

Ю. Н. Полянчиков, А. Г. Схиртладзе, А. Н. Воронцова,
М. Ю. Полянчикова, М. А. Тибиркова, Ю. И. Сидякин, А. А. Кожевникова

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ю. Н. Полянчиков, А. Г. Схиртладзе, А. Н. Воронцова,
М. Ю. Полянчикова, М. А. Тибиркова, Ю. И. Сидякин, А. А. Кожевникова

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Учебное пособие

«Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»



Волгоград

2015

УДК 621.9.047: 677.052

Рецензенты:

кафедра «Технология строительного производства», заведующий кафедрой, проректор по учебной работе Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета доктор технических наук, профессор О. В. Бурлаченко;

доктор технических наук, профессор кафедры «Теории и методики трудового обучения и воспитания» Волгоградского государственного социально-педагогического университета А. М. Каунов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении: учеб. пособие / Ю. Н. Полянчиков, А. Г. Схиртладзе, А. Н. Воронцова, М. Ю. Полянчикова, М. А. Тибиркова, Ю. И. Сидякин, А. А. Кожевникова. – ВолГТУ, Волгоград, 2015. – 240 с.

ISBN 978-5-9948-1836-7

Соответствует программе курса «Электрохимические и электрофизические методы обработки». Рассмотрены физические основы электроэрозионной обработки, разновидности электрофизических методов обработки, физические основы электрохимической обработки и примеры ее применения. Приведены примеры и технологические возможности электрохимических, электрофизических и комбинированных методов обработки в современном машиностроении.

Предназначено для магистров по направлению 151900.68 «Конструкторско - технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Ил. 28. Табл. 9. Библиогр.: 9 назв.

ISBN 978-5-9948-1836-7

© Волгоградский государственный
технический университет, 2015

© Ю. Н. Полянчиков, А. Г. Схиртладзе,
А. Н. Воронцова, М. Ю. Полянчикова,
М. А. Тибиркова, Ю. И. Сидякин,
А. А. Кожевникова

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ (ЭЭО)	6
1.1. Возникновение метода ЭЭО и его разновидности. Научная терминология в области ЭЭО	6
1.2. Общая характеристика методов ЭЭО	14
1.3. Теория процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО)	20
1.4. Электрический разряд в жидком диэлектрике. Пробой рабочей среды	22
1.5. Электрический разряд в жидком диэлектрике. Разновидности рабочих разрядов	25
1.6. Первоначальное расширение канала разряда и создание газового пузыря	26
1.7. Процессы в столбе канала разряда	30
1.8. Эмиссия электронов с катода и поступление энергии на катод	33
1.9. Поступление энергии на анод	34
1.10. Тепловые задачи для электродов	37
1.11. Движение рабочей среды в межэлектродном промежутке (МЭП) и захват продуктов эрозии	42
ГЛАВА 2. РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ	45
2.1. Электроискровая обработка	45
2.4. Электронно-лучевая обработка	50
2.6. Ультразвуковая обработка	53
2.7. Электроискровое легирование. Сущность. Классификация методов. Контактное легирование	55
2.8. Метод бесконтактного электроискрового легирования. Наложение электрического и магнитного полей. Электроискровое легирование в электролитной плазме	59
2.9. Совмещенное упрочнение	62
2.10. Физические основы плазменной обработки	63
ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ (ЭХО) И ПРИМЕРЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ	74
3.1. Разновидности ЭХО	74
3.2. Теория ЭХО. Электродные процессы	75
3.3. Катодные процессы	79
3.4. Анодные процессы	81
3.5. Гидродинамические процессы при ЭХО	83

3.6. Химические реакции в потоке при ЭХО. Перенос теплоты в МЭП	86
3.7. Подбор раствора при ЭХО	87
3.8. Выход по току при ЭХО	90
3.9. Виды ЭХО: ЭХшлифование, ЭХшлифование- полирование, ЭХглянцевание, ЭХполирование	92
3.10. Электрохимическая размерная обработка (ЭХРО)	94
3.11. Анодно-механическая обработка	96
3.12. Оборудование для ЭХразмерной обработки	98
3.13. Типовые операции ЭХ размерной обработки	102

ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ	105
4.1. Современные достижения электрохимических и электрофизических методов обработки	105
4.2. Комбинированные электрофизикохимические процессы обработки	113
4.3. Повышение срока службы деталей машин с помощью комбинированных электротехнологических методов	120
4.4. Прогрессивные электрофизические методы модификации инструментальных твердых сплавов	129
4.5. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин лазерным модифицированием	136
4.6. Физические методы упрочнения режущего инструмента	140
4.7. Влияние лазерной обработки, карбонитрации и сочетания с вакуумно-плазменным покрытием TiN некоторые свойства стали Р6М5	143
4.8. Лазерная обработка материалов: возможности, перспективы	153
4.9. Современные методы быстрого прототипирования с применением лазерного излучения	159
4.10. Применение лазеров в механической обработке	172
4.11. Лазерная технология обработки материалов	183
4.12. Особенности лазерно-механической обработки инструментом, оснащенным твердым сплавом и синтетическими сверхтвердыми материалами	193
4.13. Эффективность использования электронно-лучевых технологий при изготовлении и двигателей внутреннего сгорания	206
4.14. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности	212

4.15. Особенности ультразвукового алмазного выглаживания	215
4.16. Перспективы применения ионно-плазменных технологий в машиностроении	220
4.17. Эффективность использования режущего инструмента с ионно-плазменным покрытием	227
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	239

ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ (ЭЭО)

1.1. Возникновение метода ЭЭО и его разновидности. Научная терминология в области ЭЭО

В науке и технике явление электроэрозии т. е. разрушения контактов под действием электрических разрядов, было известно очень давно.

Еще в XVIII веке английским ученым Дж. Пристли было описано явление эрозии металлов под действием электрического тока.

Было замечено, что при разрыве электрической цепи в месте разрыва возникает искра или более продолжительная электрическая дуга.

Причем искра или дуга оказывает сильное разрушающее действие на контакты разрываемой цепи, называемое электроэрозией.

Возникновение искры или дуги во время разрыва электрической цепи можно постоянно наблюдать в жизни.

Так, они образуются при случайном размыкании троллейбусного провода, при плохих контактах в приборах, когда вынимают вилку из розетки и т. д.

На электростанциях, где величина тока достигает колоссальных значений, для гашения возникающей дуги применяются специальные выключатели, в которых цепь разрывается в среде масла.

Разрушение контактов под действием электроэрозии очень вредное явление.

Над этой проблемой в годы великой отечественной войны работали Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко.

Устранить разрушение контактов была главная цель их исследований.

С электроэрозией контактов они боролись всеми возможными путями: применяли в качестве электродов тугоплавкие материалы (вольфрам,

молибден), пытались снизить эрозию, помещая контакты в жидкий диэлектрик – трансформаторное масло, однако от этого эффект был обратный – в жидком диэлектрике контакты разрушались еще больше.

Однако при этом ученые заметили, что помещая электроды в жидкий диэлектрик и размыкая цепь, после первых же искр жидкость мутнела. Анализ жидкости показал, что в ней содержатся мелкие металлические шарики.

Провели следующий опыт. В качестве электрод-инструмента взяли стержень небольшого диаметра и подсоединили к минусу источника постоянного тока. В качестве электрода-анода взяли достаточно широкую пластину. Включили электроды в электрическую цепь и стали сдвигать до соприкосновения, а затем раздвинули. И при этом обнаружили, что электрод-катод провалился через электрод-анод; при этом контур отверстия, образованный в аноде, точно соответствовал контуру катода.

Открытие этого способа имело в металлообработке колоссальное значение.

За это оба Лазаренко были удостоены Государственной премии СССР.

Считается, что метод ЭЭО открыт в 1943г. До 50-х годов в промышленности использовали RC-генераторы, которые обеспечивали протекание исключительно искровых разрядов. Это обстоятельство привело к тому, что ЭЭО стали называть *электроискровой обработкой*.

В начале 50-х годов в результате совместных работ ЭНИМСа, ОКБ станкостроения и Харьковского политехнического института была создана серия специальных генераторов импульсов, с помощью которых при ЭЭО можно использовать кратковременные искродуговые и дуговые электрические разряды.

Использование таких генераторов привело к появлению разновидности ЭЭО – *электроимпульсная обработка*.

Развитие ЭЭО привело к появлению таких процессов, как обработка непрофилированным электродом-инструментом, обработка по методу обратного копирования и другие.

Были разработаны технологические процессы ЭЭО деталей основного машиностроительного и инструментального производств.

Было создано универсальное и специальное оборудование для ЭЭО.

Научная терминология в области ЭЭО. Поскольку электроэрозионная обработка металлов существенно отличается от традиционных методов механической обработки, в этой области применяются специфические термины. В связи с новизной разработок и отсутствием единой терминологии одни и те же понятия в технической документации и литературе зачастую фигурируют под разными названиями, а многие термины трактуются авторами неоднозначно или смешиваются (например, «межэлектродный зазор» и «межэлектродный промежуток», понятия бокового и торцового зазоров, многоэлектродной и многоконтурной обработки и др.).

Иностранные фирмы в рекламных целях дают своим разработкам новые названия (нередко новое название вводится, чтобы замаскировать отсутствие технической новизны в способе или устройстве), которые через переводные издания входят в употребление у нас и вызывают путаницу. В связи с указанными обстоятельствами в экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков. (ЭНИМС) разработана и ниже излагается система единых научно-технических терминов и определений, характеризующих основные понятия в области ЭЭО. Для каждого понятия установлен один термин, для ряда терминов установлены их краткие формы и аббревиатуры, которые можно применять в тех случаях, когда исключена возможность их различного толкования. Термины и определения приводятся ниже в окончательной редакции, согласованной ведущими организациями и специалистами для включения в систему государственных терминологических стандартов. Слева помещены термины

(под некоторыми из них дается краткая форма термина и аббревиатура), справа приводятся определения термина. Приведенные термины и определения не должны восприниматься в отрыве от понятий из других областей техники. В особенности близки к ЭЭО понятия из таких областей, как электротехника и обработка металлов резанием. Поэтому в приведенных определениях использованы понятия, однозначно сформулированные в терминологических стандартах в электротехнике (импульс тока, напряжение и др. по ГОСТ 19880–74), абразивной обработке (шлифование, доводка и др. по ГОСТ 23505–79), числовом программном управлении станками (ГОСТ 20523–80) и др., составляющих единую взаимосвязанную систему понятий и научно-технических терминов, обязательных для применения в документации, научно-технической, учебной и справочной литературе.

1. *Электрическая эрозия* – разрушение поверхности электродов, сопровождающееся съемом металла, при прохождении между электродами электрических разрядов.
2. *Электроэрозионная обработка, ЭЭО* – обработка, заключающаяся в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под действием электрических разрядов в результате электрической эрозии.
3. *Электрод-инструмент, электрод, ЭИ* – электрод, являющийся при обработке инструментом.
4. *Электрод-заготовка, заготовка, ЭЗ* – электрод, являющийся при обработке заготовкой.
5. *Межэлектродный промежуток, промежуток, МЭП* – пространство, заключенное между взаимодействующими поверхностями электрода-инструмента и электрода-заготовки при обработке.
6. *Рабочая среда* – вещества, заполняющие межэлектродный промежуток во время обработки.
7. *Рабочая жидкость* – жидкость, поступающая в межэлектродный

промежуток.

8. *Межэлектродный зазор, зазор, МЭЗ* – расстояние в рассматриваемом месте межэлектродного промежутка между поверхностями электрода и заготовки, измеренное по нормали к обрабатываемой поверхности.
 9. *Торцовый межэлектродный зазор, торцовый зазор* – зазор между противоположными участками поверхности электрода-инструмента и электрода-заготовки, перпендикулярными к направлению движения подачи.
- Примечание. Движение подачи – это движение электрода-инструмента или заготовки для распространения обработки на всю поверхность, подлежащую обработке.
10. *Боковой межэлектродный зазор, боковой зазор* – зазор между противоположными участками поверхности электрода-инструмента и электрода-заготовки, параллельными направлению движения подачи.
 11. *Обрабатываемая поверхность* – часть поверхности электрода-заготовки, на которую во время электроэрозионной обработки воздействуют электрические разряды.
 12. *Рабочий импульс* – импульсный разряд, производящий съем металла вследствие электрической эрозии и характеризующийся прохождением через межэлектродный промежуток импульса электрического тока под напряжением, вмещающимся за время импульса.
 13. *Импульс поджига* – импульс напряжения, способствующий пробоем межэлектродного промежутка.
 14. *Холостой импульс* – импульс напряжения, не вызвавший электрического разряда межэлектродном промежутке.
 15. *Импульс тока короткого замыкания, импульс КЗ* – импульс электрического тока, проходящий через соприкоснувшиеся электрод-инструмент и электрод-заготовку.
 16. *Лунка* – углубление на поверхности электрода или заготовки, обра-

зующееся в результате воздействия электрического разряда.

