью которых космонавты могут печатать различные им детали из пластика в условиях невесомости [282, 283]. Один из таких 3D-принтеров показан на рис. 6.13 [275]. Теперь достаточно передать компьютерную 3D-модель необходимой детали на МКС, например, в случае поломки, и она будет создана на принтере, не дожидаясь ее поставки с Земли. В 2018 г. планируется отправить на МКС 3D-принтер, который может использовать в качестве сырья переработанный им же мусор [284].

Предполагается, что в дальнейшем 3D-принтеры будут широко применяться при освоении космоса, в том числе, во время миссий на Луну и Марс. Благодаря 3D-принтерам в космосе можно будет создавать устройства, которые довольно сложно транспортировать с Земли, например, огромные по размерам антенны, которые будут предоставлять широкополосный Интернет всему миру [283].

В последние годы рассматриваются идеи по строительству космической базы на Луне с помощью мобильного 3D-принтера, в котором в качестве сырья будет использоваться лунная пыль (реголит) [285].

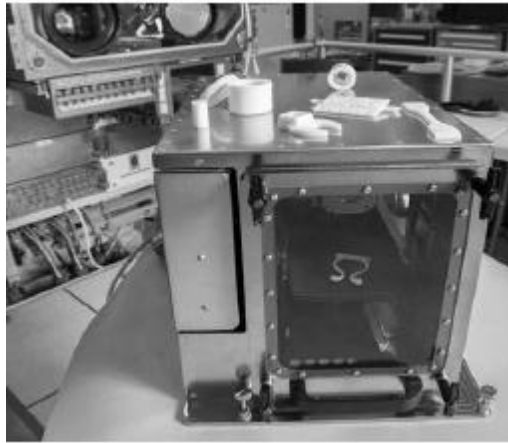


Рис. 6.13. 3-D принтер, размещенный на Международной космической станции

Таким образом, применение АМ-технологий в ремонтном производстве может привести к кардинальному изменению принципов организации всей работы ремонтных предприятий.

Для реализации ремонтного производства на основе применения АМ-технологий необходимо решить три первоочередные задачи:

- 1) определить перечень деталей, лимитирующих надежность машины, оценить эксплуатационные свойства этих деталей;
- 2) обосновать структуру и эксплуатационные свойства материала для изготовления запчастей взамен деталей, утратившей работоспособность;
- 3) разработать технически и экономически обоснованный вариант АМ-технологии изготовления запчастей в условиях эксплуатации и подобрать необходимое технологическое оборудование [275].

6.2. Аддитивные технологии изготовления деталей

Изготовление деталей с помощью АМ-технологий может быть прямым и косвенным. Прямое изготовление предполагает, что готовая деталь получается непосредственно в результате реализации АМ-технологии. В свою очередь, косвенное изготовление предполагает, что сначала в результате реализации АМ-технологии создается формообразующая оснастка, с помощью которой затем получают готовую деталь, используя другие известные технологии.

6.2.1. Прямое изготовление деталей

Металлические детали

В промышленности в основном применяются две группы АМ-технологий, позволяющих печатать металлами:

1. технологии, в которых металлические порошки селективно связываются склеивающим веществом (при этом полученные изделия подвергаются дополнительному обжигу)

2. технологии, где металлические порошки подвергаются селективному спеканию или сплавлению лазерным или электронным лучом [286].

С их помощью можно получать изделия из различных металлов: нержавеющей стали, бронзы, титановых, никелевых и алюминиевых сплавов, сверхпрочного сплава кобальт-молибден-хром и др. Изделия, создаваемые по технологиям 1-й группы, характеризуются сравнительно большой пористостью и, соответственно, малой прочностью, поэтому эти технологии имеют ограниченное распространение. Гораздо более широко используются технологии 2-й группы, прежде всего, те, в которых металлические порошки подвергаются сплавлению, поскольку в этом случае получаемые изделия обладают плотной и прочной структурой. Однако стоимость, оборудования, с помощью которого реализуются технологии 2-й группы, весьма высокая.

Различают два вида АМ-технологий, основанных на лазерном спекании металлических порошков: DMLS, Direct Metal Laser Sintering – прямое лазерное спекание металлов и IMLS, Indirect Metal Laser Sintering – не прямое лазерное спекание металлов [287].

В DMLS-технологии лазерному спеканию подвергаются либо однородные по составу металлические порошки, либо смеси металлических порошков с разными температурами плавления. В первом случае обеспечивается частичная (поверхностная) плавка частиц порошка, необходимая для спекания, в то время как во втором случае спекание происходит за счет плавления легкоплавкого компонента порошковой смеси. На рис. 6.14 [288] показан типичный пример металлического изделия, созданного по DMLS-технологии.



Рис. 6.14. Деталь турбины, созданная по DMLS-технологии

В IMLS-технологии используют смесь порошков металла и полимера или порошок металла, частицы которого покрыты полимером, где полимер играет роль связки на стадии первичного формирования изделия, после чего оно подвергается термообработке, в ходе которой полимер удаляется, а образовавшийся пористый металлический каркас дополнительно спекается и пропитывается металлом-связкой.

Как отмечалось выше, наибольшее распространение в промышленности получили АМ-технологии, основанные на селективном лазерном сплавлении

металлических порошков, т.е. SLM-технологии. С помощью этих технологий можно быстро изготавливать сложные по геометрии металлические изделия, которые по своим качествам превосходят литейное и прокатное производство [289]. Так, компания General Electric (США) приступила к массовому производству топливных форсунок для турбовинтовых двигателей с помощью DMLS-технологии с использованием кобальтохромового порошка [290]. В процессе лазерного плавления металлического порошка важно обеспечивать регулирование мощности лазера. Чем больше мощность лазера, тем быстрее расплавляется металл и тем быстрее строится деталь. С другой стороны, поскольку в точечную зону лазерного воздействия подводится большое количество энергии, процесс плавления частиц металла идет очень интенсивно и нередко имеет взрывной, трудно контролируемый характер, что приводит к значительному снижению качества создаваемых изделий. При этом становится весьма затруднительным построение сложных тонкостенных элементов изделий.

Для решения этой проблемы разработано АМ-оборудование, в котором порошок обрабатывается с помощью двух лазеров. Примером тому является установка SLM 500HL компании SLM Solutions (Германия) [245]. В ней основной нагрев металла осуществляется более мощным лазером, в то время как менее мощный лазер непосредственной формирует внешний контур детали, а также тонкие стенки. Благодаря этому удается создавать детали с толщиной отдельных фрагментов до 0,3 мм (рис. 6.15), кроме того, увеличивается в несколько раз скорость построения детали, улучшается внутренняя структура и чистота внешней поверхности (Ra 5-10).

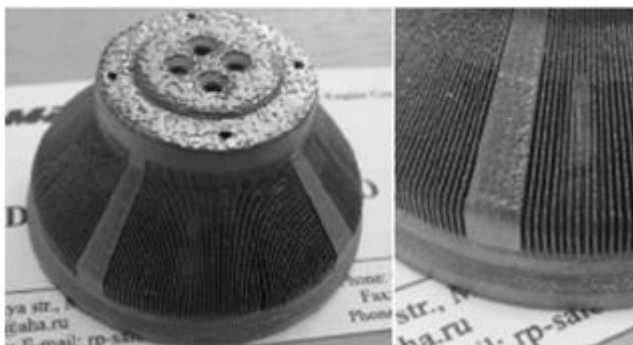


Рис. 6.15. Деталь, созданная по SLM-технологии. Толщина рёбер 0,35 мм

На рис. 6.16 показаны в качестве примера последовательные стадии построения металлического изделия по SLM-технологии [291].

О достоинствах SLM-технологий свидетельствует опыт деятельности компании SiemensAG (Германия), которая активно применяет эти технологии для производства высокоэффективных металлических изделий [292]. Одним из примеров таких изделий – горелки для сверхмощной газовой турбины, успешно эксплуатируемой на электростанции в Брно (Чехия).

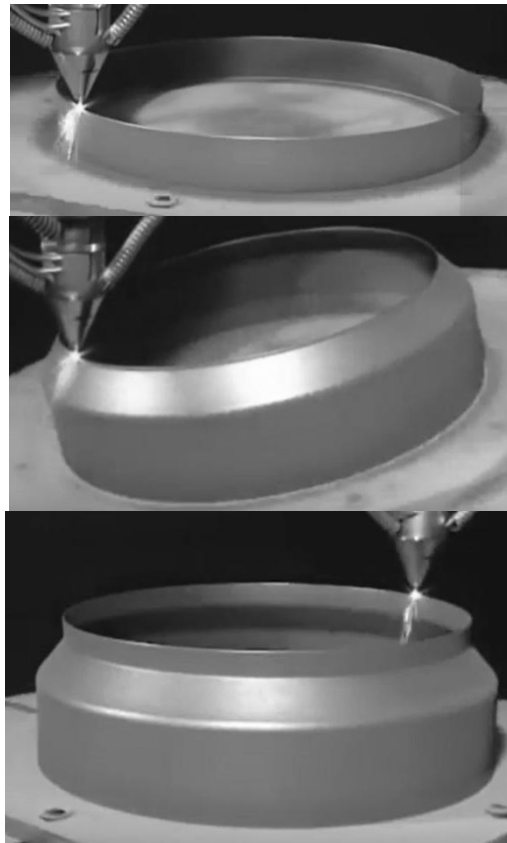


Рис. 6.16. Последовательные стадии изготовления металлической детали по SLM-технологии

Другой пример – лопатки, установленные в промышленной газовой турбине. Эти лопатки изготовлены из сплава на основе никеля и способны выдерживать высокие давления, экстремальные температуры и центробежные силы, возникающие во время работы турбины (рис. 6.17) [293]. Их конструкция имела внутреннюю систему охлаждения сложной геометрии.



Рис. 6.17. Лопатка газовой турбины, созданная по SLM-технологии

К числу AM-технологий, позволяющих печатать металлами, относятся технологии, основанные на экструзии легкоплавких металлов, например,

свинца или олова (эти технологии также позволяют работать и с пластиками) [286]. Однако изделия из таких металлов обладают низкой прочностью.

В одном из вариантов АМ-технологии, основанной на экструзии волокон, предлагается использовать волокна, состоящие из стального порошка (80% вес.) и полимерного связующего (рис. 6.18) [294]. В ходе экструзии создается изделие из металлополимерного композита. При последующей термообработке изделия полимер удаляется, а образовавшийся пористый металлический каркас дополнительно спекается (по аналогии с IMLS-технологией).

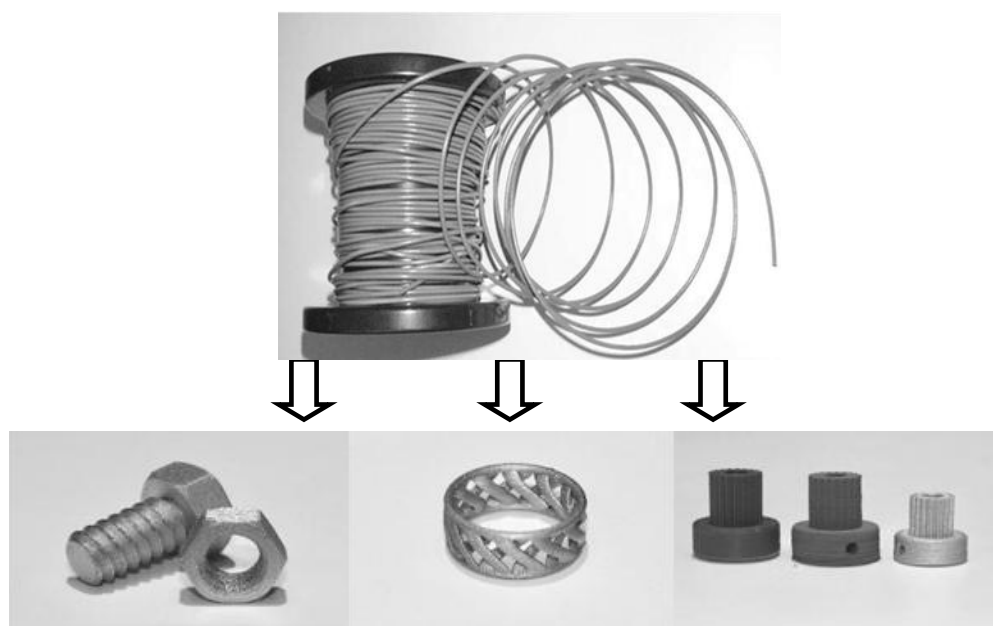


Рис. 6.18. Детали, изготовленные по АМ-технологии, основанной на экструзии металлополимерных волокон

Печатать металлические изделия также позволяет один из вариантов LOM-технологии, в котором для построения изделий используется тонкая алюминиевая фольга, она вырезается по контуру слой за слоем и затем слои соединяются с помощью ультразвуковых воздействий [295].

Пластмассовые детали

В промышленном оборудовании, а также в бытовых устройствах металлические детали активно заменяются пластмассовыми аналогами, многие из которых: шестерни, валы, шкивы, защелки, заглушки, корпуса, разъемы и т.д. можно весьма эффективно изготавливать с помощью АМ-технологий [179, 296, 297]. На рис. 6.19 показаны в качестве примера пластмассовые детали стеклоочистителя заднего стекла автомобиля, созданные из полиамида с использованием SLS-технологии [298].

Для создания деталей ответственной конструкции служат технологии 3D-печати термостойких пластиков [299]. Наиболее подходящими для таких целей являются пластики типа PPSF и ULTEM, из которых изготавливаются детали, применяемые аэрокосмической отрасли.

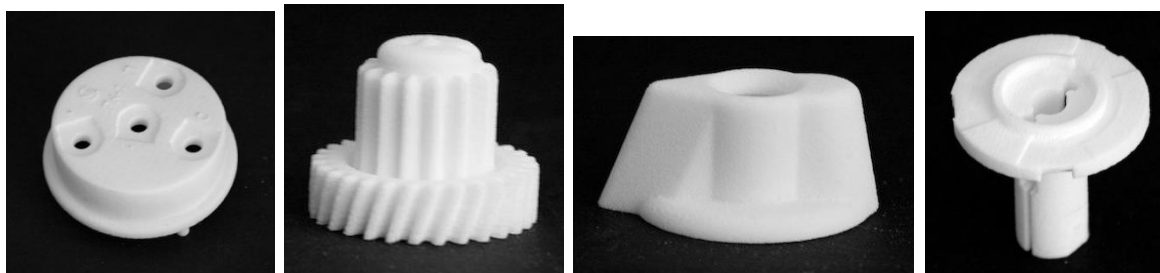


Рис. 6.19. Пластмассовые детали автомобиля, созданные на 3D-принтере

Так, в России (БГТУ «ВОЕНМЕХ» с ООО «Современное оборудование») осуществлялась 3D-печать ряда деталей малоразмерного газотурбинного двигателя для беспилотных летательных аппаратов. В частности, с помощью FDM-технологии изготавливались крышки и колесо компрессора, диффузор, а также корпус камеры сгорания (все из термостойкого пластика) (рис. 6.20).



Рис. 6.20. Детали из термостойких пластиков, изготовленные с помощью FDM-технологии

6.2.2. Изготовление технологической оснастки и инструмента

Литейная и штамповая оснастка

Для получения деталей путем литья или штамповки требуется специальная формообразующая оснастка. Однако стоимость такой оснастки, создаваемой с использованием традиционных технологий, как правило, во много раз превышает стоимость изготавливаемой с ее помощью детали, а на ее создание затрачивается довольно большое время [300]. Для снижения стоимости оснастки, ускорения и, по возможности, автоматизации процесса ее создания перспективно применять AM-технологии.

Ниже рассмотрены некоторые наиболее типичные примеры применения AM-технологий в литейном производстве.

Для того чтобы получить единичную металлическую литую деталь, сначала с помощью 3D-принтера изготавливается литейная модель детали, на которую затем наносится керамическая оболочка. В эту оболочку заливается расплавленный металл и формируется готовая литая деталь (при этом литейная модель выжигается или выплавляется) (рис. 6.21) [300].

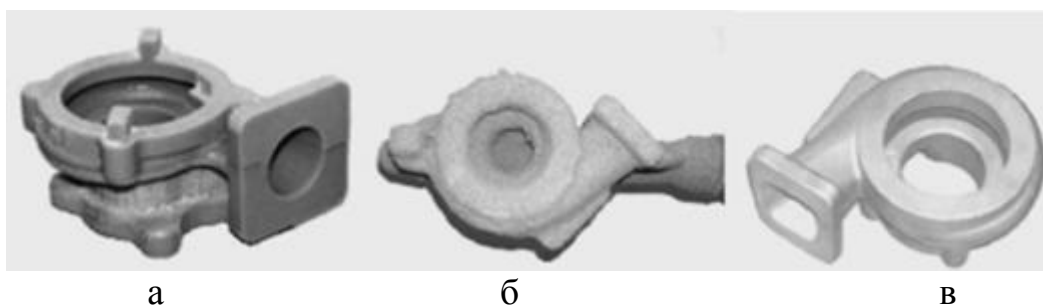


Рис. 6.21. Основные стадии получения литой детали с помощью АМ-технологий:

а – АМ-модель, б – керамическая оболочка, в – металлическая отливка

Выжигаемые модели получают из полистирола (SLS-технология), полиметилметакрилата (Ink-Jet-технология), фотополимеров (SLA-технология) [245, 275, 301]. Выплавленные модели получают из модельного материала на основе литьевого воска с фотополимерным связующим (ММ-технология) [245]. Также выплавляемые модели можно получать из ПВХ-пленок по LOM-технологии [275]. На рис. 6.22 и 6.23 показаны примеры литых алюминиевых деталей двигателя внутреннего сгорания (ДВС), изготовленных с использованием АМ-моделей [245].



Рис. 6.22. Головка цилиндра ДВС: SLS-модель (слева) и отливка

Для того чтобы получить небольшую партию литых металлических деталей, с помощью 3D-принтера изготавливается прототип детали (мастер-модель) из какого-либо материала, который затем заливается силиконом. После застывания силикона образуется эластичная форма, которая разрезается на две половинки. В полученную разъемную форму заливается литевой воск, в результате чего получается литейная модель. Такую форму можно использовать многократно. Обычно данный способ литья применяют для получения 20-50 литых деталей [300].

АМ-технологии применяются для изготовления песчаных литейных форм [245, 302]. Их получают с помощью SLS-технологии из литейного (силикатного или циркониевого) песка, плакированного полимером, играющим роль связующего (рис. 6.24 [303]), или с помощью Ink-Jet-технологии, когда связующее вещество подается каплями на последовательно формируемые слои песка (рис. 6.25 [304]).



Рис.6.23. Передняя крышка ДВС: SLA-модель (слева) и отливка (справа)



Рис. 6.24. Песчано-полимерная форма, полученная с помощью SLS-технологии



Рис.6.25. Песчано-полимерная форма, полученная с помощью Ink-Jet-технологии

AM-технологии позволяют создавать непосредственно металлическую оснастку. Пример тому – деятельность компании InssTek (Южная Корея), которая производит пресс-формы из стали и никель-молибденовых сплавов с помощью DMT-технологии [305]. Пресс-формы предназначены для литья алюминиевых головки блоков цилиндров двигателя.

Используя DMD-технология, за счет варьирования состава осаждаемых металлических порошков, можно получать пресс-формы, в которых рабочая поверхность выполнена из инструментальной стали, а конформные каналы охлаждения – из меди, причем сталь плавно переходит в медь [300]. Такие пресс-формы дают возможность существенно сократить время охлаждения детали при литье.

С помощью АМ-технологий также создают непосредственно пластиковые пресс-формы для инъекционного литья пластиков, а также для вакуумной формовки [306]. Пресс-формы получают из температуростойких пластиков с добавками керамического порошка с использованием технологии MOVINGLIGHT (затвердевание фотополимеров под действием ультрафиолетового излучения, создаваемого проектором). С помощью таких пресс-форм можно получать отливки из полипропилена, полиэтилена, полистирола, полиамида, АБС-пластика и т.п.

Электроды-инструменты

Применение копировально-прошивных электроэрозионных станков сдерживается ограниченными технологическими возможностями изготовления сложнопрофильных электродов-инструментов (ЭИ) цельной конструкции [307, 308]. При традиционном изготовлении их конструкция разделяется на элементарные участки, каждый участок изготавливается по отдельности, а затем они собираются в один инструмент. Изготовление сложнопрофильных ЭИ существенно упрощается благодаря применению АМ-технологий.

Так, сначала с помощью SLA-технологии создается прототип ЭИ, на основе которого затем формируется модельный комплект из литейного воска. Далее по обычной литейной технологии получается отливка ЭИ [307, 308]. Другой путь получения ЭИ – создание заготовки ЭИ с помощью SLA-технологии и последующее нанесение на нее токопроводящего покрытия – как в рабочей зоне, так и в зоне подвода электрического тока [309, 310]. Кроме того, возможно прямое изготовление ЭИ – на основе SLM-технологии [311]. С помощью АМ-технологий можно создавать медные ЭИ с микроэлементами на рабочей поверхности, что позволяет их использовать для микроэлектроэрозионной обработки [312].

Режущие инструменты

АМ-технологии, позволяют получать высокоэффективные режущие инструменты, которые невозможно создавать с помощью традиционных технологий. В частности, SLM-технологии дают возможность получать режущий инструмент, прочный снаружи и пластичный внутри [313]. Также с их помощью можно выборочно задавать параметры определенных участков детали с последующей закалкой их поверхности, формируя при этом внутреннюю часть в виде ячеек или сот. Кроме того, в инструменте, изготовленном по SLM-технологии, можно формировать спиральный канал для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), что позволяет более эффективно охлаждать его.

По мнению специалистов компании «Komet Group» (Германия), с помощью АМ-технологий можно воспроизводить любую по сложности геометрию режущего инструмента [314]. Так, эта компания на основе использования АМ-технологий освоила производство фрез, в которых можно располагать большее количество режущих зубьев с оптимизированной

геометрией. При этом скорость подачи таких инструментов, в частности, концевых и торцевых фрез увеличилась на 50 %. Более того, внутри корпуса режущей головки стало возможным формирование каналов с оптимизированным поперечным сечением для подвода СОЖ в требуемых местах без снижения прочности фрез и с максимальным эффектом их охлаждения. Различные виды фрез, выпускаемых компанией «Komet Group» с помощью АМ-технологий, показаны на рис. 6.26 [315].



Рис. 6.26. Фрезы, полученные с помощью АМ-технологий

Еще один пример успешного применения АМ-технологий для изготовления режущих инструментов – деятельность компании Maral (Германия), которая, выпускает необычные по конструкции сверла по гибридной технологии: хвостовик инструмента обрабатывается традиционным способом, а режущая часть – с помощью SLM-технологии (рис. 6.27) [316]. Преимуществом таких сверл является их принципиально новая геометрия, улучшающая их рабочие характеристики. Основная их особенность состоит в том, что канал подвода СОЖ в них имеет спиральную форму сравнению с центральным каналом в традиционно изготавливаемых сверлах, что повышает эффективность охлаждения за счет ускорения потока СОЖ. Кроме того, спиралевидный канал охлаждения проходит параллельно винтовой канавке, улучшая стабильность центральной части сверла. Более эффективному охлаждению также способствует профиль канала, который вместо круглой формы имеет слегка треугольную форму, что вызывает повышение скорости потока.



Рис. 6.27. Сверло, полученное с помощью АМ-технологий

одновременно два или более разных материалов, что достигается путем подачи порошков из нескольких сопел (рис. 6.29) [274].

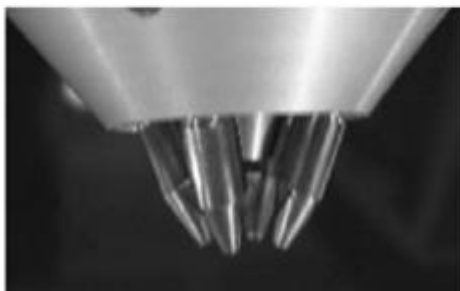


Рис. 6.29. Лазерная головка с несколькими соплами

Благодаря этому можно наносить покрытия с градиентом свойств по толщине. Так, можно формировать наружную приповерхностную часть покрытия из материала с повышенной прочностью, совмещая, таким образом, восстановление с упрочнением. Типичный пример реализации LENS-технологии показан на рис. 6.30 [295].



Рис. 6.30. Пример реализации LENS-технологии

Достоинством LENS-технологии также является возможность восстанавливать тонкостенные элементы деталей. При ее использовании в зоне лазерной обработки образуется малая зона теплового влияния, благодаря чему оказывается незначительное тепловое воздействие на микроструктуру материала. Детали с наплавкой, осуществляемой с помощью этой технологии, по прочностным свойствам превосходят аналогичные детали, полученные литьем либо горячим изостатическим прессованием, а также сопоставимы с коваными деталями [274].

На рис. 6.31 и 6.32 приведены типичные примеры ремонтных работ, выполненных с использованием LENS-технологии [274].

Рис. 6.33-6.35 демонстрируют возможности осуществления градиентной наплавки при использовании LENS-технологии.



Рис. 6.31. Устранение литейных дефектов в виде пор на поверхности колеса. Основа колеса выполнена из никелевых/титановых сплавов, наплавка – из того же материала

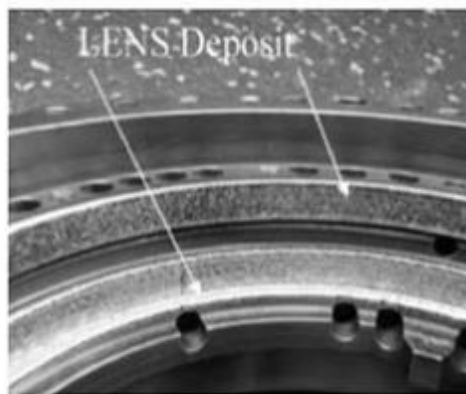


Рис. 6.32. Ремонт опорного фланца: наплавка изношенных кольцевых элементов из титанового сплава (указаны стрелками)

На рис. 6.33 показаны характерные изменения состава и структуры материала на разных участках по толщине наплавляемого покрытия.

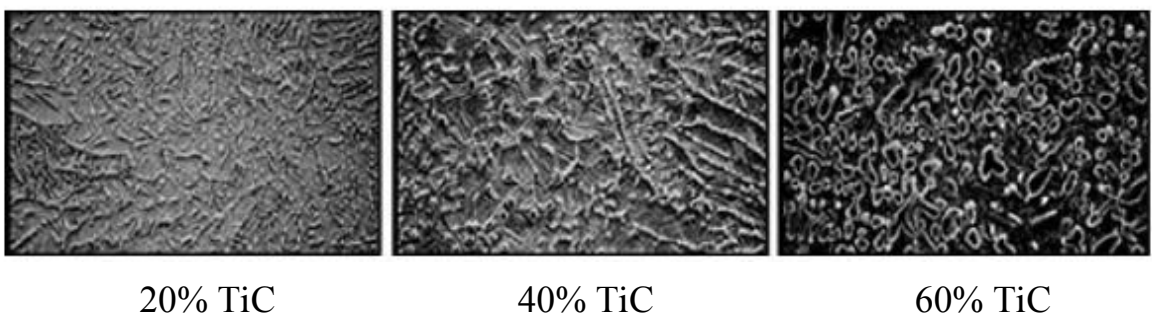


Рис. 6.33. Распределение TiC в Ti-матрице на разных участках по толщине слоя наплавленного покрытия

Градиентная наплавка по прочности превосходит материал основы (рис. 6.34), что делает перспективным ее применение для восстановления изношенных или разрушенных деталей с одновременным упрочнением критически важных зон деталей (рис. 6.35) [274].