17. *Зона термического влияния* – поверхностный слой металла заготовки или электрода-инструмента с измененными в результате теплового воздействия при электроэрозионной обработке структурой и свойствами.

18. *Толщина поверхностно-упрочненного слоя* – кратчайшее расстояние от поверхности материала или заготовки до условной поверхности, точки которой соответствуют заданному значению параметра сопротивляемости материала или заготовки разрушению или остаточной деформации.

19. *Скорость съема* – отношение количества материала, снятого с заготовки, к интервалу времени, за которое он удаляется в результате электроэрозионной обработки.

20. *Износ электрода, износ* – количество материала электрода-инструмента, отделившееся при электроэрозионной обработке.

21. *Относительный износ электрода* – отношение износа электрода к количеству материала, удаляемого за это же время с заготовки.

Примечание. В зависимости от выражения количества материала в единицах объема, массы или длины различают относительный объемный, относительный массовый и относительный линейный износы.

22. *Режим электроэрозионной обработки, режим* – совокупность значений параметров, при которых выполняется электроэрозионная обработка.

23. *Прокачка рабочей жидкости, прокачка* – принудительная подача рабочей жидкости в межэлектродный промежуток.

24. *Релаксация электрода, релаксация* – периодически повторяющийся принудительный отвод и подвод электрода для промывки межэлектродного промежутка.

25. *Наростообразование* – образование на поверхности электрода-инструмента или электрода-заготовки локального нароста, препятствующего продолжению обработки.

26. *Шлам* – осадок, образующийся в рабочей жидкости при электроэрозионной обработке.

Виды электроэрозионной обработки

27. *Комбинированная электроэрозионная обработка* – электроэрозионная обработка, выполняемая одновременно с другими видами обработки.

28. *Электроэрозионнохимическая обработка, ЭЭХО* – комбинированная электроэрозионная обработка, осуществляемая одновременно с электрохимическим растворением материала заготовки в электролите.

29. *Электроэрозионная абразивная обработка* – абразивная обработка с использованием электроэрозионного разрушения металла.

30. *Электроэрозионное упрочнение* – электроэрозионная обработка, в результате которой увеличивается прочность поверхностного слоя заготовки.

31. *Электроэрозионное объемное копирование, объемное копирование* – электроэрозионная обработка, заключающаяся в отображении на заготовке поверхности электрода-инструмента

32. *Электроэрозионное прошивание, прошивание* – электроэрозионная обработка, при которой электрод-инструмент, углубляясь в заготовку, образует отверстие постоянного сечения.

33. *Электроэрозионное маркирование, маркирование* – электроэрозионная обработка, в результате которой на заготовку наносится маркировка.

34. *Электроэрозионное вырезание, вырезание* – электроэрозионная обработка, при которой электрод-инструмент в виде непрерывно перематываемой проволоки в результате движения подачи осуществляет обход заготовки по определенной траектории, образуя поверхность заданного контура.

35. *Электроэрозионная отрезка, отрезка* – электроэрозионная обработка, в результате которой заготовка разделяется на части.

36. *Электроэрозионное шлифование* – шлифование с использованием

электроэрозионного разрушения металла.

37. *Электроэрозионная доводка* – доводка с использованием электроэрозионного разрушения металла.

38. *ЭЭО с прямой полярностью* – электроэрозионная обработка, при которой электрод-инструмент подключается к отрицательному зажиму генератора импульса, электрод-заготовка – к положительному.

39. *ЭЭО с обратной полярностью* – электроэрозионная обработка, при которой электрод-инструмент подключается к положительному зажиму генератора импульса, электрод-заготовка – к отрицательному.

40. *Многоэлектродная электроэрозионная обработка, многоэлектродная обработка* – электроэрозионная обработка, осуществляемая электродами, подключенными к общему источнику питания электрическим током, находящимися во время обработки под одним потенциалом.

41. *Многоконтурная обработка* – электроэрозионная обработка, осуществляемая одновременно электродами, изолированными друг от друга и входящими в автономные электрические цепи с отдельным питанием их током.

Примечание. Вместо отдельных электродов может быть один электрод, составленный из изолированных частей.

Средства технологического оснащения электроэрозионной обработки

42. *Электроэрозионный станок* – технологическая машина для электроэрозионной обработки. Примечание. Под технологической машиной понимается машина, предназначенная для преобразования обрабатываемого предмета — преобразования, заключавшееся в изменении размеров предмета, его формы, свойств или состояния.

43. *Электроэрозионный копировально-прошивочный станок, копировально-прошивочный станок* – электроэрозионный станок, осуществляю-

щий объектное копирование и прошивание.

44. *Электроэрозионный вырезной станок, вырезной станок* – станок, осуществляющий электроэрозионное вырезание.

45. *Электроэрозионный отрезной станок, отрезной станок* – станок, осуществляющий электроэрозионную отрезку.

46. *Электроэрозионный шлифовальный станок, шлифовальный станок* – станок, осуществляющий электроэрозионное шлифование.

47. *Электроэрозионный станок с числовым программным управлением (ЧПУ)* – электроэрозионный станок, на котором управление режимами обработки и (или) перемещение рабочих органов производится системой ЧПУ.

48. *Электроэрозионный станок с адаптивным управлением* – электроэрозионный станок, система управления которого обеспечивает автоматическое приспособление режима работы станка к изменяющимся условиям обработки.

49. *Регулятор подачи электроэрозионного станка, регулятор* – автоматическое устройство, управляющее движением электрода-инструмента или заготовки для поддержания межэлектродного зазора, обеспечивающего ЭЭО.

50. *Генератор импульсов электроэрозионного станка, генератор, ГИ* – источник питания электроэрозионного станка периодическим импульсным электрическим током.

1.2. Общая характеристика методов ЭЭО

Процессы обработки предназначены только для съема металла заготовки, формообразование в любом случае необратимо, удаленный припуск невозможно восстановить.

Для съема металла необходимо дополнительно подать электроэнергию, чтобы разорвать связи между частицами обрабатываемого твердого тела.

Электрическая энергия преобразуется в энергию иных видов, обеспечивающих съём металла. Удаляемое вещество заготовки («стружка») переходит в пар или расплав.

Непосредственным воздействием на заготовку, обеспечивающим собственно размерную обработку и переход материала из твердого состояния в стружку, является перепад удельных энтальпий вещества (энтальпия-теплосодержание), вызывающий импульсный тепловой поток, который через определенный промежуток времени поступает на небольшие участки поверхности заготовки и, создавая потоки пара и жидких частиц, образует так называемые лунки.

Для любого процесса необходимы два электрода, один из которых называется электрод-инструмент, а второй – электрод-заготовка.

Заготовка и инструмент не касаются друг друга и отделены межэлектродным промежутком, который заполнен соответствующей рабочей средой (МЭП).

Свойства рабочей среды определяют основные черты процесса обработки. Рабочая среда находится в специальном баке или в ванне. Продукты обработки и стружка, выводимые из промежутка, с течением времени накапливаются в рабочей среде ограниченного объема, многократно используемого для обработки большого количества заготовок.

Загрязнение ухудшает свойства рабочей среды и сказывается на показателях обработки. Меняется не только состав рабочей среды, но и ряд ее параметров.

В частности, протекание электрического тока через МЭП сопровождается выделением джоулевой теплоты и нагреванием рабочей среды. Поэтому стабилизация свойств рабочей среды, вводимой в МЭП – задача, часто встречающаяся на практике.

Отвод продуктов обработки и теплоты из МЭП происходит благодаря протеканию рабочей среды вдоль электродов. Такое движение может быть естественным или принудительным, от насоса.

Для перемещения в МЭП рабочей среды необходимо затратить энергию, идущую на преодоления трения вязкой среды о поверхности электродов.

В любом случае сужение МЭП при прочих одинаковых условиях ведет к росту энергетических затрат на перемещение рабочей среды и, следовательно, замедлению ее движения, понижению скорости отвода продуктов обработки и теплоты у промежутка.

Поэтому сужение МЭП, необходимое для увеличения точности обработки, приводит к снижению производительности.

Различают три вида МЭП:

1) параллельный, образованный двумя параллельными плоскостями обоих электродов;

2) квазипараллельный, ограниченный неплоскими поверхностями электродов, локально параллельных друг другу;

3) сложной формы, признаком которого служит то, что наикратчайшие расстояния между электродами сравнимы с радиусами кривизны обеих поверхностей.

Для параллельного и квазипараллельного МЭП существует понятие зазора «а», под которым подразумевают наикратчайшее расстояние от некоторой точки на поверхности одного из электродов до поверхности другого.

Если МЭП узкий, то может применяться ЭИ, имеющий точно такую же поверхность, которую требуется получить у детали.

Инструмент здесь называют *некорректированным*, а процесс формообразования – простым отображением или копированием. Когда МЭП достаточно широкий, то для компенсации погрешностей отображения используют *корректированный* ЭИ с конфигурацией не такой, как у детали.

С точки зрения временных особенностей возможны два идеальных типа

поверхностей ЭЗ:

а) нестационарная, которая в системе координат, жестко связанной с инструментом, меняется во времени;

б) стационарная, т. е. постоянная во времени в системе координат, связанной с ЭИ.

Конфигурация самого МЭП в первом случае переменная, а во втором – постоянная.

Обычно встречаются поверхности заготовки смешанного типа, часть которых стационарная, а часть – нет.

Собственно процесс бесконтактного формообразования описывается местной линейной скоростью съема, знание которой очень важно для анализа возможностей того или другого метода обработки.

Для параллельного или квазипараллельного МЭП при неизменных условиях процесса местная величина линейной скорости съема зависит от местного зазора:

$$\omega_3 = f(a).$$

Каждый процесс соответственно конкретному механизму съема описывается своей функцией « f », примерный механизм которой отображен на рис. 1.1.

Всегда при ЭЭО наблюдается уменьшение скорости съема с увеличением зазора.

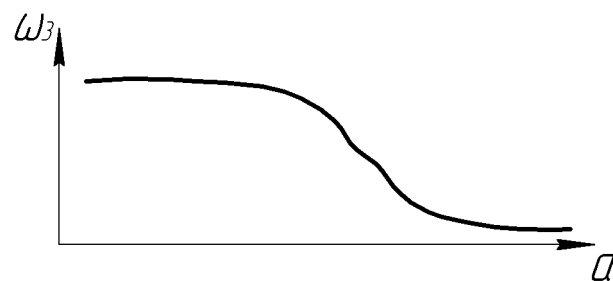


Рис. 1.1. Влияние величины местного зазора (a) на величину линейной скорости съема (ω_3)

Конечными критериями качества процесса являются: отклонение размеров детали от чертежа, разность между полученной и заданной глубиной поверхностного измененного слоя, несовпадение достигнутого и требуемого классов шероховатости.

Цель процесса обработки:

1) достижение конечных критериев в пределах допусков;

2) производство годной детали оптимальным путем, т.е. при наименьшем значении так называемого интегрального критерия качества процесса (например, времени обработки, расхода энергии и т.д.)

Условия ЭЭО определяются группами величин, описывающих физико-химические свойства инструмента, физико-химические свойства заготовки, геометрические свойства МЭП, скорость относительного перемещения электродов, свойства рабочей среды, принудительное движение рабочей среды в МЭП (например, давление на входе), приложенное к электродам напряжение.

Нахождение оптимального процесса обычно разбивают на 2 этапа.

На первом предварительно определяют основные условия проведения процесса, в том числе, выбирают рабочую среду, характер движения электродов, материал и конфигурацию инструмента, источник питания.

Для этих целей часто используют математическое планирование эксперимента.

Второй этап – это управление процессом, т. е. режимами обработки. Управляющими обычно являются величины, описывающие напряжение на электродах, принудительное движение рабочей среды и скорость относительного перемещения электродов.

На практике управление оказывается разомкнутым (без обратной связи) как по качеству поверхности, так и конфигурации всей заготовки ввиду трудности текущего измерения.

В каждом конкретном случае применяют лишь прямые или косвенные

способы измерения зазоров на одном или нескольких участках МЭП.

Необходимость управления процессом ЭЭО вызвано несколькими причинами. Прежде всего, соответственно съему металла ЭЗ требуется перемещать ЭИ, чтобы восстановить оптимальную конфигурацию МЭП, избегая при этом коротких замыканий между электродами и вообще нестабильности процесса.

Управление применяют также и потому, что некоторые свойства процесса зависят от площади обрабатываемой поверхности или глубины внедрений инструмента в заготовку, т. е. от нестационарной конфигурации МЭП, что объясняется влиянием выведения продуктов и теплоты из МЭП.

Третья причина применения управления – нестабильность свойств рабочей среды, требующая соответствующего изменения режимов обработки.

Задание двух типов критериев качества процесса (конечных и интегральных) в общем случае позволяет всю длительность обработки разбить на следующие стадии:

1) предварительная – в начале обработки, когда влияние конечных критериев на процесс не ощутимо и управление ведется только по интегральному критерию;

2) промежуточная – после окончания предварительной стадии, когда наряду с интегральными критериями следует уже учитывать предстоящее окончание процесса и необходимость достижения конечных критериев;

3) заключительная (наиболее важная) – в конце обработки, когда управление ведется только с целью достичь конечных критериев.

Если условия обработки стабилизированы, то применяют программное оптимальное управление. В меняющихся условиях иногда используют частный вид управления - регулирование, т. е. поддержание какой-либо величины (обычно зазора) на постоянном уровне.

Поскольку регулирование не всегда наилучший режим, то оператор управляет процессом по текущим показаниям приборов. В последние годы

появились автоматические, так называемые адаптивные системы оптимального управления ЭЭО.

1.3. Теория процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО)

Рабочей средой служит непроводящая жидкость (масло, керосин) заполняющая МЭП. Когда импульсное напряжение между анодом 1 (рис. 1.2) и катодом 2 достигает определенной величины, происходит электрический пробой жидкости. В последней возникает плазменный канал разряда 3, где протекают процессы нагревания, распада и ионизации вещества рабочей среды.

Между электродами через канал переносится электрический заряд, в плазме выделяется джоулева теплота, а переход зарядов через границу между плазмой и электродами сопровождается поступлением импульсных тепловых потоков на анод и катод.

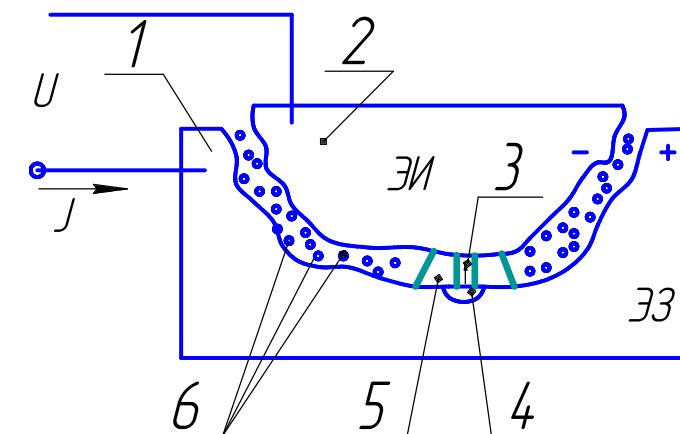


Рис.1.2. Зона обработки:

1 – анод; 2 – катод; 3 – канал разряда; 4 – лунка; 5 – газовый пузырь;
6 – частицы продуктов обработки.

Материал ЭЗ из лунки 4 выбрасывается в МЭП. Благодаря выделению джоулевой теплоты канал разряда окружается газообразными продуктами распада рабочей среды – газовым пузырем 5. Стенки расширяющегося пузыря выталкивают из МЭП рабочую среду, поток которой увлекает частицы 6, ранее

выброшенные из лунок, и выводит их из промежутка. Так возникает явление *электрической эрозии*.

Далее на электроды с генератора импульсов (ГИ) поступают периодические импульсы напряжения (рис. 1.3).

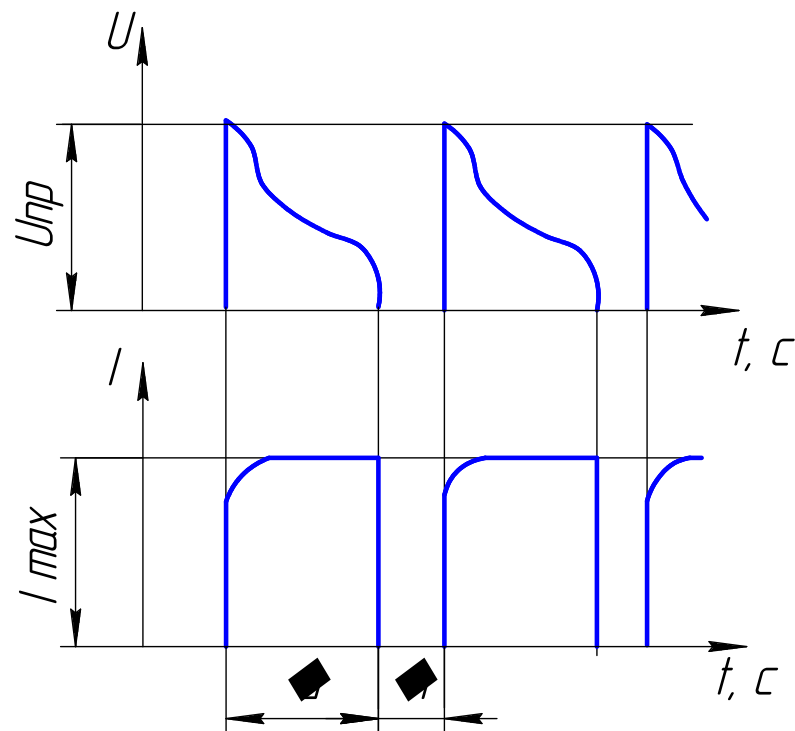


Рис. 1.3. Форма импульсов напряжения и тока:

$\tau_{\text{и}}$ – продолжительность импульса, $\tau_{\text{п}}$ – продолжительность паузы между импульсами, $U_{\text{пр}}$ – величина пробойного напряжения, J_{max} – величина максимального тока

Если подобрать паузу между импульсами так, чтобы завершилась деионизация вещества в канале, то каждый раз на заготовке будет возникать новая лунка.

Каждый последующий разряд на заготовке будет возникать в тех условиях, которые остались после предыдущего разряда, и он возникает на другом участке МЭП, где в данный момент электрическая прочность рабочей среды наименьшая.

После многократных разрядов постепенно удаляется верхний слой заготовки, МЭП повышается и при неизменном значении напряжения уже не

происходит электрического пробоя. Для продолжения обработки электроды должны быть сближены.

Таким образом, электроэрозионное формообразование является итогом последовательного возникновения на ЭЗ большого количества лунок.

Соответственно импульсам напряжения через МЭП проходит ток разряда – i .

Применяют два способа включения электродов:

- а) прямая полярность, когда электрод-инструмент является катодом;
- б) обратная полярность, когда электрод-инструмент является анодом.

При прямой полярности наблюдается высокая скорость съема материала заготовки и наименьший износ электрода инструмента.

1.4. Электрический разряд в жидком диэлектрике.

Пробой рабочей среды

Разряд начинается с электрического пробоя МЭП. Несмотря на существование большого количества теорий пробоя, среди них нет пока такой, которая объяснила бы все наблюдающиеся при ЭЗО закономерности.

Наиболее простая и убедительная теория, учитывающая ударную ионизацию.

Как известно, в диэлектрике имеются немногие свободные электроны, которые на энергетической диаграмме располагаются в зоне проводимости, причем для перевода их из атома в такое состояние требуется работа, равная ширине запрещенной зоны.

Созданию области электропроводности должно предшествовать превращение диэлектрика в проводник (это и происходит во время пробоя), для чего необходимо резко повысить местную концентрацию свободных электронов, оторвав их от атомов. При определенной пробивной напряженности электрического поля ($E_{\text{пр}}$) свободный электрон,двигающийся к

аноду, может набрать между двумя столкновениями энергию, достаточную для ударной ионизации встречного атома, т. е. для отрыва от него валентного электрона, наименее прочно связанного с ядром.

Вырванный из атома электрон, ставший также свободным, ускоряется в поле вместе с первым электроном, и оба при очередном соударении с новыми атомами образуют еще два свободных электрона, т. е. электропроводная область в рабочей среде может быть создана ударной лавинообразной ионизацией атомов электронами, причем довольно быстро (10^{-7} с).

При величине зазора «а» на плоские электроды для пробоя идеально чистой жидкости достаточно подать *пробивное напряжение* $U_{пр} = a \cdot E_{пр}$. Например, в очищенном керосине для зазора 0,05 мм и $U_{пр} = 160$ В, чему соответствует пробивная напряженность электрического поля $E_{пр} = 3,2 \cdot 10^6$ В/м.

Два обстоятельства позволяют в условиях ЭЭО при малых напряжениях получить местные напряженности поля, приводящие к пробую.

Во-первых, этому способствует шероховатость поверхности электродов: случайное распределение местных микронеровностей может уменьшить наикратчайшие расстояния между электродами, а к тому же вблизи острых выступов на поверхности местная напряженность поля очень велика.

Во-вторых, пробивное напряжение значительно уменьшается, поскольку рабочая среда содержит мелкие газовые, твердые и жидкие включения.

Напряжение пробоя является вероятностной величиной. Теоретически очень сложно для ЭЭО рассчитать среднее пробивное напряжение ($U_{пр.ср}$), которое зависит от среднего зазора, микрогеометрии поверхностей электродов и содержания примесей, т.е. в конечном счете определяется режимом обработки и положением точки измерения в МЭП.

Исследования показали, что при прочих равных условиях среднее пробивное напряжение ($U_{пр.ср}$) линейно растет с увеличением зазора и па-

дает с повышением содержания частиц в рабочей среде. Зная величину $U_{пр.ср}$, можно задать необходимую амплитуду импульса напряжения. Любой ГИ имеет конечное внутреннее сопротивление и характеризуется максимальным значением напряжения холостого хода $U_{о.мах}$.

При использовании такого ГИ зазор не превышает значения $a_{мах}$, которое в данных условиях соответствует пробивному напряжению, равному $U_{о.мах}$.

В тех случаях, когда текущий зазор меньше $a_{мах}$, заведомо произойдет пробой, а при $a > a_{мах}$ наибольшего напряжения данного ГИ уже не достаточно для пробоя и ЭЭО не происходит.

Стадией пробоя устанавливается зазор для всех процессов после разряда, а в итоге данной стадией определяются точность обработки и условия удаления продуктов из МЭП, а значит, и производительность.

Зазор, в свою очередь, определяется режимом обработки, в том числе, и электрическим.

Зависимость зазора от режимов теоретически пока не рассчитывается.

Наблюдается четкая тенденция возрастания зазора с увеличением энергии импульса или средней мощности ГИ.

В первом приближении можно принять, что зазор примерно постоянен по всему МЭП; такой зазор называют *эквидистантным*. Строго говоря, в разных участках МЭП зазор неодинаков, что объясняется влиянием на местное пробивное напряжение накопленных в промежутке продуктов обработки, и направления прокачки рабочей среды.

После пробоя весь последующий разряд называют *рабочим*, поскольку после него возникает лунка, которая соответствует некоторым номинальным средним условиям ЭЭО.

Признаками такого разряда являются: пик напряжения на переднем фронте импульса; последующие спад напряжения и увеличение тока.

Однако не всегда осуществляется такой нормальный пробой, и могут

происходить следующие явления:

1) отсутствие пробоя, когда наблюдаются так называемые импульсы напряжения холостого хода (ток отсутствует), что свидетельствует о большом зазоре или недостаточно высоком напряжении ГИ;

2) совмещение в пространстве предыдущего и последующего разрядов, что обычно происходит, когда пауза между импульсами мала; поскольку на заготовке нет пространственного переноса лунок, то нарушается сам принцип электроэрозионного формообразования;

3) короткое замыкание электродов через микронеровности на их поверхностях или частицы стружки, при этом благодаря малому сопротивлению МЭП напряжение невелико, а ток большой, но обработка заготовки отсутствует;

4) пробой газовой, но не жидкой фазы, характеризующийся малым объемом лунки, возникающей на ЭЗ.

1.5. Электрический разряд в жидком диэлектрике.

Разновидности рабочих разрядов

После пробоя в рабочей среде формируется *канал разряда* – сравнительно узкая цилиндрическая область, которая заполнена нагретым веществом, содержащим ионы и электроны, т. е. плазмой.

Канал стремится расшириться, вытеснив окружающую диэлектрическую жидкость.

По особенности механического движения в жидкости различают следующие одна за другой стадии разрядов:

1) стадия, когда частицы среды смещаются в результате прохождения ударной волны;

2) стадия, когда жидкость движется как несжимаемая среда.

В первые мгновения разряда наибольшей кинетической энергией, т. е.

температурой, обладают легкие подвижные электроны, которые еще не успели путем столкновения привести в движение более массивные, инерционные ионы и нейтральные частицы: электроны оказываются «горячими», а ионы – «холодными».

Благодаря многочисленным столкновениям температуры легких и тяжелых частиц стремятся выровняться.