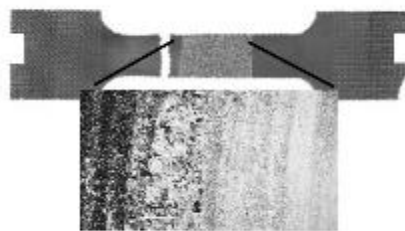


Рис. 6.34. Микрошлиф градиентной наплавки и результат испытания образца на разрыв

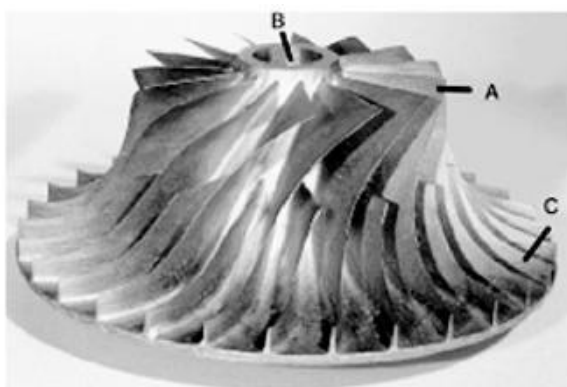


Рис. 6.35. Градиентная наплавка колеса из титановых сплавов: Ti-6-4 (участок В) и Ti-22-23 (участки А и С).

При реализации LENS-технологии за счет регулирования скорости охлаждения наплавляемого слоя (от 1000 до 5000°С/сек и более) становится возможным формирование заданной микроструктуры наплавки. В частности, быстрое отверждение наплавки позволяет формировать субмикронную микроструктуру, а в случае градиентной наплавки можно получать отдельные участки наплавляемого слоя с требуемой макро-, микро- или нанозернистой структурой. Осуществляемое таким образом регулирование структуры важно, например, при наплавке упрочняющих покрытий на тяжело нагруженные детали зубчатых передач [274].

Дополнительные возможности LENS-технологии по улучшению свойств восстанавливаемых деталей связаны с формированием наплавляемых слоев из композитных материалов. В частности, в процессе наплавки в состав наносимого основного порошка можно вносить углеродные нанотрубки, фуллерены, карбид бора и другие упрочняющие добавки [274].

Ниже кратко рассмотрен опыт ремонта различных деталей, выполнявшегося с помощью LENS-технологии (рис. 6.36-6.38) [318].

На рис. 6.36 показан пример восстановления корпуса подшипника из сплава Ti-6Al-4V Ti-6Al-4V, используемого в газотурбинном двигателе.

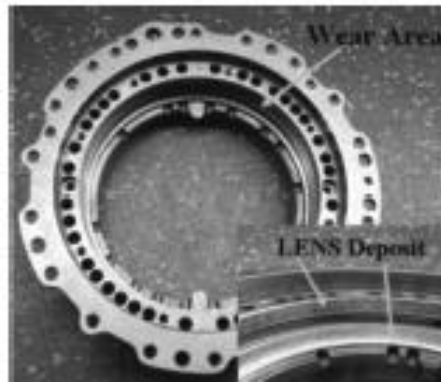


Рис. 6.36. Восстановление корпуса подшипника

Поверхность гнезда подшипника была сильно изношена, так что корпус считался непригодным для работы. Для восстановления изношенной области был использован LENS-процесс, после чего была выполнена финишная механическая обработка. Корпус был успешно отремонтирован без каких-либо деформаций (короблений) и прошел пробный прогон в двигателе. Затраты на ремонт составили около 50% от цены новой детали. Срок поставки отремонтированного корпуса составлял несколько дней по сравнению с несколькими неделями в случае поставки нового корпуса.

На рис. 6.37 показан пример весьма тонкого восстановления лабиринтного уплотнения компрессора газовой турбины, изготовленного из сплава Inconel 718.



Рис. 6.37. Восстановление лабиринтного уплотнения компрессора газовой турбины

Когда лабиринтное уплотнение оказывается чрезмерно малым в диаметре, оно становится непригодным для работы, поскольку двигатель теряет мощность. Тестовый образец уплотнения был восстановлен наплавкой слоя из сплава Inconel 718 по LENS-технологии. Стоимость восстановленного уплотнения составила около 45% стоимости нового уплотнения.

Восстановительная наплавка вызвала небольшое уменьшение внутренних диаметров, которое было обнаружено в процессе проверки. Эти диаметры были подвергнуты механической обработке для достижения требуемых значений в пределах установленных допусков.

В верхней части рис. 6.38 показан высокоскоростной приводной вал, восстановленный путем обычного газотермического напыления, где обращает на себя внимание отслаивание в восстановленной конусообразной области вала, а в нижней части – такой же вал, восстановленный с помощью LENS-технологии. Лазерную наплавку проводили с использованием нержавеющей стали 420, которая является более твердой и обладает большей коррозионной стойкостью, чем исходный материал основы или материалы, используемые для восстановления напылением. Затраты на восстановление вала с помощью LENS-технологии составили менее 50% стоимости новой детали.



Рис. 6.38. Сравнение вала, восстановленного газотермическим напылением (вверху) и LENS-технологией (внизу)

LENS-технология успешно применялась для восстановления ряда других деталей, в частности, таких как:

- подшипники, уплотнения и соединительные муфты на валах, которые не поддаются восстановлению обычными методами сварки;
- высокоскоростные (до 12 800 об/мин), высокомоментные (до 3500 л.с.) и высокоточные валы (с допусками в 0,0005 дюйма);
- крупногабаритный из стали 4340 был диаметром 18 дюймов и длиной 16,5 фута с шестерней на одном конце и шлицем на другом конце, для ремонта которого потребовалось около 10 кг наплавочного материала [318].

На рис. 6.39 показан пример использования LENS-технологии для восстановления деталей авиационного двигателя [245].

Для восстановления металлических деталей, наряду с LENS-технологией, широко применяются и другие варианты АМ-технологий, основанных на процессах лазерной наплавки. Так, восстановление пуансонов, служащих для производства шатунов автомобильных двигателей, осуществлялось с помощью 3D-принтера компании InssTek (Южная Корея), работающего по технологии DMT (Direct Metal Tooling) [319].



Рис. 6.39. Восстановление деталей авиационного двигателя

Для печати использовалась инструментальная сталь, которая обеспечивала высокоплотную однородную структуру наплавленного лазером покрытия. Скорость наращивания слоев доходила до $35 \text{ см}^3/\text{ч}$, что делает данный способ ремонта одним из самых быстрых и эффективных. Практика показала, что пуансоны, отремонтированные методом металлической 3D-печати, выходят после выпуска 150 000 шатунов, в то время как пуансоны, производимые по традиционной технологии, оказались в состоянии изготавливать лишь около 45 000 шатунов. При этом общие ремонтные расходы по данной технологии были меньше стоимости обычной технологии изготовления новых пуансонов. Для восстановления металлических деталей также применяются технологии EBDM (Electron Beam Direct Manufacturing) и IFF (Ion Fusion Formation) [263]. Согласно технологии EBDM изношенные поверхности детали восстанавливаются послойным наплавлением материала с помощью электронного луча, а согласно технологии IFF – с помощью потока плазмы, генерируемого плазмотроном. В качестве исходного материала используется прутки из алюминиевых и титановых сплавов, инконеля, конструкционных сталей и др. металлов.

Пластмассовые детали

Совершенствование конструкции машин связано с постоянно расширяющимся применением в качестве конструкционных материалов различных видов пластмасс: полиэтилена, полипропилена, полиамида, поликарбоната и др. [320]. В последние годы растет использование пластмасс в конструкциях тракторов, сельскохозяйственных и транспортных машин [321]. В связи с этим приобретают особую актуальность вопросы ремонта деталей из пластмасс. Обычно такие детали восстанавливают, используя методы механического, клеевого или сварного соединения [320]. Более эффективно ремонтировать детали из пластмасс с использованием АМ-технологий [245, 260, 263, 274, 295, 296, 318-324]. Так, с помощью 3D-принтеров осуществляется ремонт шестерней различной конструкции, корпусных элементов различного размера и других пластмассовых деталей

[324]. Примеры ремонта различных видов пластмассовых деталей с помощью 3D-принтеров показаны на рис. 6.40 [325] и рис. 6.41 [326].



Рис. 6.40. Восстановленная с помощью 3D-принтера и сломанная деталь из пластика

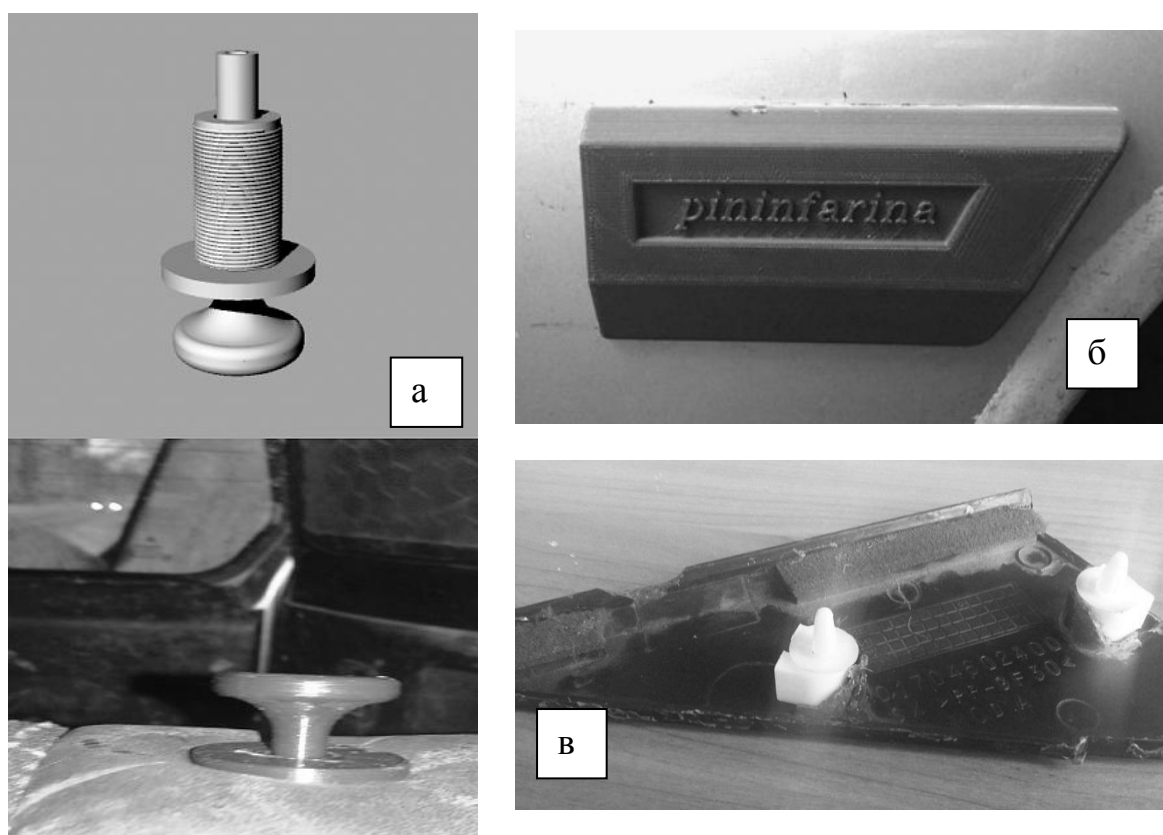


Рис. 6.41. Ремонт пластмассовых деталей автомобиля Mitsubishi Pajero Pinin с помощью 3D-принтера: а – ручка механизма раскладывания заднего сиденья (пластик PLA PrintProduct; сверху – общий вид ручки, снизу – ручка, вмонтированная в сиденье); б – молдинг переднего крыла (пластик ABS 3D Lines); в – ремонтные вставки для крышки зеркала (пластик PLA Esun)

Для ремонта пластмассовых деталей в принципе можно применять различные типы 3D-принтеров, осуществляющих печать полимерными материалами. Для устранения некоторых повреждений пластмассовых деталей удобно использовать 3D-ручки, которые представляют собой упрощенный вариант 3D-принтеров [327, 328].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гатилова, И.Н. Информатизация как основной фактор повышения эффективности управления предприятием / И.Н.Гатилова // Вестник Белгород. ун-та кооперации, экономики и права, 2017. – №1. – С. 88-97.
2. Литвиненко, О.А. Концептуальные аспекты системы управления информатизацией предприятия / О.А.Литвиненко // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2011. – № 1 (71). – С. 120-123.
3. Извозчикова, В.В. Совершенствование технического сервиса сельскохозяйственных машин на основе информационного обеспечения : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03; 05.13.06 / В.В Извозчикова; Оренбургский ф-л института экономики УрО РАН. – Оренбург, 2004. – 20 с.
4. Формирование структуры информационной системы технического сервиса в АПК / Г.П.Бут [идр.] // Техника в сельско хозяйстве. 2002. – №2. - С.33 – 35
5. Черноиванов, В. И. Стратегия развития технического сервиса в АПК / В.И. Черноиванов // Техника в сельском хозяйстве, 2004. – №2. – С. 3-6.
6. Никитченко, С.Л. Инженерное обеспечение растениеводства: монография / С.Л. Никитченко. — 2-е изд., стер. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 272 с.
7. Гладцын, А.Ю. Технический сервис АПК нуждается в укреплении информационно-маркетинговых центров / А.Ю.Гладцын, Е.В. Воронов // Российское предпринимательство. – Том 10. – № 4. – С. 129-134.
8. Мельник, В.Ю. Система информационной поддержки принятия решений для технического обслуживания и ремонта оборудования : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01 / В.Ю. Мельник ; Волгоградский гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2011. – 24 с.
9. Кизим, А.В. Исследование и разработка методики автоматизации ремонтных работ предприятия / А.В.Кизим, Н.А.Линев // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – Волгоград, 2008. – № 2, вып. 4. – С.43-45.
10. Основы технической эксплуатации транспортной техники / С.Ж. Кабикенов [и др.]; Карагандинский государственный технический университет. – Караганда: Издательство КарГТУ, 2015. – 261 с.
11. Бердникова, Р.Г. Техническое обслуживание тракторов с использованием системы информационного обеспечения : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.20.03 / Р.Г. Бердникова ; ГНУ СибИМЭ Россельхозакадемии. – Новосибирск, 2013. – 20 с.
12. Федоров, А.Г. Организация технического обслуживания грузовых автомобилей с использованием интегрированной электронной нормативно-технической полнокомплектной документации и индивидуализированного прогнозирования технического состояния узлов и агрегатов : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03 / А.Г. Федоров ; Сибирский научно-

исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Сибирского федерального научного центра агроботехнологий Российской академии наук. – Мичуринск-наукоград, 2017. – 22 с.