По соотношениям температур частиц в плазме различают такие стадии разряда:

а) неизотермическую, где $T_{\text{э}} \gg T_{\text{ион}}$; $T_{\text{э}} \gg T_{\text{н}}$, где $T_{\text{э}}$, $T_{\text{ион}}$, $T_{\text{н}}$ – температура электрона, иона, и нейтральной частицы.

б) изотермическую, где произошло полное выравнивание всех температур $T_{\text{э}} = T_{\text{ион}} = T_{\text{н}}$, но их общая температура и давление меняются во времени.

в) изотермическую с более или менее постоянными температурой и давлением.

Первоначальную стадию разряда, где существует неизотермическая плазма, называют *искровой*. В таком случае температура электронов достигает 10^5 К, а ток протекает в еще узком канале.

В разряде, близком к дуговому, наблюдается плазма с электронной температурой больше 10000 К и температурой ионов и нейтральных частиц ≈ 6000 К.

1.6. Первоначальное расширение канала разряда и создание газового пузыря

Сразу же после пробоя можно считать, что жидкость, обладающая инерцией, неподвижна, и на первой стадии канал разряда расширяется только вследствие сжатия окружающей его рабочей среды.

При этом от границы канала, которая движется со скоростью, больше ско-

рости звука, радиально расходится цилиндрическая ударная волна.

Ударная волна содержит поверхность уплотнения (фронт) – довольно узкую область пространства, на протяжении которой давление среды скачком меняется от исходного в жидкости ($P_{\text{ж}}$) до очень высокого значения во фронте ($P_{\text{ф}}$).

Сжатие от давления $P_{\text{ж}}$ до $P_{\text{ф}}$ повышает на величину ΔW внутреннюю энергию единицы массы жидкости.

С течением времени t , отсчитываемого после пробоя, растет радиус фронта ударной волны, одновременно уменьшаются величины $P_{\text{ф}}$ и ΔW .

Значение запасенной внутренней энергии определяет характер процессов, происходящих в среде, где прошел фронт ударной волны.

По величине ΔW , т. е. по мере отхода фронта от оси разряда, выделяют такую последовательность этапов развития разряда с течением времени:

1) ΔW столь высокая, что достаточна не только для испарения и диссоциации молекул, но даже для ионизации атомов: $\Delta W > \Delta W_{\text{ион}} = 10^7$ Дж/кг.

Фронт оставляет за собой канал разряда; скорость движения фронта равна скорости первоначального расширения канала.

2) Приращение внутренней энергии мало для разложения и ионизации молекул, но еще достаточно для испарения жидкости на фронте: $\Delta W > \Delta W_{\text{ион}} = 3 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Расширяющийся канал отстает от фронта и, следовательно, на этой стадии скорость фронта совпадает со скоростью движения стенок газового пузыря.

3) Величина ΔW снизилась настолько, что после сжатия запасенной энергии стало недостаточно для испарения жидкости.

Фронт обгоняет границу газового пузыря, ударная волна радиально расходится в жидкости.

Благодаря высокому давлению на фронте плазма в образовавшемся канале довольно плотная, а значит, длина свободного пробега частиц

невелика.

Поскольку размеры канала малы, а следовательно, его электрическое сопротивление большое, то на этом этапе предполагается использование ГИ высокого напряжения.

Вследствие большой плотности среды частота столкновений электронов с частицами велика, и через короткое время ($\approx 0,1$ мкс) температуры всех частиц приблизительно выравниваются.

В первом приближении через промежуток времени $t > 0,1$ мкс плазму можно считать изотермической с меняющимися во времени температурой, плотностью и давлением.

Следовательно, неизотермическая стадия разряда длится менее 0,1 мкс, более продолжительные разряды представляют собой переходную стадию от искрового к дуговому и называются иногда искродуговыми.

Обозначим через $t_{\text{ф.к}}$ – длительность первого этапа ($\approx 10^{-7} - 10^{-6}$ с), когда фронтом ударной волны заканчивается образование канала разряда.

Если в момент $t_{\text{ф.к}}$ прекращается импульс напряжения, то ударная волна отрывается от границы канала разряда и расходится в окружающей жидкости.

Накопленная в небольшом канале потенциальная энергия вызывает относительно слабое последующее растекание жидкости.

Очень короткие разряды не обеспечивают быстрое естественное удаление продуктов из МЭП, чем и объясняется необходимость принудительной прокачки рабочей среды.

Длительность импульсов $t_{\text{ф.к}} \approx 1$ мкс соответствует так называемому высокочастотному режиму ЭЭО.

Второй этап разряда в сжимаемой среде заканчивается, когда сжатие не обеспечивает испарения жидкости.

При работе от одного и того же ГИ для воды начальный радиус пузыря много меньше, а давление в газовом пузыре много больше, чем в керосине.

Формирование газового пузыря, т. е. второй этап разряда в сжимаемой жидкости заканчивается через время $t_{ф.исп.}$ после пробоя.

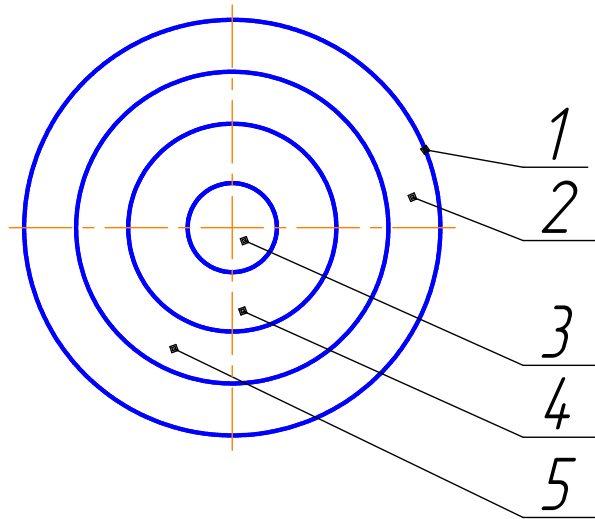


Рис. 1.4. Внутреннее строение газового пузыря:

1 – фронт ударной волны, 2 – рабочая среда, 3 – канал разрыва, 4 – канал разложения рабочей жидкости, 5 – область перегретого пара

На рис. 1.4 показано внутреннее строение газового пузыря в момент времени $t_{ф.исп.}$, когда фронт ударной волны 1 переходит в жидкость и начинается третий этап. В центре находится канал 3, содержащий ионы и электроны, в канале 4 близлежащей его окрестности произошло разложение молекул жидкости, в кольцевой области 5 находится перегретый пар, граничащий с рабочей средой 2.

Если при $t = t_{ф.исп.}$ импульс заканчивается, то в газовом пузыре наблюдается сравнительно высокое давление, но заметного гидродинамического течения жидкости еще нет.

В сжатом пузыре накоплена потенциальная энергия, которая в паузе до подачи следующего импульса вызывает гидродинамическое выталкивание жидкости из МЭП.

Когда образуется газовый пузырь, то повышается сила воздействия на

электроды, так как возросла площадь их соприкосновения с пузырем.

1.7. Процессы в столбе канала разряда

Наличие электродов влияет на процессы в близлежащей плазме потому, что температура их металла ниже, чем в центре канала.

Канал разряда по длине делится на три части: сравнительно узкие катодную и анодную области и находящийся между ними столб.

Мгновенное напряжение, поданное на МЭП, равно сумме мгновенных напряжений на столбе ($U_{ст}$), анодной ($U_{ан}$) и катодной ($U_{кат}$) областях:

$$U = U_{ст} + U_{ан} + U_{кат} \quad (1.1)$$

На протяжении каждой приэлектродной области свойства среды меняются от тех, которые свойственны столбу, до тех, которыми характеризуются поверхность анода или катода. Так как любые свойства плазмы передаются через столкновения частиц, то толщина электродных областей пропорциональна длине свободного пробега частиц.

Плазму столба можно считать электрически нейтральной и изотермической и основными величинами, описывающими плазму, являются местная температура канала и текущее давление, причем при большом времени t давление можно считать примерно одинаковым как для канала, так и для газового пузыря.

Между двумя последовательными столкновениями электроны набирают кинетическую энергию в электрическом поле и отдают ее другим частицам при соударении с ними.

Такие столкновения могут быть двух видов:

1) *упругие*, когда часть кинетической энергии электронов переходит в кинетическую энергию других частиц, внутреннее состояние которых не нарушается.

2) *неупругие*, при которых кинетическая энергия электронов расходу-

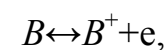
ется на изменение состояния частиц.

Каждый вид неупругих столкновений характеризуется некоторой пороговой энергией, которую выражают в электрон-вольтах (эВ) и поэтому называют потенциалом.

Различают потенциалы возбуждения, однократной ионизации частиц и распада молекул. Потенциал распада молекулы определяется прочностью связей ее атомов.

Неупругие столкновения можно рассматривать как некоторую химическую реакцию, а поскольку плазма считается изотермической, то для изучения таких реакций следует применять закон действующих масс.

Тогда упомянутые потенциалы представляют собой энергию активации данной реакции. Например, ионизация атома B соответствует схеме:



где B^+ – положительный ион, e – электрон.

Ионы и электроны в плазме возникают потому, что происходит ионизация тех атомов вещества рабочей среды, анода или катода, которые имеют наименьшую величину потенциала ионизации.

При ЭЭО стали в углеводородной среде (керосине или масле) наиболее вероятным является разрыв слабых связей С-С и С-Н, а разрыв связей С=С и С $\equiv$ С менее вероятен. Поэтому среди продуктов разложения жидкости (при температуре канала = 6000 К) окажется водород, ацетилен (НС = СН) и углерод в виде С₁, С₂, С₃.

Углеводородные молекулы способны захватывать электроны (образуют так называемым сродством к электрону) и становятся отрицательными ионами.

При ЭЭО стали в воде также происходит распад молекул Н₂О, поскольку потенциал разрыва связи О-Н меньше потенциала ионизации железа. В первом приближении можно принять, что вещество плазмы находится исключительно в атомном состоянии.

Электропроводность плазмы столба повышается с повышением температуры и при прочих равных условиях повышается, если атомы вещества рабочей среды имеют низкий потенциал ионизации и высокое давление в той смеси частиц, которая находится в канале.

По мере продолжения разряда газовый пузырь расширяется и давление в нем уменьшается, электропроводность столба повышается и, следовательно, большую долю в напряжении составляют электродные падения потенциалов.

На второй стадии разряда, когда газовый пузырь начинает гидродинамическое выталкивание рабочей среды, можно допустить, что вся энергия генератора импульсов расходуется только на вытеснение жидкости.

В конце разряда радиус канала разряда достигает наибольшей величины.

При прочих неизменных условиях с течением времени разряда ток повышается, а сопротивление столба уменьшается. При импульсах большой длительности ток разряда, сопротивление столба, а также сумма ($U_{\text{ан}} + U_{\text{кат}}$) постепенно стабилизируются.

Остывание столба канала после окончания разряда вызвано тем, что потери энергии в канале не восполняются джоулевой теплотой, выделяющейся при разряде: в результате плазма охлаждается и происходит деионизация ее вещества.

Скорость падения электропроводности, а главное, причины, влияющие на эту скорость, представляют интерес для технологии, поскольку задают наименьшую длительность паузы.

Время остывания столба определяется тем, насколько быстро энергия, накопленная в канале к концу разряда, израсходуется вследствие теплового излучения фотонов и теплопроводности в окружающую газовую среду и электроды.

С повышением радиуса канала (т. е. с увеличением длительности импульса) мощность потерь повышается быстрее, чем накопленная энергия

(вследствие падения плотности вещества). Поэтому с увеличением длительности импульса время остывания растет медленнее, чем длительность импульса.

Для повышения производительности желательно увеличить частоту разрядов, однако необходимость паузы часто не позволяет сделать это.

1.8. Эмиссия электронов с катода и поступление энергии на катод

Электрическая эрозия электродов определяется процессами, происходящими на границах между каналом разряда, с одной стороны, и анодом или катодом, с другой. Заряд в столбе переносится в основном электронами, поэтому ток разряда должен примерно равняться току электронов, выходящих с катода.

Поскольку при ЭЭО разряд самостоятельный, то он сам для себя создает условия, необходимые для получения потока электронов с катода. Заметная термоэлектронная эмиссия возможна лишь для угольного и вольфрамового катодов, высокая температура испарения или плавления которых обеспечивает большое значение плотности электронного тока 10^9 А / м^2 .

Электроны, преодолев потенциальный барьер, равный работе выхода, и вылетев с горячего катода, уносят с собой энергию и тем самым с единицы поверхности отводится тепловая мощность.

Удаление электронов с нагретого катода при наложении электрического поля называется *термоавтоэлектронной эмиссией*.

Поле сжимает облако пространственного заряда электронов и тем самым снижает работу выхода. Например, при температуре катода = 3000К и напряженности поля $E = 10^8 \text{ В/м}$ плотность тока повышается в 300-400 раз.

При очень большом значении напряженности внешнего поля (10^9 В/м) уменьшается не только высота потенциального барьера, но и его толщина, что делает возможным туннельный переход электронов из металла в окру-

жающую среду. При такой *автоэлектронной* эмиссии электрону не сообщается работа выхода, охлаждения катода не наблюдается, плотность тока высокая.

Еще один возможный механизм ввода электронов в канал – это перезарядка положительных ионов у поверхности испаряющегося катода. Влетая в столб канала из прикатодной зоны, атомы ионизируются здесь электронами, а под действием поля возникающие ионы движутся обратно на катод, на поверхности которого соединяются с электронами и снова превращаются в атомы, совершая затем много раз тот же самый цикл. Появление ионов у катода означает введение положительных зарядов в облако электронов, что способствует снижению высоты потенциального барьера и увеличению эмиссии всех видов.

Протекание заряда сопровождается поступлением потока энергии на ту часть катода (пятно), которая граничит с каналом.

Этот поток складывается из следующих составляющих:

1) кинетическая энергия ионов, приобретаемая при их ускорении напряжением, т.е. при движении из столба на катод. При ударе о катод ион выделяет энергию, а ток ионов на единице поверхности передает мощность, равную $i_{\text{ион}} \cdot U_{\text{кат}}$;

2) потенциальная энергия ионов, которые разряжаясь, отдают катоду энергию ионизации, а отходя от него в виде атома, уносят с собой энергию, равную работе выхода электрона;

3) тепловая энергия нейтральных частиц плазмы. Потери энергии с поверхности катодного пятна объясняются эмиссией электронов.

1.9. Поступление энергии на анод

Электроны, ускоряясь в области анодного падения потенциала из столба переходит в анод, который при определенных условиях может испускать

также и положительные ионы, входящие в канал разряда.

На анодное пятно, граничащее с каналом, поступает поток энергии, слагаемый из составляющих:

- 1) кинетическая энергия электрона, накопившего ее при ускорении в анодной области;
- 2) энергия, равная работе выхода электрона из анода;
- 3) тепловая энергия горячих нейтральных частиц;
- 4) тепловая и кинетическая энергия паров, вылетевших с катода.

Установлено, что передаваемая ими удельная мощность возрастает с увеличением температуры плавления материала катода и скорости пара, а также при уменьшении МЭП и уменьшении плотности вещества канала.

С увеличением длительности импульса уменьшается тепловая мощность, отдаваемая горячими частицами (уменьшается давление в канале), и уменьшается плотность тока вследствие расширения канала.

При очень коротких разрядах (10^{-7} с) ионы можно считать «холодными», поэтому вблизи электродов не успевают образоваться объемные заряды ионов; ускоряющее электрическое поле не появляется, а ионная составляющая тока мала. Оба электрода разогреваются нейтральными частицами плазмы, с катода возникает эмиссия термо - или автоэлектронного типа, а на анод энергия передается электронами.

Энергия преимущественно поступает на анод, в качестве которого следует использовать заготовку (прямая полярность).

Вследствие небольших размеров канала разряда велики удельные потоки теплоты на анод, вещество которого испаряется.

Поскольку плотность вещества канала высокая, а испарение начинается с некоторой задержкой, требуемой для нагревания до температуры кипения, то передача энергии паровыми струями незначительна.

С увеличением длительности разряда ($10^{-5} - 10^{-6}$ с) уменьшается плотность вещества и уменьшается давление в канале, увеличивается электро-

проводность плазмы, а ионы «нагреваются». Поступающая теплота своевременно не успевает отводиться в глубь электрода, его вещество испаряется.

Найдено, что скорость паровых струй (называемых факелами) с катода – 2000 м/с, с анода – 200 м/с.

При коротких импульсах, когда зазор обычно мал, доля эрозии анода от катодного факела может быть достаточно заметной.

Подобное взаимовлияние электродов – особенность ЭЭО на коротких импульсах (в электроискровом режиме), обмен энергиями паровых струй приводит к выравниванию тепловых потоков на катоде и аноде.

Чем больше длительность импульса, тем большую роль в распределении потоков на электродах играют ионы.

Растет доля энергии, отдаваемая ионами катоду, особенно, если его вещество не тугоплавкое (например, сталь), а термоэлектронная эмиссия и, следовательно, охлаждение катода отсутствует. Благодаря ионному току на катоде нейтрализуется отрицательный объемный заряд электронов, что создает предпосылки для термоавтоэлектронной и автоэлектронной эмиссий.

Кроме того, при ЭЭО в органических жидкостях с увеличением длительности импульса наблюдаются поверхностные химические реакции, в результате которых вокруг электродного пятна на аноде из газового пузыря осаждается защитная углеродная пленка.

Описанное явление вместе с перераспределением теплового потока на электроды приводит к тому, что эрозия анода становится меньше, чем катода, и при ЭЭО стали в масле на длинных импульсах (в электроимпульсном режиме) следует применять обратную полярность.

Подбор электрического режима позволяет резко уменьшить износ инструмента при высокой производительности.

Другая особенность ЭЭО на длинных импульсах – падение удельных тепловых потоков, что объясняется большими размерами канала. Поэтому

тепловые явления на электродах протекают менее интенсивно, в основном наблюдается плавление электродов, что ослабляет их взаимодействие с паровыми струями.

1.10. Тепловые задачи для электродов

Для изучения тепловых процессов не представляет никакого интереса происхождение тепловых потоков.

Для обоих электродов одинаковы способы решения тепловой задачи, которая сводится к отысканию распределения температуры в окрестности электродного пятна, где поверхностные источники вводят теплоту из канала разряда в материал электрода.

В поверхностном слое могут возникать также объемные источники теплоты, которая выделяется в электроде при большой местной плотности тока, растекающегося вглубь пятна.

В единице объема мощность подобного источника особенно большая, когда велика плотность тока в начале разряда или на тех катодах, где возникают мелкие электродные пятна.

Для материалов с высоким электрическим сопротивлением (типа графита) учитывают объемный нагрев, а для электропроводных веществ (например, медь) им пренебрегают.

Тепловые задачи формулируют в виде уравнения теплопроводности, численное решение которого не вызывает препятствий даже в самом общем случае.

Однако для ЭЭО затруднения возникают в связи с неопределенностью исходных данных: неточно известны тепловые потоки, начальная конфигурация поверхности электрода, тип теплового источника и т. д.

Для получения инженерных решений тепловую задачу упрощают, принимая тепловой источник стационарным, а свойства вещества – не за-

висящими от температуры.

Испарение вещества электрода определяется теплотой фазового превращения ($L_{\text{исп}}$), необходимой для испарения материала и связанной с точкой кипения ($\Theta_{\text{исп}}$):

$$L_{\text{исп}} = \frac{8,8 \cdot 10^4 \cdot \Theta_{\text{исп}}}{M_{\text{эл}}}, \quad (1.2)$$

где $M_{\text{эл}}$ – средняя относительная молекулярная масса вещества.

Известно, что $\Theta_{\text{исп}}$ и $L_{\text{исп}}$ растут с повышением давления.

Глубину лунки, из которой за время длительности разряда вещество испарилось, можно найти из закона сохранения энергии: удельная теплота, поступающая в течение разряда, расходуется на нагревание материала до температуры кипения, переход в парообразное состояние, сообщение пару кинетической энергии, а также теплоотвод вглубь электрода.

Вещество испаряется при мощных тепловых потоках, т. е. при коротких разрядах длительностью 10^{-7} – 10^{-5} с.

Для уменьшения износа катода-инструмента (т. е. для уменьшения глубины каждой лунки) его изготавливают из электропроводного материала с высокими значениями точки кипения, теплоемкости, теплоты фазового превращения и теплопроводности (например, медь).

Подобные режимы ЭЭО – энергоемки. Быстрый ввод большого количества теплоты может вызвать неравномерное тепловое расширение материала электродов и создать силы, отрывающие твердые частицы от электрода (особенно из хрупкого материала), а также образовать трещины в поверхностном слое детали.

Процесс плавления поверхностного слоя электрода в том случае, если тепловой поток не вызывает взрывчатого испарения, может иметь два предельных режима:

1) во время разряда плавится поверхностный слой электрода, и весь жидкий металл из лунки выбрасывается сразу после прекращения

импульса;

2) расплав удаляется непрерывно, и тепловой поток действует на постоянно обнажающийся твердый материал электрода.

В первом случае, пренебрегая испарением вещества, полагают, что на границе расплава и твердого материала температура равна точке плавления.

Глубина лунки определяется свойствами материала заготовки, и в известной мере характеризует эрозионную (точнее тепловую) стойкость материала.

Если для хрупкого скола или испарения причины выброса материала из лунки более или менее ясны, то иначе обстоит дело при плавлении: ведь переход в жидкое состояние еще не означает отделение расплава от заготовки.

Выброс расплава из лунки производится механической силой, для объяснения происхождения которой известно несколько гипотез. По одной из них предложено, что металл из лунки выбрасывается, когда давление в газовом пузыре минимально: при быстром его падении для нового значения давления расплав оказывается перегретым (температура испарения уменьшается), и в нем образуются очаги бурного кипения.

Среди застывших частиц много полых. Средний радиус частиц ($r_{\text{ч}}$), вылетевших из лунки, зависит от поверхностного натяжения и вязкости расплава, а также от величины и времени действия теплового потока.

Распределение частиц по величине радиуса (рис. 1.5) асимметричное, причем максимум смещен в сторону меньших радиусов. С ростом энергии разряда увеличивается $r_{\text{ч}}$.

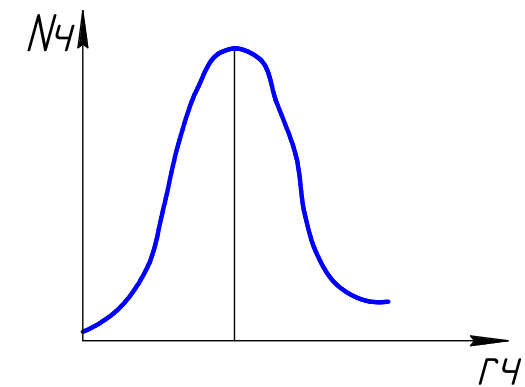


Рис. 1.5. Распределение частиц по размерам

В условиях ЭЭО возникают тепловые задачи и более сложного характера, в том числе, и для ЭИ, покрытого тонким защитным слоем углерода (пирографита). Этот слой (толщиной примерно 10 мкм) повышает стойкость медного ЭИ в 20 и более раз, потому что, во-первых, сам углерод обладает высокой температурой испарения, а во-вторых, металлическая подложка с большой теплопроводностью быстро отводит теплоту от защитного слоя в глубину ЭИ.

Тепловые процессы на электродах определяют производительность, износ инструмента и качество обработанной поверхности.

Диаметр лунки несколько больше диаметра электродного пятна, но часто его считают равным диаметру канала в конце разряда. С увеличением длительности импульса увеличивается диаметр лунки: он становится в 5–30 раз больше глубины лунки. Считается, что лунка имеет круглую форму.

Таким образом, глубина и объем лунки увеличивается с увеличением энергии разряда при постоянных остальных условиях обработки.

Износ инструмента оценивается отношением глубин лунок ЭИ и ЭЗ. Различают три вида относительного износа: объемный, линейный и массовый.

Шероховатость поверхности детали оценивают полагая, что в плане ЭЗ (рис. 1.6) лунки (2) последовательно «накладываются» друг на друга.

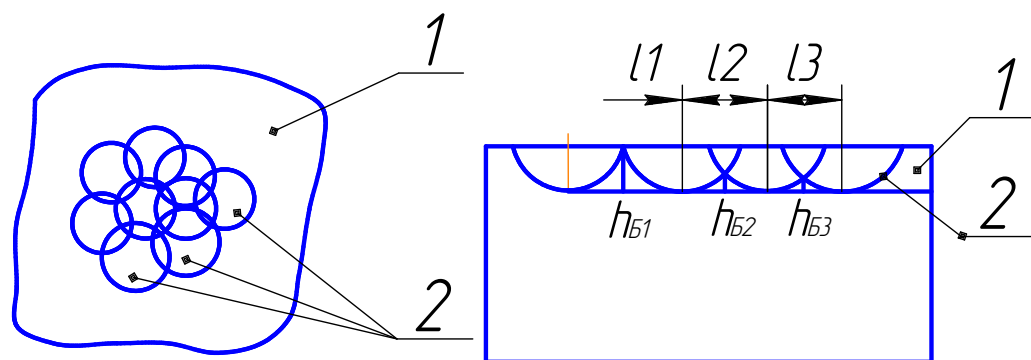


Рис. 1.6. Вид сверху электрод - заготовки:

1 – заготовка, 2 – лунки

Вещество в геометрической модели формообразования должно удаляться одной лункой. Такое требование соблюдается при определенных расстояниях l_1, l_2, l_3 между центрами лунок. В среднем считают, что

$$R_{Z \max} = h_{Б \text{ СРЕД}} = \frac{h_{л}}{3}, \quad (1.3)$$

где $h_{л}$ – глубина лунки.