13. Петрищев, Н.А. Применение телеметрических информационных бортовых систем для технического состояния тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин / Н.А. Петрищев // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2012. – №11. – С. 38-45.

14. Петров, В. М. Электрооборудование, электронные системы и бортовая диагностика автомобилей : учеб. пособие / В. М. Петров, И. Ф. Дьяков. – Ульяновск, 2005. – 119 с.

15. Ольшевский, С.Н. Комплексный контроль технического состояния ДВС по параметрам переходных режимов : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03 / С.Н. Ольшевский ; Новосибирский государственный аграрный университет. – Новосибирск, 2005. – 19 с.

16. Шило, И. Н. Интеллектуальные технологии в агропромышленном комплексе / И. Н. Шило, Н. К. Толочко, Н. Н. Романюк, С. О. Нукешев. – Минск : БГАТУ, 2016. – 336 с.

17. Чинакал, В. О. Интеллектуальные системы и технологии : учеб. пособие / В. О. Чинакал. – М. : РУДН, 2008. – 303 с.

18. Холоша, В. И. Теория технических систем / В. И. Холоша. – Днепрпетровск : Национальный горный ун-т, 2014. – 104 с.

19. Информатика / Т.М. Аскеров [и др.]: под общ. ред. А. Н. Данчула. – М. : Изд-во РАГС, 2004. – 528 с.

20. Тельнов, Ю. Ф. Интеллектуальные информационные системы : учеб. пособие / Ю. Ф. Тельнов. – М. : Моск. междунар. ин-т эконометрики, информатики, финансов и права, 2002. – 118 с.

21. Евглевский, И. В. ГИС-технологии в системе поддержки принятия решений в различных областях деятельности / И. В. Евглевский, Н. Н. Морозов // Земля Беларуси. – 2008. – № 4. – С. 20–22.

22. Шнитко, С. Г. ГИС в геодезии : конспект лекций для студентов специальностей 1-56 02 01 «Геодезия» и 1-56 02 01 02 «Инженерная геодезия» / С. Г. Шнитко. – Новополоцк : ПГУ, 2014. – 68 с.

23. Осипов, В. Ю. Моделирование морских транспортных систем на основе интеллектуальных геоинформационных систем. Конференция «Имитационное моделирование, теория и практика ИММОД-2011» / В. Ю. Осипов. – СПб, 2011. – С. 219–222.

24. Валетов, В. А. Интеллектуальные технологии производства приборов и систем : учеб. пособие / В. А. Валетов, А. А. Орлова, С. Д. Третьяков. – СПб : СПб ГУИТ-МО, 2008. – 134 с.

25. Добрынин, Д. А. Моделирование некоторых форм адаптивного поведения интеллектуальных роботов / Д. А. Добрынин, В. Э. Карпов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2006. – № 2. – С. 45–56.

26. Добрынин, Д. А. Интеллектуальные роботы вчера, сегодня, завтра / Д. А. Добрынин // Десятая нац. конф. по искусств. интеллекту КИИ-2006, 25–

28 сент. 2006 г., Обнинск : труды конференции : в 3 т. Т. 1. – М. : Физматлит, 2006.

27. Ruiz-Garcia, L. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends / L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, J. I. Robla // *Sensors*. – 2009. – № 9. – P. 4728–4750.

28. Соловьев, Ю. А. Спутниковая навигация и ее приложения / Ю. А. Соловьев. – М. : Эко-Трендз, 2003. – 326 с.

29. Мониторинг и управление уборочно-транспортными комплексами с использованием ГНСС ГЛОНАСС/GPS / А. Ю. Измайлов [и др.] // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства : сб. науч. докл. Междунар. науч.-техн. конф. 15–16 сент. 2015 г. Москва : в 2 ч. – М. : ФГБНУ ВИМ, 2015. – С. 173–176.

30. Palem, G. Condition-based maintenance using sensor arrays and telematics / G. Palem // *Int. J. Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT)*. – 2013. – Vol. 3, No.3. – P. 19–28.

31. Сайганов, А. С. Основные направления перспективного развития системы производственно-технического обслуживания сельского хозяйства Беларуси в рыночных условиях / А. С. Сайганов // *Весці НАН Беларусі. Сер. аграр. навук*. – 2012. – № 1. – С. 34–41.

32. Wang, W. Remote machine maintenance system through Internet and mobile communication / W. Wang, P.W. Tse, J. Lee // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2007. – Vol. 1. – P. 783–789.

33. Туренко, А.Н. Проектирование диагностического обеспечения транспортных машин: учеб. пособие / А.Н. Туренко, В.Д. Мигаль, Л.А. Рыжих. - Харьков: Майдан, 2016. - 392 с.

34. Черноиванов, В. И. Интеллектуальная сельскохозяйственная техника / В. И. Черноиванов, А. А. Ежевский, В. Ф. Федоренко. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 124 с.

35. Могилевский, Э. Техника на SIMA-2013: всеядный трактор из интернета / Э. Могилевский // *Белорусское сельское хозяйство*. – 2013. – № 3. – С. 92–97.

36. John Deere запускает линейку интеллектуальных сельхозмашин [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://kazakh-zerno.kz>. – Дата доступа: 12.06.2015.

37. Дунаев, А. В. Перспективы развития диагностики самоходных машин в АПК / А. В. Дунаев, М. Н. Костомахин, А. Н. Воронов // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства : сб. науч. докл. Междунар. науч.-техн. конф. 15–16 сент. 2015 г., Москва : в 2 ч. – М. : ФГБНУ ВИМ, 2015. – С. 73-75.

38. Димитров, В. П. О разработке экспертной системы для технологической регулировки машин / В. П. Димитров, Л. В. Борисова [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rusnauka.com>. – Дата доступа: 12.06.2015.

39. Шевченко, И. А. Повышение эффективности эксплуатации молочно-доильного оборудования / И. А. Шевченко, Э. Б. Алиев // Матер. XVI Междунар. симп. по машинному доению сельскохозяйственных животных, Минск–Гомель, 27–29 июня 2012 г. – Минск : НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2012. – С. 62-68.

40. Волков, В. П. Ретроспективный анализ, состояние и перспективы развития технической эксплуатации автомобилей / В. П. Волков, В. П. Матейчик, П. Б. Комов // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. – 2012. – Вып. 135. – С. 164-167.

41. Ведерников, Р. С. Интеллектуальная подсистема диагностики и управления бортового программного обеспечения современного автомобиля / Р. С. Ведерников, Д. В. Сергеев // Ползуновский альманах. – 2009. – Т.2, №3. – С. 113-115.

42. Компьютерная диагностика двигателя и электронных систем / Bosch service center [Электронный ресурс]: Режим доступа: // <http://diesel-service-himki.ru>. Дата доступа: 18.02.2019.

43. Уваров, Г. А. Компьютерные технологии в виброакустическом диагностировании автомобилей / Г. А. Уваров // Вестник Полоцк. гос. ун-та. Серия В. – 2011. – № 11. – С 25-30.

44. Уваров, Г.А. Нечеткая логика в виброакустическом диагностировании автомобилей / Г.А. Уваров // Инновационные технологии в машиностроении: матер. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ, Новополоцк, 19 – 20 октября 2011 г. / Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк, 2011. – С.290-293.

45. Чебоксаров, А. Н. Основы теории надежности и диагностика : курс лекций / А. Н. Чебоксаров. – Омск : СибАДИ, 2012. – 76 с.

46. Власов, Д. В. Исследование и разработка интеллектуального метода диагностики сбоев элементов автомобильной электроники : дисс ... канд. тех. наук : 05.13.05 / Д. В. Власов. – М. : Московский государственный индустриальный университет, 2008. – 192 с.

47. Lee, J. Intelligent prognostics tools and maintenance / J. Lee, J. Ni, D. Djurdjanovic, H. Qiu, H. Liao // Computers in Industry. – 2006. – № 57. – P. 476–489.

48. Анищик, В.М. Интеллектуальные материалы: пособие / В.М. Анищик, В.М. Капцевич, Н.К. Толочко; под ред. Н.К. Толочко. Минск: БГАТУ, 2014. – 316 с.

49. Планковский, С.И. Анализ существующих методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях / С.И.Планковский, И.И. Головин, Ф.Ф. Сиренко // Авиационно-космическая техника. – 2013 – №6 (103). – С. 8-14.

50. Технологии и установка для очистки деталей сельскохозяйственных машин при постановке на хранение / С.Н. Борычев [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – №124(10). – С. 1-16.

51. Иванов, В.П. Ремонт машин. Технология, оборудование, организация: учебник. – Новополоцк: УО ПГУ, 2006. – 468 с.

52. Ясенков, Е.П. Основы проектирования и эксплуатации технологического оборудования: учеб. пособие / Е.П. Ясенков, Л.А. Парфенова. – Братск : ГОУ ВПО БрГУ, 2005. – 140 с.
53. Тараканова, Н.М. Технология и устройство для очистки сельскохозяйственных машин с использованием абразивно-кавитационной струи : дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03 / Н.М. Тараканова ; Рязанский государственный агротехнологический университет им. проф. П.А.Костычева. – Рязань, 2011. – 152 с.
54. Попов, А.С. Технология наружной очистки сельскохозяйственной техники с обоснованием параметров и режимов работы установки кавитационного действия : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03 / А.С. Попов ; Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. проф. П.А.Костычева. – Рязань, 2001. – 19 с.
55. Основы технологии производства и ремонта автомобилей. Конспект лекций / Сыктывкарский лесной институт – фил-л ГОУВПО «Санкт-Петербург. гос. лес. акад.» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/2069495/>. – Дата доступа: 05.12.2016.
56. Приходько, В.М. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография / В.М.Приходько, И.А.Меделяев, Д.С. Фатюхин. – М.: МАДИ, 2015. – 264 с.
57. Илюхин, А.В. Методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства / А.В. Илюхин, А.М. Колбасин, П.А. Цепкин // Институт Государственного управления, права и инновационных технологий (ИГУПИТ). Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – №3. <http://naukovedenie.ru>. Дата доступа: 05.12.2017.
58. Автоматизация технологических процессов мойки и очистки машин, агрегатов // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://studopedia.org/8-16386.html>. – Дата доступа : 05.04.2017.
59. Технология производства комплектующих систем газотеплоснабжения и воздухообмена: учеб. пособие / В.В. Масловский [и др.]. : под общ.ред. В.В. Масловского. – Харьков: ХНАГХ, 2008. – 252 с.
60. Юдаков, Е.Г. Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой очистки корпусных деталей автотракторных двигателей : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08 / Е.Г. Юдаков ; Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет. – М., 2013. – 19 с.
61. Панов, А.П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей / А.П. Панов. – М.: Машиностроение, 1984. – 88 с.
62. Технология конструкционных материалов: учебник для вузов / А.Г. Алексеев [и др.] ; под ред. Ю.М. Барона. – СПб.: Питер, 2012. – 512 с.
63. Алимбаева, Б.Ш. Разработка и оптимизация износостойких покрытий на стальной подложке, синтезируемых методом электроискровой обработки : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.16.09 / Б.Ш. Алимбаев ; Омский государственный технический университет. – Омск, 2014. – 123 с.

64. Оглезнев, Н.Д. Современное состояние и перспективы развития электроэрозионной обработки / Н.Д. Оглезнев // Изв. Самарского научного центра РАН. 2014. – Т.16. – № 1. – С. 490-494.
65. Обработка деталей электроэрозионным способом / Е.А. Перевертень [и др.] // Политехнический молодежный журнал. – 2017. – № 5. – С. 1-14.
66. Токмакова, Т.В. Исследование влияния факторов электроэрозионного фрезерования на его технические показатели и технологические возможности при обработке деталей ГТД : автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.07.05 / Т.В. Токмакова ; Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ). – М., 2004. – 24 с.
67. Электроэрозионная размерная обработка. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://helpiks.org/7-54964.html>. Дата доступа: 16.05.2019.
68. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В.П.Вейко [и др.]. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.
69. Ночовная, Н.А. Современное состояние вопроса в области очистки проточной части компрессора ГТД от эксплуатационных загрязнений (обзор) / Н.А. Ночовная, Я.Ю. Никитин // Труды ВИАМ, 2017. – №3(51). – С.45–54.
70. Цегельник, Е.В. Перспективные направления применения лазерных технологий в авиационной промышленности / Е.В. Цегельник // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, 2015. – №70. – С. 121-129.
71. Бармашов, И. Эффективная очистка плазмой изделий электронной промышленности / И.Бармашов // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 2. –С. 42-44.
72. Комплекс плазменной очистки НКТ и насосных штанг / А.Е. Сенокосов [и др.] // Сфера. Нефть и газ., 2015. – №3. – С. 72-74.
73. Габдрахманов, А.Т. Плазменная очистка металлических поверхностей / А.Т.Габдрахманов, И.Х.Исрафилов, А.Т.Галиакбаров // Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе «Машиностроение и техносфера XXI века»: 14-19 сентября 2015 г. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Т.1. – С. 57-59.
74. Сергеев, С.В. Анализ способов отделочно-упрочняющей обработки поверхности деталей ГТД свободным абразивом / С.В. Сергеев, Т.В. Лоза, А.П. Петренко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. - 2013. - Вып. 4. - С. 80-88.
75. Малышев, Г.П. Исследование возможности использования бластинговой технологии в металлургическом производстве / Г. П. Малышев, П.С. Кулик // Металургія / ред. В.І. Пожуєв. - Запоріжжя, 2012. - Вип. 2(27). - С.178 - 181.
76. Авт. св. 1740142, кл. В24С 1/00, 25.06.1987.
77. Богданой, Э.Э. Устройства и способ для аэрогидродинамической абразивной очистки поверхностей. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/WO2011119069A1/ru>. Дата доступа: 16.02.2020.