Следовательно, высота микронеровностей определяется теми же условиями обработки, что и глубина лунки.

Получение низкой шероховатости возможно при уменьшении энергии разряда и, следовательно, снижении производительности.

Соответственно типу воздействий вблизи обработанной поверхности детали обнаруживаются следующие области:

- 1) плавление и механические воздействия;
- 2) химическое взаимодействие материала заготовки с веществом инструмента или материала заготовки с веществом инструмента или рабочей средой (например, науглероживание при ЭЗО в органических средах);
- 3) остаточные напряжения;
- 4) термически измененный слой.

Более глубокие области не меняют своих свойств.

Глубина лунки, высота микронеровностей и глубина термически измененного слоя h_T связаны линейно, так как примерно одинаково зависят от теплового режима: $h_T = K_T \cdot h_{л}$, где K_T – коэффициент, для данного материала зависящий от температуры структурных изменений.

1.11. Движение рабочей среды в межэлектродном промежутке (МЭП) и захват продуктов эрозии

При изучении выталкивания рабочей среды газовым пузырем на второй стадии разряда следует учесть, что плотность чистой жидкости $\rho_{ж} = 0,8-1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; динамическая вязкость μ различных жидкостей существенно неодинакова (вязкость масла больше, чем воды ($\mu_{\text{воды}} = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$)) и величина ее при увеличении температуры заметно уменьшается.

Кроме того, накопление в рабочих жидкостях продуктов обработки изменяет их свойства.

Движение жидкости определяется положением канала разряда относительно контура выходной области МЭП. Ее течение будет строго радиальным, когда место пробоя совпадает с центром контура выходной области МЭП, имеющего в плане форму окружности.

Разряды вблизи границы МЭП вызывают довольно непродолжительные течения, а при этом объем вытесняемой из промежутка жидкости невелик.

Самые сильные потоки возникают при разрядах в центральных областях МЭП.

Объем вытесняемой жидкости в таком случае наибольший и приблизительно равен максимальному объему газового пузыря.

Захват потоком жидкости инородных включений имеет свои особен-

ности в торцевой (горизонтальной) и вертикальной частях МЭП. Крупные частицы продуктов эрозии выводятся из МЭП медленнее всех; скорость их удаления из МЭП иногда может не успевать за скоростью их возникновения из лунок.

Происходящее вследствие этого накопление крупных частиц в МЭП ведет к серии пробоев через них. В результате уменьшается объем средних лунок и, следовательно, уменьшается производительность; крупные частицы дробятся разрядами до тех размеров, которые соответствуют большой скорости удаления из МЭП.

Возможен также захват мелких частиц стенкой набегающего на них газового пузыря. Это облегчает развитие последующего электрического пробоя именно вдоль границы газового пузыря.

Образовавшиеся из него более мелкие пузыри в результате следующих разрядов переходят в вертикальные (боковые) части МЭП, где поднимаются вверх подъемной архимедовой силой, унося с собой налипшие частицы. Тем самым может осуществляться флотационный способ выведения мелких частиц, что имеет основное значение при тех режимах обработки, когда частицы не велики, а кратковременные периоды течения жидкости не обеспечивают вывод из МЭП.

Удаление частиц из боковой части МЭП – конечный этап их выведения из МЭП вообще. Когда применяют прокачку рабочей среды, то в вертикальной части существует стационарный поток со средней скоростью течения (V).

Для подъема частицы в боковой части МЭП необходимо, чтобы сила подъема со стороны потока превышала бы силу тяжести, действующую на частицы в жидкости, то есть скорость V должна быть больше некоторого наименьшего значения $V_{\min}$. Установлено, что $V_{\min} \approx 180 \text{ м/с}$.

Знание $V_{\min}$ позволяет установить минимальный расход прокачиваемой жидкости:

$$Q_{\min} = V_{\min} \cdot F_{\text{бок}}, \quad (1.4)$$

где $F_{\text{бок}}$ – площадь сечения выходной части МЭП.

Скорость естественного удаления частиц по мере углубления инструмента в заготовку заметно уменьшается. Это объясняется двумя причинами: ростом площади обрабатываемой поверхности; увеличением площади выходного сечения МЭП.

При этом искусственная прокачка способствует стабилизации ЭЭО.

ГЛАВА 2. РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

2.1. Электроискровая обработка

Электроискровая обработка характеризуется использованием искровых разрядов малой длительности ($10^{-5} - 10^{-7}$ с) при прямом подключении электрического тока (заготовка-анод, инструмент-катод).

В зависимости от мощности искровых разрядов режимы делятся на жесткие и средние (для предварительной обработки), мягкие и особо мягкие (для окончательной).

Использование мягких режимов обеспечивает отклонение размеров детали до 2 мкм при $Ra=0,01$ мкм.

Использование в качестве диэлектрической жидкости керосина или минерального масла предотвращает нагрев электролита.

Электроискровые режимы используют при обработке твердых сплавов, труднообрабатываемых материалов и сплавов, тантала, молибдена, вольфрама и т. д., обрабатывают сквозные и глубокие отверстия любого поперечного сечения, отверстия с криволинейными осями; используя проволочные и ленточные электроды, вырезают детали из листовых заготовок; нарезают зубья и резьбы, шлифуют и клеймят детали.

Для проведения обработки на электроискровых режимах используют станки (рис. 2.1), оснащенные RC-генераторами, состоящими из зарядного и разрядного контура.

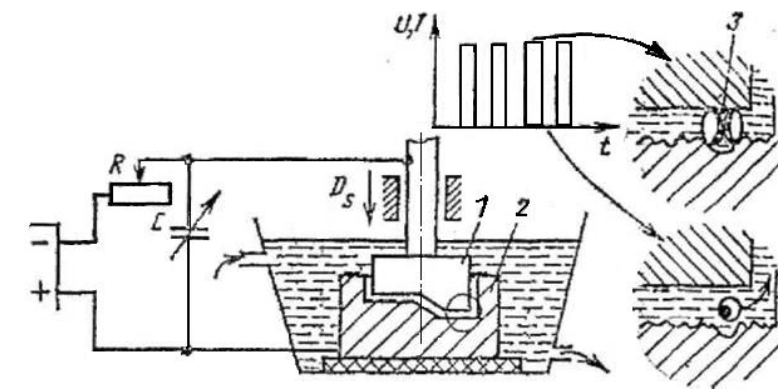


Рис. 2.1. Схема электронной обработки:

1 – электрод-инструмент, 2 – электрод-заготовка, 3 – канал разряда,
R – сопротивление, C – конденсатор

Зарядный контур включает конденсатор C, заряжающийся через сопротивление K от источника тока с напряжением 100–200В, а в разрядный контур параллельно конденсатору C включены электроды 1 (инструмент) и 2 (заготовка).

Как только напряжение на электродах 1 и 2 достигнет пробойного, через межэлектродный зазор происходит искровой разряд энергии, накопленной в конденсаторе C.

Производительность эрозионного процесса может быть увеличена уменьшением сопротивления R.

Постоянство межэлектродного зазора поддерживается специальной следящей системой, управляющей механизмом автоматического движения подачи инструмента, изготовленного из меди, латуни, углеграфитовых материалов.

2.2. Электроимпульсная обработка

Электроимпульсная обработка характеризуется применением импуль-

сов большой длительности (0,5–10 с), соответствующих дуговому разряду между электродами и более интенсивному разрушению катода.

В этом случае на заготовку подается минус от электромашинного или электронного генератора (рис. 2.2). Это обеспечивает высокую производительность (в 8–10 раз больше, чем при электроискровых режимах) и небольшой износ инструмента. Электроимпульсная обработка применяется при предварительной обработке заготовок сложнопрофильных деталей (штампы, лопатки турбин и т. д.), изготовленных из труднообрабатываемых сталей и сплавов (лопатки – 08X17H34B5T3Ю2Л, 20X13, 15X18H22B6M2Л; штампы – ХВГ, Х12Ф1, Х12М).

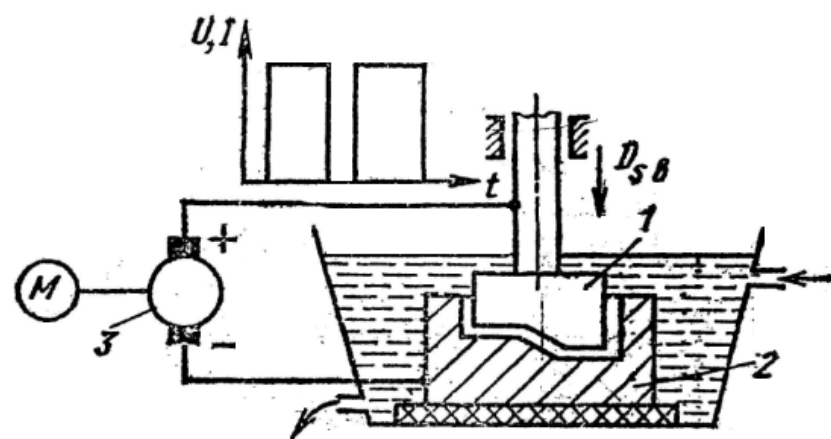


Рис. 2.2. Схема электроимпульсной обработки:

1 – электрод-инструмент, 2 – электрод-заготовка, 3 – электромашинный (или электронный) генератор

2.3. Электроконтактная обработка

Электроконтактная обработка является разновидностью электроэрозионной обработки и основана на разрушении металла в результате одно-временного механического и теплового воздействия, приводящего к расплавлению, частичному испарению и удалению размягченного металла из зоны обработки. Теплота, необходимая для расплавления и испарения ме-

талла, выделяется в результате следующих процессов:

- 1) кратковременного горения дуг между неровностями заготовки и инструмента;
- 2) нагревания вследствие прохождения тока через сопротивление контакта;
- 3) разогревания при трении электрода о заготовку.

При обработке (рис. 2.3) между инструментом и заготовкой протекает ток силой 10–25А и в зависимости от величины напряжения или развивается давление 1.0–1.5МПа ($U < 12,5В$ – при электроконтактной заточке инструмента) или оно отсутствует при $U > 12В$ и преобладает режим оплавления.

Наибольшее распространение получили режимы электроконтактной обработки при $U > 12В$, при которых преобладает выделение теплоты за счет множественных дуговых разрядов между заготовкой и инструментом.

Увеличению числа контактов, приводящих к образованию дуг, способствуют вибрации, сопровождающие процесс обработки.

Электроконтактную обработку проводят при постоянном или переменном токе медными или чугунными электродами. Нерабочие поверхности электродов покрывают диэлектрическим слоем эпоксидно-карбидной композиции, препятствующей возникновению нежелательных контактов и способствующей удалению с поверхности дефектного слоя глубиной 0,2 – 0,3 мм. Меньшая эрозия инструмента по сравнению с эрозией заготовки объясняется интенсивным воздействием применяемых охлаждающих сред (сжатый воздух, вода) и быстрым вращением (у электрода-инструмента $V = 60 м/с$).

По схеме электроконтактной обработки (рис. 2.3) может выполняться точение, сверление, разрезание, обработка плоских и сложнофасонных поверхностей, зачистка литниковых заусенцев и т. д. Обработка ведется на жестких и мягких режимах.

Жесткие режимы обеспечивают большой удельный съем металла (например, при резании заготовок диаметром 50-90 мм из стали 12X18H10T при $U=23$ В, $I=2,3$ А, $Q=128-200$ см³/мин, что в 5–10 раз больше, чем при мягких режимах) уменьшается себестоимость обработки в 2–3,5 раза, но формируется дефектный слой значительной глубины.

На мягких режимах снимается значительно меньше металла (например, при обработке титановых сплавов $Q < 6,7$ см³/мин при $I=500$ А), достигается параметр $Ra = 0,16...0,63$ мкм, глубина дефектного слоя 0,02 – 0,05 мм.