78. Джемелінський, В.В. Поверхнева фінішна обробка виробів / В.В. Джемелінський, Д.А. Лесик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2010. – №2/5 (44). – С. 68-70.
79. Толочко, Н.К. Кавитационные моечно-очистные технологии и их применение в сельском хозяйстве / Н.К. Толочко, А.Н. Челединов – Минск: БГАТУ, 2018. – 233 с.: ил.
80. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с.
81. Червяков, В.М. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах: монография / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев. – М.: Машиностроение, 2007. – 128 с.
82. Агранат, Б.Л. Ультразвуковая очистка / Б.Л. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский. – В кн. Физические основы ультразвуковой технологии. Физика и техника мощного ультразвука. – М.: Наука, 1970. – Т.3. – С. 165-252.
83. Агранат, Б.Л. Ультразвуковая технология: учеб. пособ. / Б.Л.Агранат, В.И.Башкиров, Ю.И. Китайгородский. – М.: Металлургия, 1974. – 504 с.
84. Курносов, Н.Е. К вопросу гидрокавитационной интенсификации процесса очистки изделий машиностроения / Н.Е. Курносов, К.В. Лебединский // Изв. ТулГУ. Тех. науки. – 2012. – Вып. 1. – С. 147-156.
85. Мусина, Г.Н. Физико-химические процессы кавитационного воздействия в жидких средах / Г.Н. Мусина // Наука и мир. – 2014 – №11(15). – Том. II. – С. 19-22.
86. Сиротюк, М.Г. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк; отв. ред. В.А. Акуличев, Л.Р. Гаврилов – М.: Наука, 2008. – 271 с.
87. Розенберг, Л.Д. Кавитационная область / Л.Д. Розенберг // В кн.: Мощные ультразвуковые поля. Под ред. Д.Розенберга. – М.: Наука, 1968. – С. 221-266.
88. Медведев, А. Ультразвуковая очистка. Теория и практика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.rosteplo.ru. – Дата доступа: 27.10. 2016.
89. Фатюхин, Д.С. Наукоёмкие ультразвуковые технологии очистки изделий машиностроения / Д.С. Фатюхин // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2011. – №2. – С. 9-13.
90. Фатюхин, Д.С. Ультразвуковые технологии повышения эксплуатационных свойств изделий транспортного машиностроения : автореф. дис. ... док. тех. наук: 05.02.08 / Д.С. Фатюхин ; Московский автомобильно-дорожный гос. техн. ун-т. – М., 2014. – 39 с.
91. Мачалкин, Ю.Н. Исследование и обоснование технологического процесса очистки деталей дизельной топливной аппаратуры моющими растворами в ультразвуковом поле (на примере распылителей форсунок) : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03 / Ю.Н. Мачалкин ; Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка. – М., 2003. – 24 с.

92. Экспериментальное исследование процессов ультразвуковой очистки деталей / А.В. Илюхин [и др.] // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – №3(5). – С. 17-21.
93. Толочко, Н.К. Кинетические закономерности ультразвуковой очистки деталей машин от загрязнений / Н.К.Толочко, А.Н.Челединов // Вестник машиностроения. – 2018. – С.69–73.
94. Кольцова, И.С. Затухание ультразвуковых волн во взвесах в широком диапазоне концентраций / И.С. Кольцова, И.Г. Михайлов // Акустический журнал. – 1997. – Т. XIX. – № 3. – С. 362-366.
95. Ланин, В.Л. Физические эффекты ультразвука в жидких средах и их применение в технике / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 2. – С. 10-15.
96. Антушева, Т.И. Некоторые особенности влияния ультразвука на микроорганизмы / Т.И. Антушева // Электрон. период. издание ЮФУ «Живые и биокосные системы». – 2013. – № 4. – 17 с. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.jbks.ru/archive/issue-4/article-11>. – Дата доступа: 27.10. 2016.
97. Лазерная термообработка с оплавлением поверхности для различных прикладных задач промышленности с целью повышения эксплуатационных свойств / В.Г. Буров [и др.] // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: в 2-х ч.: Материалы 15-й Междунар. наун.-практ. конф. – Санкт-Петербург. – 2013. – Ч. 2. – С. 53-57.
98. Гаркунов, Д.Н. Триботехника: учебник для студентов ВУЗов / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
99. Коротаев, Д.Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием / Д.Н. Коротаев. – Омск: СибАди, 2009. – 256 с.
100. Бирюков, В.П.. Определение трибологических характеристик пар трения скольжения после лазерной обработки / В.П. Бирюков // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – №1. – С. 31-34.
101. Майоров, В.С. Закалка чугуновых деталей излучением твердотельного лазера / В.С. Майоров, С.В. Майоров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – №3 (645). – С. 6-8.
102. Фоминский, В.Ю. Трибологические свойства тонкопленочных наноструктурированных покрытий в системе элементов W-Se-C / В.Ю. Фоминский, Р.И. Романов, И.В. Костычев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №9. – С. 12-19.
103. Влияние исходного состояния на неоднородность структуры углеродистых сталей, упрочненных методом электронно-лучевой обработки при атмосферном давлении / Е.А. Батаева [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – №3(645). – С. 3-6.
104. Структура и триботехнические свойства сплава Cu-NiWC, полученного методом электронно-лучевой наплавки / С.В. Дехонова [и др.] // Трение и износ. – 2002. – Т.23. – №6. – С. 678-679.

105. Структура и свойства коррозионно-стойких покрытий, полученных методом электронно-лучевой наплавки в атмосфере воздуха / И.М. Полетика [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2009. – №12. – С. 33-39.
106. Формирование покрытий вневакуумной электроннолучевой наплавкой карбидом вольфрама с последующим модифицированием наплавленного слоя / И.М. Полетика [и др.] // *Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2014. – №1(109). – С. 13-17.
107. Белый, А.В. Структура и свойства обработанной концентрированными потоками ионов азота инструментальной мартенситно-старееющей стали типа FeCo-W / А.В. Белый, В.А. Кукаренко, К.И. Чой // *Материаловедение.* – 2011. – №12. – С. 11-15.
108. Биленко, Э.Г. Структура и физико-механические свойства стали X12VM, подвергнутой ионно-лучевой обработке азотом / Э.Г. Биленко // *Трение и износ.* – 2004. – Т.25. – №3. – С. 310-315.
109. Быковский, Ю.А. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов / Ю.А. Быковский, В.Н. Неволин, В.Ю. Фоминский. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 135 с.
110. Машков, Ю.К. Трибофизика и структурная модификация материалов трибосистем: монография / Ю.К. Машков, О.В. Кропотин – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – 324 с.
111. Влияние имплантации ионами меди и свинца на коррозионную стойкость стали 30XГСН2А / В.В. Овчинников [и др.] // *Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: в 2-х ч.: Материалы 15-й Междунар. науч.-практ. конф.* – Санкт-Петербург. – 2013. – Ч. 2. – С. 207-213.
112. Будилов, В.В. Ионное азотирование инструментальных сталей с наложением магнитного поля / В.В. Будилов, К.Н. Рамазанов, Р.К. Вафин // *Металловедение и термическая обработка.* – 2011. – № 7(673). – С. 40-42.
113. Белый, А.В. Триботехнические свойства интерметаллического сплава Fe3Al, обработанного интенсивными потоками ионов азота / А.В. Белый, В.А. Кукаренко, А. Патеюк // *Трение и износ.* – 2007. – №6. – С. 575-581.
114. Влияние микроплазменной обработки на упрочнение приповерхностного слоя титанового сплава / Л.И. Куксенова [и др.] // *Материаловедение.* – 2012. – №4. – С. 30-36.
115. Структура и триботехнические характеристики стали, легированной Mo или W в режиме оплавления плазменной струей / С.Н. Братушка [и др.] // *Трение и износ.* – 2012. – Том 33. – №1. – С. 32-45.
116. Кремнев, Г.П. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении : учебное пособие / Г.П. Кремнев, Ф.В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2016. – 297 с.
117. Будовских, Е.А. Закономерности формирования поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании / Е.А. Будовских, С.В. Карпий, В.Е. Громов // *Материаловедение.* – 2009. – №11. – С. 49-53.

118. Осколкова, Т.Н. Наноструктурирование поверхности карбидовольфрам-рамовых твердых сплавов при электровзрывном легировании / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – №8. – С. 33-36.
119. Осколкова, Т.Н. Особенности электровзрывного легирования поверхности твердого сплава ВК10КС титаном / Т.Н.Осколкова, Е.А.Будовских, В.Е. Громов // Материаловедение. – 2012. – №1. – С. 41-45.
120. Овчинников, В.В. Производство деталей летательных аппаратов : учебник / В.В. Овчинников. – М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2017. — 368 с.
121. Никифоров, В.И. Электрохимические и электрофизические технологии в машиностроении / В.И. Никифоров. – С.-Пб: Политех. ун-т, 2013. – 302с.
122. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология материалов: учебник для бакалавров высших учебных заведений инженерно-технического профиля / Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифуллин. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 395 с.
123. Головки, Л.Ф. Электроэрозионная обработка фасонных отверстий множественным разрядом / Л.Ф. Головки, О.С. Чумаченко // Металл и литье Украины, 2013. – №3. – С. 33-37.
124. Richard, J. Micro-EDM-milling. Development of new machining technology for micro-machining / J. Richard, R. Demellayer // The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM). Proc. CIRP 6. 2013. P. 292-296
125. Пелих, С.А. Компьютерно-интегрированные производства и их влияние на конкурентоспособность продукции / С.А. Пелих, И.В. Емельянович // Проблемы управления, 2009. – № 4. – С. 141-148.
126. Махнач, В.И. Автоматизация проектирования в машиностроении / В.И. Махнач // Информатика, 2004. – №4. – С. 7-17.
127. Ермашкевич, Д.Б. Технологии изготовления деталей машин из металлопроката на основе сквозного компьютерного проектирования технологических процессов : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08 / Д. Б. Ермашкевич ; Белорусский национальный технический университет. - Минск : БНТУ, 2017. - 21 с.
128. Пустынникова, Е.В. Интегрированная логистика: электронное издание / Е.В. Пустынникова // Ульяновск : УлГУ, 2016. – 130с.
129. Интеграционная листическая поддержка наукоемких изделий. Концепция. Мин-во промышленности, науки и технологий РФ. – М., 2002. –70с.
130. Павленко, В.Н. Высокие технологии в машиностроении / В.Н. Павленко, В.В. Муравлев, С.И. Кравченко // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер. : Галузеве машинобудування, будівництво, 2013. - Вип. 2. - С. 3-7.
131. Колмыков, Д.В. Комбинированные методы упрочнения / Д.В. Колмыков, А.Н. Гончаров // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», 2012. – вип. 16(24). – С. 46-50.

132. Круглов, В.В. Электрофизикохимические и комбинированные методы обработки: учеб. пособие / В.В.Круглов, Нижний Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2013. - 207с.
133. Готлиб, Б. М. Технология автоматизированного машиностроения: учеб. пособие: в 2 т. / Б.М. Готлиб, А.А. Вакалюк, М.Б. Готлиб. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2012. – Т. 2: Автоматизированные высокоэнергетические технологические процессы точного машиностроения. – 230 с.
134. Повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники интегрированными технологиями упрочняющих защитных покрытий / Б.А. Ляшенко [и др.] // Конструювання, експлуатація та виробництво сільськогосподарських машин. – 2011. – Вип. 41, Ч. II. – С. 9-19.
135. Алифанов, Л.Я. Инновационные комбинированные методы обработки деталей / Л.Я. Алифанов // Инновации в машиностроении: сборник трудов 2-ой Международной научно-практ. конф. / под ред. В.К. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – С. 39-43.
136. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. – М.: Машиностроение, 1983. – 359 с.
137. Иванов, В.П. Ремонт автомобилей / В.П. Иванов. – Минск : Дизайн, 2001. – 208 с.
138. ГОСТ Р 53393-2009 Интегрированная логистическая поддержка. Основные положения.
139. Заковряшин, А.И. Элементы интегрированной логистической поддержки / А.И. Заковряшин, П.С. Агалецкий // Электронный журнал «Труды МАИ». – Вып. 49. – С. 1-10.
140. Калугин, С.С. Интегрированная логистическая поддержка послепродажного обслуживания авиационных газотурбинных двигателей и газоперекачивающих установок / С.С. Калугин // Известия МГТУ «МАМИ», 2014. – № 1(19), т.5. – С.200 – 204.
141. Анодно-механическая резка // [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://texinfo.inf.ua/razdeli/tehn_obr/stati/anodnomex_rezka.html. – Дата доступа: 05.03.2018.
142. Эдигаров, В.Р. Финишная антифрикционная электромеханическая обработка деталей / В.Р.Эдигаров // Обработка металлов, 2015. – №3. –С.6-15.
143. Иванов, В.В. Технологические возможности комбинированного брационного механохимического нанесения покрытий / В.В. Иванов // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні, 2010. – Вип. 44. – С. 16-19.
144. Покорска, И. Свойства композиционных слоев, полученных комбинированной обработкой / И.Покорска // Металловедение и термическая обработка металлов, 2005. – №11. – С. 5-7.
145. Чудина, О.В. Упрочнение поверхности сталей легированием при лазерном нагреве с последующей химико-термической обработкой /

О.В.Чудина, Т.М. Боровская // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1997. – №7. – С. 11-14.