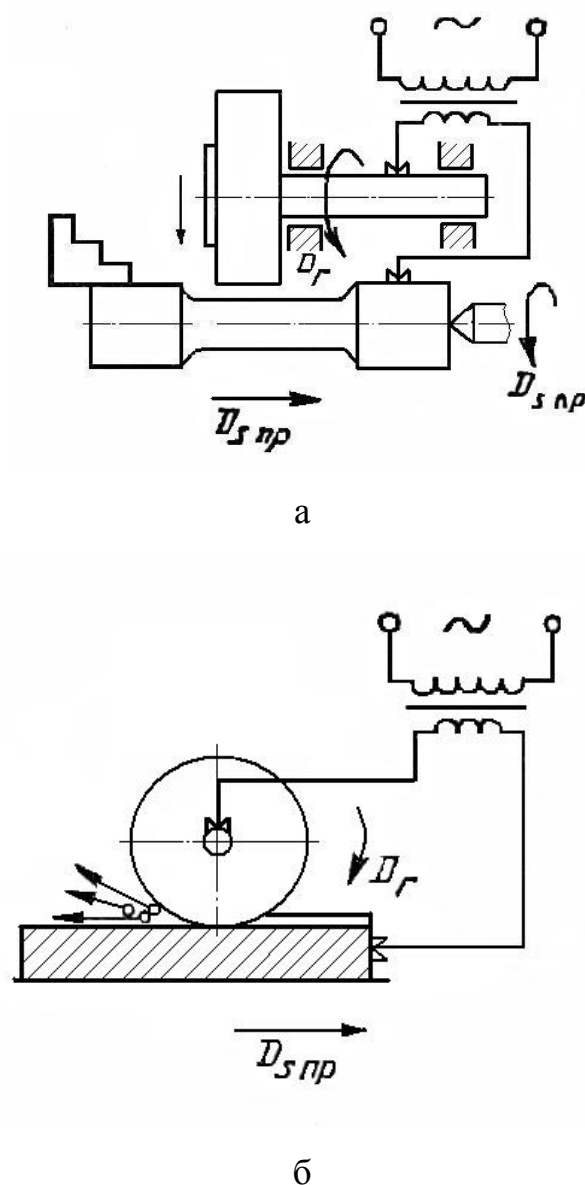


Рис. 2.3. Схема электроконтактного точения (а) и фрезерования (б)

2.4. Электронно-лучевая обработка

Электронно-лучевая обработка основана на тепловом воздействии потока движущихся электронов на обрабатываемый материал, который в месте обработки плавится и испаряется. Такой интенсивный нагрев вызывается тем, что кинетическая энергия движущихся электронов при ударе о поверхность обрабатываемой заготовки почти полностью переходит в тепловую, которая концентрируется на площадке диаметром 10 мкм и вызывает ее нагрев до $t = 6000$ °С. Обработка ведется в импульсном режиме: длительность импульса: 0,0001 – 0,000001 с; частота их $t = 50...5000$ Гц. Высокая концентрация энергии и ее импульсное воздействие обеспечивают условия обработки, при которых поверхности заготовки, находящиеся на расстоянии 1 мкм от кромки электронного луча, разогреваются до 300 °С.

Это позволяет резать заготовки, изготавливать сетки из фольги, прорезать пазы и обрабатывать отверстия диаметром от 1 мкм до 10 мкм в деталях из труднообрабатываемых сталей и сплавов.

В качестве оборудования используют специальные электровакуумные устройства, которые называются электронными пушками (рис. 2.4). Они генерируют, ускоряют и фокусируют электронный луч. Электронная пушка состоит из вакуумной камеры 4, (вакуум в ней достигается $133 \cdot 10^{-4}$ Па = 0,013 Па), в которой установлен питаемый источником высокого напряжения 1 вольфрамовый катод 2, обеспечивающий эмиссию свободных электронов, которые разгоняются электрическим полем, созданным между катодом 2 и анодной диафрагмой 3. Затем электронный луч проходит через систему магнитных линз 9 и 6, устройство электрической юстировки 5 и фокусируется на поверхности обрабатываемой заготовки 7, установленной на координатном столе 8. Импульсный режим работы электронной пушки обеспечивается импульсным генератором 10 и трансформатором 11.

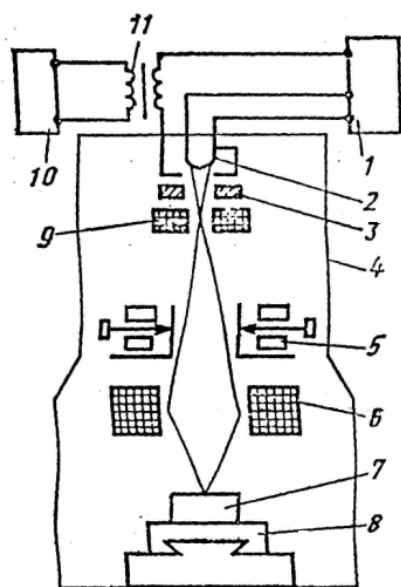


Рис. 2.4. Схема установки для электронно-лучевой обработки:

1 – источник высокого напряжения; 2 – катод; 3 – анодная диафрагма; 4 – вакуумная камера; 5 – устройство электрической юстировки; 6, 9 – система магнитных линз; 7 – заготовка; 8 – координатный стол станка

2.5. Светолучевая (лазерная) обработка

Светолучевая (лазерная) обработка основана на использовании теплового воздействия светового луча высокой энергии, излучаемого оптическим квантовым генератором (лазером) на поверхность заготовки. Излучение лазером характеризуется оптической нерасходимостью в пространстве и высокой концентрацией энергии, плотность которой значительно увеличивается при фокусировке светового луча на площадке диаметром приблизительно равным 10 мкм, температура в зоне фокусировки приблизительно 5500 – 9000 К (5227–8727 °С), что при достаточной длительности излучения приводит к расплавлению и испарению любого материала. Так, при удельной мощности излучения до 10^7 Вт/см² материал плавится, а при удельной мощности больше 10^7 Вт/см² – испаряется. Эффективность воздействия лазерного излучения зависит также от теплофизических свойств

материала заготовки, отражательной способности ее обрабатываемой поверхности. С уменьшением длины волны излучения увеличивается доля поглощенной заготовкой световой энергии.

Размерная обработка с помощью лазеров заключается в образовании отверстий диаметром 0,5–10,0 мкм в труднообрабатываемых материалах, изготовлении сеток, вырезании из листа сложнопрофильных деталей и т. д.

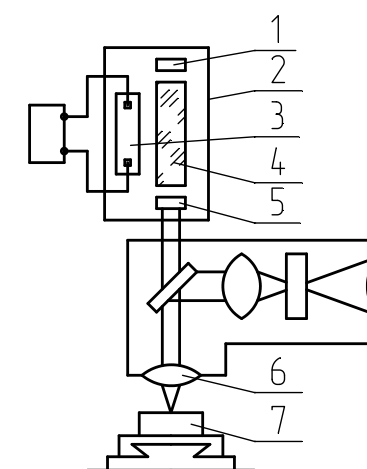


Рис. 2.5. Схема твердосплавного технологического лазера:

1 – зеркало-резонатор; 2 – лазерная головка; 3 – ксеноновая импульсная лампа; 4 – рубиновый стержень; 5 – зеркало-резонатор; 6 – система линз; 7 – заготовка

Наиболее надежными для размерной обработки являются твердотельные рубиновые лазеры, работающие в импульсном режиме (рис. 2.5). Активным элементом такого лазера является рубиновый стержень (рубин – это $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,05\% \text{Cr}$). Торцы стержня 4, установленного в лазерную головку 2, закрываются зеркалами-резонаторами 1 и 5, одно из которых (обращенное к обрабатываемой заготовке 7) полупрозрачно. При облучении рубинового стержня 4 ксеноновой импульсной лампой 3 атомы хрома приходят в возбужденное состояние. При возвращении их в нормальное состояние они испускают фотоны, которые, взаимодействуя с возбужденными атомами хрома, вызывают лавинообразный поток фотонов. Наличие

зеркал-резонаторов приводит к усилению колебаний фотонов вдоль оси стержня 4, накоплению энергии и последующему испусканию ее в виде импульса ярко-красного света через полупрозрачное зеркало-резонатор 5. Системой линз 6 луч света фокусируется на поверхности обрабатываемой заготовки 7. КПД твердотельных лазеров равно 0,1–1,0 %.

Достоинства лазерных установок:

- 1) нет рентгеновского излучения;
- 2) отсутствие вакуумной системы упрощает конструкцию.

2.6. Ультразвуковая обработка

Ультразвуковая обработка представляет собой разновидность механической обработки и основана на использовании энергии ультразвуковых колебаний инструмента, воздействующих на заготовку через абразивные частицы, твердость которых намного больше твердости обрабатываемого материала. Эти частицы, получив импульс движения от колеблющегося с частотой 16 – 30 кГц инструмента, врезаются в обрабатываемую поверхность и срезают микростружки. В резании участвует 30 – 100 тыс. на 1 см² поверхности частиц, и в результате обеспечивается интенсивный съем обрабатываемого материала, а также копирование формы рабочей части инструмента на заготовке. Наиболее интенсивный съем материала происходит в направлении колебаний инструмента, на его боковых поверхностях обработка протекает менее интенсивно. Ультразвуковая обработка в жидкой среде (воде), несущей абразивные частицы, улучшает условия их обмена и интенсифицирует удаление продуктов обработки вследствие ультразвукового кавитирования жидкости в рабочей зоне.

Такой обработке подвергают лишь твердые и хрупкие материалы (стекло, ферриты, кремний, твердые сплавы ситаллы¹: технические², пет-

¹ **Ситаллы** – закристаллизованные стекла – стеклокристаллические материалы, получаемые при

роситаллы³, шлакоситаллы⁴, изделия из ситалла⁵ и т. д.). Пластичные и вязкие материалы этим методом не обрабатывают.

Наибольшая производительность обеспечивается при увеличении амплитуды ультразвуковых колебаний и соответствует оптимальной силе воздействия инструмента (3 – 60 Н) на заготовку.

Отклонение размеров деталей при обработке не более 0,02 мм (для глубины обработки 3 мм). При этом наибольшее влияние на отклонение размеров деталей оказывает размер абразивных зерен, глубина обработки и размерный износ инструмента. Шероховатость поверхностей при УЗО зависит от размеров абразивных зерен, свойств обрабатываемого материала и амплитуды колебаний инструмента. Использование небольших амплитуд, микропорошков позволяет обеспечить Ra = 1,25 – 2,50 мкм.

Ультразвуковой обработкой формируют пазы, сквозные и глухие отверстия любой формы, разрезают заготовки, гравируют и профилируют поверхности, нарезают резьбу и т. д. Инструменты для УЗО выполняют из прочных (HRC, 35–40), но вязких материалов. Для обработки сквозных отверстий диаметром 0,5–20 мм используют сплошные инструменты, а для сквозных отверстий диаметром 20–100 мм – полые, что улучшает условия циркуляции абразивных зерен и увеличивает производительность УЗО.

Размерную УЗО выполняют на УЗ станках N = 0,1–4,0 кВт. Основным узлом таких станков является акустическая головка с источником УЗ колебаний в виде магнитострикционного преобразователя, представляющего собой ферромагнитный сердечник, способный изменять свои размеры в

введении в расплавленное стекло затравки (катализаторов), в результате чего в объеме стекла возникают центры кристаллизации, на которых происходит рост кристаллов основной фазы. Изменяя состав стекла, тип катализатора и режим термообработки, можно получить ситаллы с определенными свойствами: высокой прочностью, твердостью, химической и термической устойчивостью, малым тепловым расширением и т. д.

² **Технические ситаллы** – изготавливаются на основе искусственной композиции из различных химических соединений – окислов, солей и т. д.

³ **Петроситаллы** – получают на основе горных пород: базальтов, диабазов и др.

⁴ **Шлакоситаллы** – сырьем для них служат металлургические и топливные шлаки.

⁵ **Изделия из ситалла**: листовая материал, плиты, панели, электроизоляторы, подшипники, фильеры, мелющие тела, химическая аппаратура, трубы, тара и т. д.

переменном магнитном поле (эффект магнитострикции).

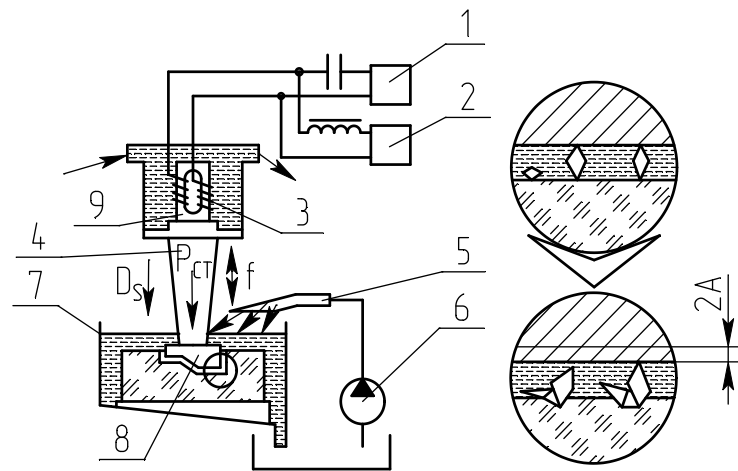


Рис. 2.6. Схема ультразвуковой обработки:

1 – генератор; 2 – источник постоянного тока; 3 – обмотка; 4 – волновод-концентратор; 5 – патрубок; 6 – насос; 7 – ванна; 8 – электрод-инструмент; 9 – сердечник

Такой способностью обладают сердечники, изготовленные из Ni, Fe-Co, Fe-Al и других сплавов. Созданные с помощью генератора 1 (рис. 2.6), источника постоянного тока 2 и обмотки 3 переменное электромагнитное поле с частотой $f = 16\text{--}30$ кГц обеспечивает амплитуду колебаний торца 9 сердечника 5–10 мкм. Для увеличения амплитуды до 60 мкм к торцу сердечника крепят резонансный волновод-концентратор 4, на конце которого закрепляют инструмент 8. Для подачи в рабочую зону инструмента абразивной суспензии станок имеет ванну 7 и патрубок 5, по которому насос 6 прокачивает суспензию.