146. Казанцев, С.П. Новая технология получения комбинированных диффузионных покрытий / С.П.Казанцев // *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2003. – №7. – С. 30-32.

147. Тарасов, Д.Е. Повышение контактной выносливости комбинированным упрочнением статико-импульсной обработкой и цементацией : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08 / Д.Е. Тарасов ; ФГБОУ ВПО Государственный университет – УНПК. – Орел, 2013. – 19 с.

148. Структурно-фазовые превращения и модифицирование при электроконтактной обработке стальных газотермических покрытий / М.И. Черновол [и др.]. // *Вестник Полоцкого гос. ун-та, Серия В*, 2016. – №3. – С.115-123.

149. Эдигаров, В.Р. Комбинированная электромеханоультразвуковая обработка поверхностных слоев деталей машин / В.Р. Эдигаров, Б.Ш. Алимбаева, П.С. Перков // *Вестник СибАДИ*, 2017. – Вып. 2 (54). – С. 42-47.

150. Жданок, С.А. Нанотехнологии в агропромышленном комплексе: монография / С.А. Жданок, З.М. Ильина, Н.К. Толочко; под ред. Н.К. Толочко. – Минск : БГАТУ, 2012. – 172 с.

151. Панфилова, В. А. Машины и аппараты пищевых производств / В. А. Панфилова. – М. : Высш. школа, 2001. – 680 с.

152. Плаксин, Ю. М. Процессы и аппараты пищевых производств / Ю. М. Плаксин, Н. Н. Малахов, В. А. Ларин. – М. : КолосС, 2007. – 760 с.

153. Наноматериалы и нанотехнологии / В.М. Анищик [и др.]; под ред. В. Е. Борисенко и Н. К. Толочко. – Минск : Изд. центр БГУ, 2008. – 375 с.

154. Лякишев, Н. П. Наноматериалы конструкционного назначения / Н. П. Лякишев, М. И. Алымов // *Росс. нанотехнологии*. – 2006. – Т. 1. – № 1-2. – С.71-81.

155. Малыгин, Г. А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов / Г. А. Малыгин // *ФТТ*. – 2007. – Т. 49. – Вып. 1. – С. 961-982.

156. Мулюков, Р. Р. Объемные наноматериалы в машиностроении будущего: методы получения, свойства и перспективы применения / Р. Р. Мулюков / *Ин-т проблем сверхпластичности металлов РАН [Электронный ресурс]*. Режим доступа: [http://rusnanotech08.rusnanoforum.ru/sadm_files/disk/Docs/2/12/12%20\(8\).pdf](http://rusnanotech08.rusnanoforum.ru/sadm_files/disk/Docs/2/12/12%20(8).pdf). – Дата доступа: 20.10.2010.

157. Титан в пищевой промышленности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nprotitan.ru>. – Дата доступа: 20.10.2010.

158. Триботехнические характеристики титана с ультрамелкозернистой структурой / Л. Ш. Шустер [и др.] // *Трение и износ*. – 2005. – Т. 26. – № 2. – С. 208-214.

159. Формирование нанокристаллической структуры на поверхности трения в присутствии нанопорошков сплавов меди в смазочном материале /

Л. В. Золотухина [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 3. – С. 7-12.

160. Прожега, М. В. Влияние размеров зерна WC на износостойкость твердых сплавов WC-Co / М. В. Прожега [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 5. – С. 42-46.

161. Федоренко, В. Ф. Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе : монография / В. Ф. Федоренко. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 148 с.

162. Трибологические характеристики алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных наноразмерными наполнителями / Т. А. Чернышева [и др.] // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – № 4. – С. 446-450.

163. Гульбин, В. Металломатричные композиты, упрочненные высокотвердыми нанопорошками / В. Гульбин, В. Попов, И. Севостьянов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ropnano.ru/science/index.php?task=view&id=71>. – Дата доступа: 20.10.2010.

164. Струк, В. А. Наноконпозиционные полимерные материалы и технологии / В. А.Струк, В. И. Кравченко // Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / под ред. Ф. Г. Ловшенко [и др.]. – М. : Энергоатомиздат; Гомель: БелГУТ, 2004. – С. 400-513.

165. Песецкий, С. С. Триботехнические свойства наноконпозитов, получаемых диспергированием наполнителей в расплавах полимеров / С. С. Песецкий, С. П. Богданович, Н. К. Мышкин // Трение и износ. – 2007. – Т. 28. – № 6. – С. 500-524.

166. Керамические композиционные материалы с нанокристаллической структурой и регулируемой пористостью / Институт физики прочности и материаловедения СО РАН [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sbras.nsc.ru/dvlp/rus/pdf/387.pdf>. – Дата доступа: 20.10.2010.

167. НИЦ перспективных и нетрадиционных технологий «Спектр» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tpu.Ru/html/nii-spectr.htm>. – Дата доступа: 20.10.2010.

168. Бабин, Ю. А. Техническая керамика – перспективный материал для рабочих органов и деталей сельскохозяйственной техники / Ю. А. Бабин, Д. Б. Бернштейн, Н. И. Кисетова // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1988. – № 9. – С. 132-136.

169. Паращук, В. В. Получение и исследование свойств полимерных наночелтратационных мембран для разделения органических сред : дисс. ... канд. хим. наук: 05.17.18 / В. В. Паращук ; Ин-т нефтехим. синтеза им. А.В. Топчиева РАН. – М., 2008. – 106 с.

170. Наномембранные технологии для переработки сельхозпродукции [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://nanoagro.ru/pererabotka/pererabotka-selhozproduktsii-2.html>. – Дата доступа: 7.09.2010.

171. Наноиндустрия в агробизнесе, животноводстве, растениеводстве [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.softholm.com/news/miscellaneous/article_1292.html. – Дата доступа: 5.10.2010.

172. Молоко, которое мы выбираем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.biozone-lgs.spb.ru/articles/milk.htm>. – Дата доступа: 5.10.2010.

173. Асеев, А. Л. Наноматериалы и нанотехнологии / А. Л. Асеев // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – № 3. – С. 2-11.

174. Бутова, С. Н. Технология жиров и биоорганического синтеза / С. Н. Бутова / Московский гос. ун-т пищевых производств [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mgupp.ru> – Дата доступа: 5.10.2010.

175. Новые активные и умные строительные материалы на основе нанотехнологий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.panonewsnet.ru/articles/2010/> – Дата доступа: 5.10.2011.

176. Арефьев, П. Наностекло защищает от жары / П. Арефьев [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://press.try.md/item.php?id=30705>. – Дата доступа: 30.10.2010.

177. Кононенко, А.С. Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков : автореф. дис. док. тех. наук: 05.20.03 / А.С. Кононенко ; Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. – М., 2012. – 37с.

178. Григорьев, С.Н. Технологии нанообработки / С.Н. Григорьев, А.А. Грибков, С.В. Алёшин. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://topuch.ru/grigoreev-s-n-gribkov-a-a-aleshin-s-v-tehnologii-nanoobrabotki/index14.html>. Дата доступа: 22.02.2017.

179. Ротштейн, В.П. Модификация структуры и свойств металлических материалов интенсивными импульсными электронными пучками : автореф. дис. ... док. физ.-мат. наук: 05.27.02; 01.04.07 / В.П. Ротштейн. – Томск, 1995. – 37с.

180. Коваль, Н.Н. Разработки института сильноточной электроники Сибирскрнр отделения РАН в области вакуумных электронно-ионно-плазменных технологий / Н.Н. Коваль [и др.]. // Матер. Ежегод. научно-практ. конф. «Инновации РАН – 2009», Томск, 18-20 ноября 2009, г. Томск. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dokumen.tips/documents/innovation-2009.html>. Дата доступа: 22.01.2009.

181. Бржозовский, Б.М. Технология упрочнения деталей машин на основе наноструктурирования их рабочих поверхностей воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / Б.М.Бржозовский, В.В.Мартынов, Зинина Е.П. // Матер. 65-й Междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» Междунар. науч. симпозиума «Автотракторостроение – 2009». Кн. 8. – М.: МГТУ МАМ, 2009. – С. 1-3.

182. Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоёв титана после электровзрывного легирования иттрием и электронно-пучковой обработки / В.Е.Громов [и др.] // Успехи физ. мет., 2015. – т. 16. – С. 175-227.

183. Цвиркун, О.А. Формирование нанокompозитных слоев на поверхности железа и никеля при электровзрывном легировании: дисс.... канд. техн. наук :

01.04.07 / О.А. Цвиркун ; Сибирский государственный индустриальный ун-т и Томский государственный архитектурно-строительный ун-т. – Новокузнецк, 2007. – 147 с.

184. Морозова, Н.Н. Модификация структуры и свойств силумина эвтектического состава электровзрывным методом : магистр. дис. : 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов / Н.Н. Морозова ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2017. – 128 с.

185. Осколкова, Т.Н. Упрочнение поверхности карбидовольфрамового твёрдого сплава способом электровзрывного легирования / Т.Н.Осколкова, Е.А.Будовских // Современные наукоемкие технологии, 2010. – №7. – С.146–148.

86. Формирование нанокompозитных слоёв на поверхности металлов при электровзрывном легировании / Е.А. Будовских [и др.] // Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов ДСМСМС-2008: Тез. докл. XI Междунар. конф. 10–14 апр. 2008.– Екатеринбург, 2008. – С. 56–57.

187. Формирование поверхностного сплава при плавлении системы пленка – подложка высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Сообщение 1 / Ю.Ф.Иванов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. – Том 58, № 8. – С. 583 – 588.

188. Импульсное электронно-пучковое легирование сплава БТ6 цирконием путем перемешивания предварительно осажденной многослойной Zr/Ti пленки / В.П. Ротштейн [и др.] // Письма в ЖТФ. - 2008. - Т. 34. - В. 20. - С. 65-72.

189. Хомич Н.С., Луговик А.Ю. Суперточное магнитно-абразивное полирование прецизионных поверхностей. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://rusnanotech09.rusnanoforum.ru/Public/LargeDocs/theses/rus/poster/01/30_Khomich.pdf. Дата доступа: 22.01.2009.

190. Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе: науч. издание / В.Ф.Федоренко [и др.]. – М.: ФГБНУ Росинформагротех, 2011. – 312 с.

191. Приоритетные направления и результаты научных исследований по нанотехнологиям в интересах АПК / В.Ф. Федоренко [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 236 с.

192. Окулик М.А. Нанопокрyтия для металлорежyщего инструмента. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2011/fimm/okulik/library/article9/index.htm>. Дата доступа: 22.01.2009.

193. Бобкова, Т.И. Разработка материалов и технологий получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков : дис. ... канд. техн. наук. : 05.16.09 / Т.И. Бобкова ; Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И.В.Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – С.-Пб., 2017. –186 с.

194. Упрочнение деталей машиностроительного производства с применением нанодисперсных частиц, порошков / Г.С. Жетесова [и др.]. – Вестник КазНТУ, 2012. – №5 (93). – С. 148-153.
195. Спектор, Ю.Е. Технология нанесения и свойства покрытий / Ю.Е. Спектор, Р.Г. Еромасов // Курс лекций. Красноярск, 2008. – 271 с.
196. Харламов, Ю.А. Газотермическое напыление. Современное состояние и перспективы развития / Ю.А.Харламов, Л.Г. Полонский // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля, 2016. – № 2 (226). – С. 5-19.
197. Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения / И.Н. Кравченко [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета, 2015. – №3(82). – С.19-27.
198. Высокоскоростное газопламенное напыление. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://irobs.ru/oborudovanie-dlya-vyisokoskorostnogo-gazoplazmennogo-napyleniya>. Дата доступа: 22.01.2009.
199. Высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://a-termika.com/ru/tekhnologii/6-hvof-tecnology>. Дата доступа: 22.01.2009.
200. «Нано» на стыке наук: нанообъекты, нанотехнологии, нанобудущее. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pandia.ru/text/78/521/51570-8.php>. Дата доступа: 22.01.2009.
201. Современные виды покрытий, применяемых для повышения стойкости металлорежущего инструмента (нанопокрyтия). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kursak.net/referat-na-temu-sovremennye-vidy-pokrytij-primenyaemyx-dlya-povysheniya-stojkosti-metallorzhushhego-instrumenta-nanopokrytiya/>. Дата доступа: 22.01.2009.
202. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия: монография / А.А. Андреев [и др.] // Харьков: НИЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
203. Калита, В.И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой: монография / В.И.Калита, Д.И.Комлев, – М.: Лидер М, 2008. – 388 с.
204. Шолкин, С.Е. Разработка технологии микроплазменного осаждения функциональных покрытий с элементами наноструктуры : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.16.01 / С.Е. Шолкин ; Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т и Центральный научно-исследовательский ин-т конструкционных материалов «Прометей». – С.-Пб, 2011. – 19с.
205. Инженерные нанотехнологии в АПК : научное издание / [авт. кол.: В. Ф. Федоренко и др.] ; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Федеральное гос. науч. учреждение "Российский науч.-исслед. ин-т информации и техн.-экон. исследований по инженерно-техн. обеспечению агропромышленного комплекса (ФГНУ "Росинформагротех"). – М. : ФГНУ "Росинформагротех", 2009 (пос. Правдинский (Моск. обл.) : Росинформагротех). - 143 с. : ил.
206. Особенности получения новых материалов с применением нанотехнологий. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://xreferat.com/76/1430-1-osobennosti-polucheniya-novyh-materialov-s-primeneniem-nanotekhnologiiy.html>. Дата доступа: 22.01.2009.

207. Исследование свойств и модификация структуры в зонах деформации и разрушения наноструктурированных легированных покрытий на основе нитрида титана / С.В. Овчинников [и др.] // V Всерос. конф. по наноматериалам. Звенигород, 23-27 сентября 2013 г. / Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2013. – С. 113-115.

208. Хрущов, М.М. Вакуумные ионно-плазменные алмазоподобные покрытия с легированной нанокompозитной структурой и их поведение в условиях трения скольжения / М.М.Хрущов, Е.А.Марченко // V Всерос. конф. по наноматериалам. Звенигород, 23-27 сентября 2013 г. / Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2013. – С. 121-122.

209. Синтез и исследование нанокompозитных покрытий на основе аморфного углерода / Андреев А.В. [и др.]. // V Всерос. конф. по наноматериалам. Звенигород, 23-27 сентября 2013 г. Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2013. – С. 124-125.

210. Гончаров, А.А. Синтез нанокристаллических пленок диоксида титана в цилиндрическом газовом разряде магнетронного типа и их оптическая характеристика / А.А. Гончаров // Журнал технической физики, 2010. – том 80, вып. 8. – С. 127-135.

211. Лялякин, В.П. Использование нанотехнологий при восстановлении узлов ДВС / В.П. Лялякин // Вестник аграрной науки Дона, 2009. – №4. – С.30-35.

212. Применение нанотехнологии в производстве высокоресурсных почвообрабатывающих органов сельскохозяйственной техники / П. В. Орлов [и др.]. – Вестник Омского ун-та, 2012. – №2. – С.245-248.

213. Витязь, П. Наноматериалы в Беларуси и их применение / П. Витязь, В. Урбанович // Наука и инновации. – 2006. – № 7. – С. 14-18.

214. Влияние режимов электролиза на субструктуру композитов серебро – ультрадисперсный алмаз / А. А. Хмыль [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2001. – Т. 45. – № 6. – С. 119-121.

215. Нанотехнологии в ближайшем десятилетии / Дж. Уатсайдс [и др.]; под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса. Пер с англ. – М. : Мир, 2002. – 292 с.

216. Стокозенко, В. Н. Нанотехнологии сегодня и завтра / В. Н. Стокозенко // Пром. окраска. – 2006. – № 3. – С. 22-24.

217. Витязь, П.А. Фуллеренсодержащие структуры для практических приложений / П. А. Витязь, С. А. Жданок, Э. М. Шпилевский / В кн.: Углеродные наноструктуры; сб. науч. тр. – Минск : ИТМО, 2006. – С. 3-15.

218. Карпинец, А.П. Перспективы применения наноматериалов и нанотехнологий на автомобильном транспорте. Часть 1. Наноструктуры и функциональные материалы / А.П. Карпинец // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту, 2010. – № 1(10). – С. 34-39.

219. Основы прикладной нанотехнологии / А.А. Абрамян [и др.]. – М.: Магистр-пресс, 2007. – 208 с.

220. Толочко, Н. К. Особенности фрикционных процессов при наличии наноструктурных контактирующих поверхностей и наноструктурных смазочных слоев / Н. К. Толочко / Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VII Междунар. науч.-техн. конф. В 3-х т.; под общ. ред. П. А. Витязя, С. А. Астапчика. – Новополоцк : ПГУ, 2009. – Т. II. – С. 33-35.
221. Дедков, Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели / Г. В. Дедков // УФН, 2000. – Т. 170(№6). – С. 585-618.
222. Буяновский, И. А. Нанотрибология: некоторые тенденции развития / И. А. Буяновский, М. М. Хрущев, В. А. Левченко // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2008. – № 1. – С. 39-40.
223. Паренаго, О. П. Наноразмерные структуры в углеводородных смазочных материалах / О. П. Паренаго, В. Н. Бакунин, Г. Н. Кузьмина // Рос. хим. журн. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева), 2003. – Т. XLVII. – № 2. – С. 45-50.
224. Морозова, А. П. Перспективы применения нанотехнологий в теплоэнергетике / А. П. Морозова / Науч.-техн. конф. МГТУ, 2008 г. [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://www.magtu.ru>. – Дата доступа: 30.10.2010.
225. Балабанов, В. И. Нанотехнологические препараты автохимии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nanometer.ru/2009/07/19/avtohimia_156241.html. – Дата доступа: 5.10.2010.
226. Безразборный сервис автомобиля / В. И. Балабанов [и др.]. – М. : Известия, 2007. – 272 с.
227. Баранов, Л. П. Наночастицы и нанотехнологии в смазочных материалах / Л. П. Баранов, Т. С. Голоднова, А. Ф. Мухаметзянова // Рынок продуктов и технологий, 2005. – № 1. – С. 20-26.
228. Наноразмерные добавки к смазочным материалам в условиях их моделирования / В. В. Сафонов [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация, 2008. – № 2. – С. 8-10.
229. Влияние высокодисперсных органоминеральных наполнителей на температурные характеристики смазочных композиций / Е. Н. Волнянко [и др.] // Трение и износ, 2006. – Т. 27. – № 2. – С. 232-235.
230. Влияние внешних воздействий и процессы структурообразования в смазочных маслах / В. Г. Савкин [и др.] // Трение и износ, 2007. – Т. 28. – № 6. – С. 634-639.
231. Олишевская, В. Е. Обработка трущихся соединений машин нанотрибопрепаратами при безразборном сервисе / В. Е. Олишевская, К. М. Бас, П. В. Литвин. – Науковий вісник ХНАДУ, 2010. – № 51. – С. 156-161.
232. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочник / И. Г. Анисимов [и др.]; под ред. В. М. Школьниковой, изд. 2-е перераб. и доп. - М.: Техинформ, 1999. – 596 с.
233. Бескова, А. В. Разработка пакета присадок к минеральным гидравлическим маслам : дис. ... канд. тех. наук: 02.00.13 / А. В. Бескова ;

Средневолжский научно-исследовательский ин-т по нефтепереработке и Самарский гос. техн. ун-т. – Самара, 2017. – 168с.

234. Бакунин, В.Н. Наноразмерные структуры в углеводородных смазочных материалах : автореф. дис. ... док. хим. наук: 02 00 13 / В.Н. Бакунин ; ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им А В Топчиева Российской академии наук и Государственный научно-исследовательский институт химмотологии. – М., 2007. – 42 с.

235. Терентьев, В. Ф. Применение смазочных композиций с углеродосодержащими ультрадисперсными добавками в приводах и трансмиссиях транспортных машин и технологического оборудования / В. Ф. Терентьев // Мобильная техника, 2004. – № 3. – С. 41-45.

236. Триботехнические характеристики жидких смазочных материалов с добавками углеродных наночастиц / Н. К. Толочко [и др.] // Техника и технологии: инновации и качество. Матер. Междунар. научно-практ. конф. – Барановичи : БарГУ, 2007. – С. 366-368.

237. Проблемы трения и смазки в узлах машин и механизмов / А.А. Ватлин [и др.] // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию со Дня образования учебного заведения и Году пожарной охраны России, Иваново, 14 апреля 2016 г. / под общ. ред. В. В. Киселева. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарноспасательная академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 169-171.

238. Кужаров, А.С. Еще раз и несколько иначе о металлоплакировании, ФАБО и безысности / А.С. Кужаров, А.А. Кужаров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. – т. 13, №4(3). – С. 772-775.

239. Тельнов, Н. Ф. Применение магнитной жидкости в качестве смазочного материала / Н. Ф. Тельнов, А. М. Баусов, С. П. Швец // МЭСХ, 1999. – № 5. – С. 22-24.

240. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазографитовыми добавками. Часть I. Триботехнические свойства / П. А. Витязь [и др.] // Трение и износ. – 2006. – Т. 27. – № 1. – С. 61-68.

241. Гительман, Д.А. Безысностная эксплуатация двигателей внутреннего сгорания: Технологические рекомендации / Д.А.Гительман, А.К. Ольховацкий. – Челябинск, 2015 – 52 с.

242. Щербина, М. Большие надежды планеты на спасателей-«нано-крох» / М. Щербина // Росс. Нанотехнологии, 2009. – Т. 4. – № 11-12. – С. 27-28.

243. Катализаторы для эффективного сжигания топлива / З. Р. Исмагилов [и др.] // Росс. Нанотехнологии, 2009. – Т. 4. – № 11-12. – С. 32-34.

244. Абрамян, А.А. Нанокатализаторы в топливе для транспорта. Нано без границ / А. Абрамян [и др.] // Промышленные нанотехнологии, 2007. – № 4. – С. 24-26.

245. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М. ГНЦ РФ ФГУП НАМИ, 2015. – 220 с.
246. Валетов, В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы) : учеб. пособие / В.А. Валетов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 63с.
247. Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад [Электронный ресурс] / И.Г.Дежина [и др.], 2015. – 273 с.
248. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К.Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560с.
249. Аддитивные технологии: что это? // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dprinter.ua/additivnyye-tehnologii-chto-jeto/> – Дата доступа: 05.10.2017.
250. Татоян, Г.А. Обзор международного опыта в области применения аддитивных технологий / Г.А. Татоян, С.И. Ультан // Современный вектор: мировая экономика, менеджмент и маркетинг: сб. тр. Междунар. научно-практ. форума, 27-29 апр. 2016 г., Омск; отв. ред. О. С. Елкина. – Омск: Ом. гос. ун-т, 2016. – С. 134-142.
251. Слюсар, В. Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования / В. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2003. – №5. – С. 54-60.
252. 3D лазерная объемная наплавка // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fian.smr.ru/rp/course/RPB~1.НТМ>. – Дата доступа: 05.10.2017.
253. Камаев, С.В. Лазерная стереолитография: состояние и перспективы / С.В. Камаев // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сб. докл. междунар. науч. конф. – М.: ФГУП ВИАМ, 2015. – С. 5-22.
254. Лазерная стереолитография (SLA) // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://3dpr.ru/lazernaya-stereolitografiya-sla> – Дата доступа: 05.10.2017.
255. Стереолитография // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rpc.niit.ru/sla.html> – Дата доступа: 05.10.2017.
256. 3D принтер Rapid Shape. Центр прототипирования и дизайна «МАМИ» // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rp-center.com/produktyi-i-resheniya/3d-printeryi/3d-printer-rapid-shape.html> – Дата доступа: 05.10.2017.
257. Технология 3DP – струйная трёхмерная печать из гипсополимера // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.3dprototip.ru/3dprint/technology/technology3dp.html> – Дата доступа: 05.10.2017.
258. Обзор технологий 3D печати // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/obzor-tehnologij-3D-pechati> – Дата доступа: 05.10.2017.
259. Кузнецов, П.А. Аддитивные технологии в машиностроении и медицине (опыт работы ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей») / IV Междунар. технологический форум «Инновации. Технологии. Производство», 24-27 апр. 2017 г., Рыбинск, Ярославская область / П.А. Кузнецов // [Электронный

ресурс]. Режим доступа: <http://itp-forum.ru/conf2017/archives/arkhiv-mtf-2015/sektsiya-foruma-1-additivnye-tehnologii/> – Дата доступа: 05.10.2017.

260. Третьяков, Р.С. Методы и применение лазерной наплавки / Р.С. Третьяков, А.Я. Ставертий, А.Ю. Шишов / МГТУ им. Н.Э. Баумана. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mirprom.ru/public/metody-i-primeneniye-lazernoy-naplavki.html>. Дата доступа: 05.10.2017.

261. Yan, M. An Overview of Densification, Microstructure and Mechanical Property of Additively Manufactured Ti-6Al-4V – Comparison among Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Laser Metal Deposition and Selective Laser Sintering, and with Conventional Powder / M. Yan, P. Yu. // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.intechopen.com/books/sintering-techniques-of-materials/an-overview-of-densification-microstructure-and-mechanical-property-of-additively-manufactured-ti-6a>. Дата доступа: 05.10.2017.

262. 3D-печать металлами // [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://3dtoday.ru/wiki/3dprint_metal/ – Дата доступа: 05.10.2017.

263. Тетенькин, А.С. Основные направления внедрения аддитивных технологий в ремонтное производство вооружения, военной и специальной техники / А.С. Тетенькин // Сб. докл. Научно-практ. конф «Иннов. материалы и технологии». 18 апр. 2017 г. – С. 93-94 // [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://www.rusarmyexpo.ru> – Дата доступа: 05.10.2017.

264. Is there a Comparison Chart of different 3D printing technologies?// [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.quora.com/Is-there-a-Comparison-Chart-of-different-3D-printing-technologies..> Дата доступа: 05.10.2017.

265. Бакарджиева, С. Аддитивное производство: на пике завышенных ожиданий / С. Бакарджиева // Умное производство, № 2 (30), июль 2015 // [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=610&group_id_4=110 – Дата доступа: 05.10.2017.

266. Методика применения аддитивных технологий на этапах изготовления опытных образцов агрегатов и узлов авиационной техники / А.А. Автушенко [др.] // Вестник Брянск. гос. тех. ун-та, 2015. – №2. – С.8-16.

267. Чумаков, Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники / Д.М. Чумаков // Труды МАИ, 2014. – №78. – 22 с.

268. Осьмаков, В. Аддитивные технологии и 3D-печать: в поисках сфер применения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.forbes.ru/tehnologii/342687-additivnye-tehnologii-i-3-d-pechat-v-poiskah-sfer-primeneniya>. Дата доступа: 05.10.2017.

269. Стрельникова, Л. Складываем, а не вычитаем. О тонкостях аддитивных технологий / Л.Стрельникова. – М. : Химия и жизнь - XXI век, 2014. – № 12. – С.20-25.

270. Компания Local Motors напечатала автомобиль всего за 6 дней. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geektimes.ru/post/258772>. Дата доступа: 05.11.2016.

271. Аддитивное и гибридное производство с применением 3D-печати. Ян Ларссен. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25512136>. Дата доступа: 05.10.2020.
272. Традиционная + аддитивная // Аддитивные технологии, 2017. – №2. – С.9.
273. В США стартовали продажи металлического 3D-принтера от Mitsubishi. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://3dwiki.ru/v-ssha-startovali-prodazhi-metallicheskogo-3d-printera-ot-mitsubishi>. Дата доступа: 05.10.2017.
274. Максимов, Н.М. LENS - технология лазерной наплавки. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mirprom.ru/public/lens-tehnologiya-lazernoy-naplavki.html> – Дата доступа: 05.10.2017.
275. Баурова, Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с.
276. Антонова, В.С. Аддитивные технологии: учебное пособие / В.С.Антонова, И.И.Осовская // ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2017. -30с.
277. Брега Д.А., Лесовой М.В. Ремонт и восстановление деталей поршневой группы методом аддитивной технологии / Всеукраїнська конф. «Інноваційні розробки та молодих учених в галузі технічного сервісу машин» Харьков, 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.master2014.metalcontrol.com.ua/renovation/remont_i_vosstanovlenie_detalej_porshnevoj_gruppy_metodami_additivnoy_tekhnologii. Дата доступа: 05.10.2017.
278. Серебrenицкий, П.П. Аддитивные технологии в ремонтном производстве / П.П. Серебrenицкий, А.С. Тетенькин // Аддитивные технологии, 2017. - №4. – С. 52-53.
279. Матренин А.В., Прохорова Е.В. Перспективное развитие технологии 3D-печати в изготовлении пластмассовых запчастей для автомобилей. // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.scienceforum.ru/2016/1416/16668>. – Дата доступа: 05.10.2017.
280. Носырев, Д.Я. Применение аддитивных технологий в структуре сервисного обслуживания локомотивов / Д.Я. Носырев, А.Ю. Балакин, А.А. Свечников // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Матер. третьей всерос. научно-тех. конф. с международным участием. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – С. 11-15.
281. M. Molitch-Hou. After impressive emergency landing, Harrier Jet requires tender 3D printed care. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.3dprintingindustry.com. Дата доступа: 05.10.2017.
282. Первый космический 3D-принтер доставлен на МКС. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geektimes.ru/post/238309/>. Дата доступа: 05.10.2017.

283. NASA запустила в космос новый 3D-принтер. [Электронный ресурс]. 2016. – Режим доступа: https://vpk.name/news/152247_nasa_zapustila_v_kosmos_novyyi_3dprinter.html – Дата доступа: 05.10.2017.
284. СМИ: NASA в 2018 году отправит на МКС перерабатывающий мусор. [Электронный ресурс]. Режим доступа: 3D-принтер <http://tass.ru/kosmos/4532045>. Дата доступа: 05.10.2017.
285. Анализ методов строительства конструкций лунных станций / А.В. Багров [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2014. – №4. – С. 75-80.
286. Аддитивные технологии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: progress.institute/pdf/03.pdf. Дата доступа: 05.10.2017.
287. Технологии лазерного аддитивного производства металлических изделий. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geektimes.ru/post/218271>. Дата доступа: 05.10.2017.
288. 3D-принтер и металл – настоящее и будущее трехмерной печати металлом. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://3dtoday.ru/industry/a-3d-printer-and-metal-present-and-future-three-dimensional-printing-metal.html> – Дата доступа: 05.10.2017.
289. Аддитивные технологии и аддитивное производство. [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: http://3d.globatek.ru/world3d/additive_tech/ – Дата доступа: 05.10.2017.
290. Татоян, Г.А. Обзор международного опыта в области применения аддитивных технологий. Современный вектор: мировая экономика, менеджмент и маркетинг [Электронный ресурс] : сборник трудов международного научно-практического форума (Омск, 27–29 апреля 2016 г.) / Г.А. Татоян, С.И. Ультан, [отв. ред. О. С. Елкина]. – Электрон. текстов. дан. – Омск : Изд-во Ом. гос. ун-та, 2016. – С. 134-142.
291. Сварка без сварки. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=-LS-oFHkQFQ> . Дата доступа: 05.10.2017.
292. Степанова, Е.Ю. Аддитивные технологии в авиакосмическом и энергетическом машиностроении / Е.Ю. Степанова, М.А. Бурнашов, Ю.С. Степанов // [Электронный ресурс]. Режим доступа: oreluniver.ru/public/file/science/.../c_4_Stepanova_E_Yu.docx. Дата доступа: 5.10.2017.
293. Закончены испытания турбины Siemens с лопатками, изготовленными с применением аддитивных технологий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/4479>. Дата доступа: 5.10.2017.
294. 3D printer metal filament: Create 100% metal parts // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.makepartsfast.com/get-100-metal-parts-filament-metal-3d-printing/> – Дата доступа: 05.10.2017.
295. Аддитивные технологии 3D печати // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mozgochiny.ru/idei-dlya-biznesa/additivnyie-tehnologii-3d-pechati>. Дата доступа: 05.10.2017.
296. 3D Печать запчастей и деталей для ремонта. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dsmart.com.ua/applications/3d-printing-parts>. Дата доступа: 05.10.2017.

297. Сферы применения 3D-печати. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://allbriarey.com/3D/3D-print-application.html>. Дата доступа: 05.10.2017.
298. Создаем прототип стеклоочистителя заднего стекла автомобиля при помощи 3D-печати. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cantouch.ru/blog/3d-printed-prototype-autocleaner/>. Дата доступа: 05.10.2017.
299. Исследование возможности применения деталей из термостойких пластиков и их испытание в составе малоразмерного газотурбинного двигателя / А.В. Побелянский [и др.] // Исследования наукограда, 2017. – Том. 1. – №2. – С. 76-81.
300. Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности. Часть 2. / Л.А.Колесников [и др.] // Наука и техника, 2013. – № 6. – С. 8-16.
301. Валетов, В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы) : учеб. пособие / В.А. Валетов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 63с.
302. Леушин, И.О. Опыт применения RP-технологии для производства литейной оснастки / И.О. Леушин, А.А. Большаков // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М.Колокольцева. – Магнитогорск: Магнитогорск, гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2013. – Вып. 12. – С. 121-220.
303. 3D принтеры для литейного производства (SLS / BJ). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://неовейтис.рф/catalog/3d-printery-dlya-liteynogo-proizvodstva-sls-bj>. Дата доступа: 05.10.2017.
304. Песок как материал для 3D-печати. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://3d.globatek.ru/3d_printing_materials/sand/. Дата доступа: 05.10.2017.
305. Аддитивные технологии 3D-печати и 3D-сканирование. [Электронный ресурс]. Режим доступа: // <http://www.dipaul.ru>. Дата доступа: 05.10.2017.
306. А. Аспидова, И. Папуша. Печать по новой технологии MOVINGLIGHT. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.google.by/search?hl=en-BY&ei>. Дата доступа: 05.10.2017.
307. Абляз, Т.Р. Изготовление сложнопрофильных электродов-инструментов с применением технологии быстрого прототипирования / Т.Р. Абляз, А.А. Шумков // Вестник Перм. нац. исслед. политех. ун-та. Машиностроение, материаловедение, 2016. – Т. 18. – № 2. – С. 160-169.
308. Анализ эволюции погрешности формы электрода-инструмента с применением технологии быстрого прототипирования / А.А. Шумков [и др.]. // Вестник Перм. нац. исслед. политех. ун-та. Машиностроение, материаловедение, 2017. – Т. 19. – № 2. – С.106-117.
309. Норошьян, М.В. Изготовление технологической оснастки для электроэрозионной и электрохимической обработки методом быстрого прототипирования / М.В. Норошьян // Гагаринские чтения – 2016: XLII Междунар. молодёж. науч. конф.: Сб. тез. докл.: Т. 1: М.: Моск. авиацион. ин-т, 2016. – С. 32-33.
310. Моделирование инструмента. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.innoros.ru/innovation-idea35/ideas/modelirovanie-instrumenta>. Дата доступа: 05.10.2017.

311. Абляз, Т.Р. Применение технологии быстрого прототипирования для создания сложнопрофильных электродов-инструментов / Т.Р. Абляз // Аддитивные технологии, материалы и конструкции : матер. науч.-техн. конф. (Гродно, 5-6 окт. 2016 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. И. Свириденок(гл. ред.) [и др.]. - Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 152-156.

312. Кувшинов, К.В. Технология создания электродов-инструментов для микроэлектроэрозионной обработки : автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.02.07 / К.В. Кувшинов ; Тульский гос. ун-т. – Тула, 2012. – 16 с.

313. Ковалев, В.Д. Промышленности – аддитивные технологии / В.Д. Ковалев, Я.В. Васильченко, Б.Г. Тристан // Оборудование и инструмент для профессионалов, 2015. – №5. – С. 20-21.

314. Степанова, Е.Ю. Аддитивные и гибридные технологии в производстве инструмента и технологической оснастки: состояние, экономика, перспективы / Е.Ю.Степанова, М.А.Бурнашов, Ю.С. Степанов // Изв. Тульского гос. ун-та. Тех. науки, 2017. – №8, Ч. 1. – С. 141-143.

315. KOMET GROUP innovates cutting tools using metal 3D printing technology. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.renishaw.com/en/komet-group-innovates-cutting-tools-using-metal-3d-printing-technology--42346>. Дата доступа: 13.06.2017.

316. Mapal relies on additive manufacturing to produce insert drills. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.industrial-lasers.com/> Дата доступа: 18.09.2015.

317. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев. – М.: ФГНУ Росинформагротех, 2010. – 376 с.

318. Mudge, R.P. Laser Engineered Net Shaping Advances Additive Manufacturing and Repair / R.P.Mudge, N.R.Wald // Welding J. – Jan, 2007. – P.44-48.

319. Технология DMT дает увеличение износостойкости обрезаемых пуансонов до 300%. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dipaul.ru/pressroom/tekhnologiya-dmt-daet-uvvelichenie-stoykosti-obreznykh-puansonov-do-300/>. Дата доступа: 05.10.2017.

320. Кузьмин, Ю. А. Конструкционные и защитно-отделочные материалы в автомобилестроении : учебное пособие / Ю.А. Кузьмин. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 186 с.

321. Оценка объемов образования пластмассовых отходов при утилизации транспортно-технологических машин в воронежской области / А.Л. Тоцкий [и др.] // Воронежский научно-технический вестник, 2013. – №1(3). – С.62-64.

322. Лахно, А.В. Восстановление деталей машин из полимерных материалов / А.В.Лахно, Е.Г.Рылякин // Молодой ученый, 2014. – №8. – С.196-199.

323. Ремонт пластмассовых деталей. [Электронный ресурс]. Режим доступа: // <http://3dprint74.ru/3d-pechat/101-news/255-remont-plastmassovykh-detalej>. Дата доступа: 05.10.2017.

324. Ремонт изделий из пластика на 3D принтере. [Электронный ресурс]. Режим доступа: // <https://3ddevice.com.ua/remont-izdelii-iz-plastika-servis/>. Дата доступа: 05.10.2017.

325. Зачем дома нужен 3D принтер. [Электронный ресурс]. Режим доступа: // <https://image.slidesharecdn.com/zachemdoma3dp1-150615152223-1va1-app6892/95/3d-10-638.jpg?cb=1434443751>. Дата доступа: 05.10.2017.

326. 3D принтер в ремонте автомобиля Mitsubishi. [Электронный ресурс]. Режим доступа: // <https://mplast.by/novosti/2017-09-29-3d-printer-v-remonte-avtomobilya-mitsubishi/>. Дата доступа: 05.10.2017.

327. Гальвас А., Бреев А., Лаптев В. Возможности применения 3D-принтера в области машиностроения / Матер. Межвуз. студ. конф. «Конституция Республики Казахстан – правовой феномен современности». 2015. – С. 70-73 // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://repository.nkzu.kz/5207/>. Дата доступа: 12.11.2017.

328. Шкуро, А.Е. Технологии и материалы 3D-печати. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). –99 с.

Авторский коллектив:

Шило Иван Николаевич - ректор Белорусского государственного аграрного технического университета, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники;

Толочко Николай Константинович - профессор кафедры «Технологии и организация технического сервиса» Белорусского государственного аграрного технического университета, доктор физико-математических наук, профессор;

Романюк Николай Николаевич - первый проректор Белорусского государственного аграрного технического университета, кандидат технических наук, доцент;

Войнаш Сергей Александрович - ООО «РЕССА», начальник отдела по патентной и изобретательской работы;

Соколова Виктория Александровна - заведующий кафедрой Математических методов в управлении Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент;

Партко Светлана Анатольевна - доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета, кандидат технических наук;

Лучинович Анастасия Александровна - ассистент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина;

Тимофеев Евгений Всеволодович - старший научный сотрудник лаборатории «Экология в энергообеспечении сельскохозяйственного производства», Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, кандидат технических наук;

Эрк Андрей Федорович - заведующий лабораторией «Экология в энергообеспечении сельскохозяйственного производства», ведущий научный сотрудник, Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, кандидат технических наук.

Для заметок

Для заметок

Научное издание

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА В
АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Авторский коллектив:

И. Н. Шило, Н. К. Толочко, Н. Н. Романюк, С. А. Войнаш, В. А.
Соколова, С. А. Партко, А. А. Лучинович, Е. В. Тимофеев, А. Ф. Эрк

Рецензенты:

Кокиева Г.Е. – доктор технических наук

Мельберт А.А. – доктор технических наук

Подписано в печать 26.04.2021 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага книжно-журнальная. Гарнитура «Таймс».

Усл. печ. л. 15,11 Тираж 300 экз.

Издательство ИАЭП

196625, Санкт-Петербург, Тярлево
Фильтровское шоссе, 3.