2.7. Электроискровое легирование. Сущность. Классификация методов. Контактное легирование

В числе различных методов изменения исходных свойств поверхностей в заданном направлении наибольший интерес представляют методы,

позволяющие наносить на рабочие поверхности тугоплавкие металлы и их соединения (на поверхности деталей и режущего инструмента), в частности, метод ЭИЛ (электроискрового легирования).

Сущность его состоит в том, что при искровом разряде в газовой среде происходит разрушение материала анода и перенос продуктов эрозии на катод. При этом на поверхности катода (детали) образуется упрочненный слой высокой твердости и износостойкости. Метод ЭИЛ используется для увеличения стойкости инструмента, упрочнения и восстановления деталей машин, в производстве электрических аппаратов и полупроводниковой техники. Производительность метода: $1\text{--}5$ см²/мин.

Классификация методов ЭИЛ проводится:

а) в газовой среде компактным электродом:

- с «физическим» контактом электродов (ручное и механизированное);
- с постоянным или регулируемым межэлектродным зазором (механизированное);

б) в газовой среде с порошковыми материалами:

- в магнитном поле;
- в электрическом поле;

в) в электролитной плазме.

У нас в стране метод ЭИЛ осуществляется в основном по схеме RC на установках с ручным вибратором в газовой среде с компактным электродом (рис. 2.7). Вибрация легирующего электрода с периодическим контактом его с деталью облегчает инициирование разряда между электродами.

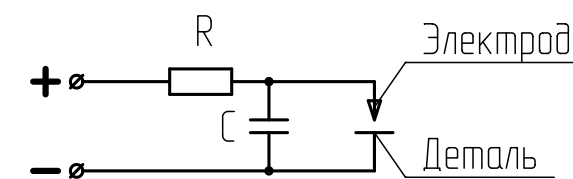


Рис. 2.7. Схема установки с ручным вибратором

По параметрам процесса ЭИЛ вибрирующим электродом можно разделить:

- а) на чистовое легирование: $I_{кз} \leq 5 - 10 A; U \geq 65 - 80 B;$
- б) грубое легирование: $I_{кз} > 40 - 50 A; U \leq 65 - 80 B;$
- в) получистовое легирование: $I_{кз}$ и U имеют промежуточные значения между чистовым и грубым.

Большинство установок для ЭИЛ выпускаются с ручным вибратором и предназначены для чистового легирования: ЭФИ-45, ЭФИ-46, ЭФИ-79, ЭФИ-80 (СССР), F-5 (США фирма Electro ARC), Tucadur-2000 (Швейцария-Италия, фирма Raduga), Carbidor MSR-FC (Швейцария), Depositron (Япония). Эти установки снабжены электромагнитными ручными вибраторами, в электродержателе которых закрепляется легирующий электрод. Достигается шероховатость $Ra = 5 - 1,25$ мкм (5–6 класс), толщина покрытия – до 0,05 мм, производительность 1–3 см²/мин.

Установки иностранных фирм в основном предназначены для упрочнения рабочих поверхностей штампового, режущего и мерительного инструмента. Материалом легирующих электродов служат сплавы на основе карбида вольфрама.

После ЭИЛ на поверхности упрочненной детали образуется слой твердостью 10–20 ГПа (1000–2000 кгс/мм²). По данным фирмы Raduga стойкость штампа для вырубки статора и ротора из электротехнической стали повысилась в 2,2 раза, стойкость инструмента для изготовления деталей горячей ковкой увеличилась в 7,5 раз. Исследованиями, проведенными в нашей стране, доказано увеличение стойкости детали и инструментов в 2 раза и более.

Чистовое легирование применяют с незначительной доводкой при упрочнении ответственных деталей машин и приборов, штампового, режущего и мерительного инструмента.

Толщина упрочненного слоя зависит от тока короткого замыкания и увеличивается при его увеличении. Поэтому для получения толщины слоя более 40–50 мкм применяют грубое легирование. При этом увеличивается Ra до 5–20 мкм ($Rz = 20 - 80$ мкм; 3–4 класс). Для этого выпускаются установки ЭФИ-25, ЭФИ-25М, которые применяются для упрочнения и восстановления деталей металлургического оборудования и сельскохозяйственной техники. Толщина упрочненного слоя достигает 200–250 мкм, $Rz = 40 - 250$ мкм.

Одним из способов увеличения производительности процесса и улучшения качества поверхности упрочненного слоя (сплошность, шероховатость) является увеличение частоты вибраций легирующего электрода. Так, на установке ЭФИ-22 при использовании повышенных частот (200, 400, 600, 1000 Гц) производительность увеличивается в 2–3 раза по сравнению с использованием частоты 50 Гц.

Другим путем повышения качества и производительности ЭИЛ является использование механизированных установок, создание которых осуществляется в двух направлениях: для вибрационного и безвибрационного легирования. Наилучшие результаты по вибрационному упрочнению достигнуты при $U = 115 - 120$ В, $I_{кз} = 0,1 - 0,5$ А, $C = 4 - 16$ мкФ, толщина упрочненного слоя равна 10–15 мкм, стойкость режущего инструмента повысилась в 3–4 раза.

Более перспективными являются механизированные установки с применением безвибрационного принципа, осуществляемого с помощью многоэлектродных головок. Применение вращающихся многоэлектродных головок облегчает механизацию процесса, позволяет наносить на поверхность детали многокомпонентные покрытия и улучшает процесс формирования упрочненного слоя.

2.8. Метод бесконтактного электроискрового легирования. Наложение электрического и магнитного полей. Электроискровое легирование в электролитной плазме

Более перспективным для автоматизированных установок ЭИЛ является *метод бесконтактного легирования* с поддержанием между электродами постоянного зазора. Метод *локального электроискрового нанесения покрытий (ЛЭН)* обеспечивает получение плотных покрытий, повторяющих рельеф поверхности, на которую они наносятся. При этом искровые разряды возбуждаются между вращающимся инструментом (анодом) и изделием (катодом), межэлектродный зазор обеспечивается следящей системой. При обработке используется независимый высокочастотный генератор импульсов (длительность импульсов тока 2 – 3 мкс, частота 140 кГц), зазор поддерживается в пределах 3 – 30 мкм, скорость вращения электродов 1500 – 3000 мин⁻¹. Метод ЛЭН используется для легирования поверхностей полупроводниковых приборов (установки ЕЛФА–111, ЕЛФА–311), легирования поверхностей деталей электроконтактной техники (ЕФА–411), упрочнения деталей машин и металлорежущих инструментов (ЕЛФА–511, 532).

При упрочнении режущего инструмента и штамповой оснастки толщина упрочненного слоя составляет 8 – 10 мкм, $R_a = 0,63 - 0,16$ мкм, стойкость повышается в 2 раза.

Известно, что обычное введение легирующих порошков в канал искрового разряда приводит к их ограниченному и неравномерному плавлению и нанесению лишь небольшой части порошка на деталь. Наложение на межэлектродный промежуток магнитного или электрического поля позволяет более эффективно использовать искровой разряд при нанесении покрытий из порошковых материалов.

В зависимости от формы обрабатываемой поверхности коммутация цепи разрядного контура (*коммутация* – переключение, перемена направ-

ления тока, преобразование переменного тока в постоянный и т. д.) осуществляется за счет вибрации ферропорошков или за счет перемещения упрочняемой детали. Применение ферропорошков в качестве легирующего электрода позволяет производить обработку при пониженном напряжении постоянного тока. В данном способе импульсность процесса обеспечивается периодическим контактированием микровыступов поверхности ферропорошков с упрочняемой деталью в результате их относительного движения. Большой ток (100 – 150А) вызывает мгновенное оплавление ферропорошков в момент контакта с деталью. Упрочнение в магнитном поле повышает производительность процесса в 4 раза по сравнению с ЭИЛ компактным электродом. Увеличение магнитной индукции повышает температуру разогрева ферропорошков и перенос их на упрочняемую поверхность; максимальное увеличение диаметра наблюдается при скорости перемещения образцов 30 – 40 м/мин; оптимальный размер частиц составляет 200 мкм. При упрочнении в магнитном поле можно применять только ферромагнитные порошки.

Располагать частицы порошков в определенном порядке можно *и в электрическом поле*. (рис. 2.8)

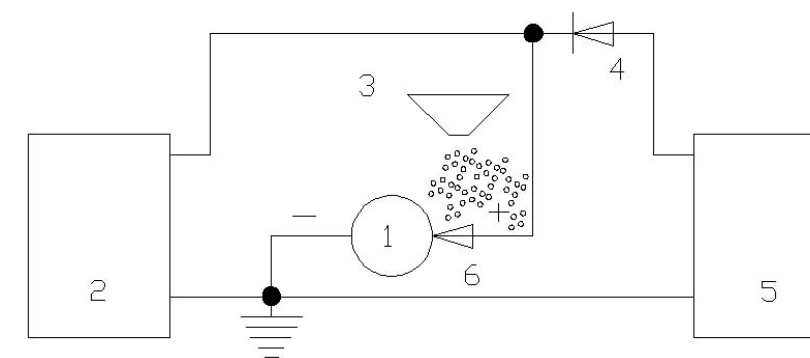


Рис. 2.8. Схема электроискрового легирования в электрическом поле:

1 – заготовка; 2 – источник тока; 3 – бункер с подушкой; 4 – диод;
5 – RC – генератор; 6 – инструмент

Низковольтные сильноточные импульсы, получаемые с помощью RC-генератора 5, подаются на деталь (катод) 1 и инструмент (анод) 6. Постоянное напряжение поступает на межэлектродный промежуток от высоковольтного слаботоочного источника 2. Мощный диод 4 служит для разделения высоковольтной и низковольтной частей установки, препятствуя проникновению высокого напряжения в искровой генератор. Порошок из бункера 3 порциями подается в межэлектродный зазор. Попадая в него, частицы порошка вызывают увеличение напряженности электрического поля до величины, большей, чем диэлектрическая прочность промежутка, в результате чего происходит инициирование разряда емкости RC-генератора 5. Под действием энергии, выделяемой в канале разряда, частицы порошка переходят частично или полностью в жидкую и парообразную фазы и переносятся на обрабатываемую поверхность. Высоковольтный поджиг рабочего промежутка способствует выделению в канале разряда высокой мгновенной тепловой мощности. Таким способом наносятся карбиды переходных металлов, ферроборалы, хромоникелевые сплавы и другие металлы в качестве покрытия на алюминий и его сплавы, что очень затруднительно при ЭИЛ-компактном электроде. Все более широкое применение находит *метод ЭИЛ в электролитной плазме*.

Этот метод позволяет осуществлять азотирование, *цианирование* (одновременное насыщение поверхности углеродом и азотом), цементацию. При химико-термической обработке в электролитной плазме предполагается, что молекулы, катионы и анионы в парогазовой оболочке под действием электрических разрядов и высокой температуры у поверхности образца распадаются на атомы и ионы химических элементов. По этой причине обычно используются водные растворы с элементами, необходимыми для проведения химико-термической обработки. Цианирование нержавеющей сталей в электролитной плазме в течение 5 мин при 900 °С позволяет получать глубину слоя 0,7 мм микротвердостью до 9000 МПа

(9ГПа). Науглероживание и цианирование сталей в электролитной плазме характеризуется большой скоростью диффузионных процессов.

2.9. Совмещенное упрочнение

Способ совмещенного упрочнения электроискровым легированием (ЭИЛ) и ультразвуком поверхностного слоя металла позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики деталей. Установка для реализации этого способа состоит из ультразвукового генератора, преобразователя с концентратором, рабочего инструмента, легирующего электрода и блока питания.

При совмещенном упрочнении происходит физико-химическое взаимодействие металла легирующего электрода с обрабатываемым материалом, характеризующееся усилением мощного ультразвукового поля. Способность ультразвуковых колебаний интенсифицировать процесс пластической деформации при небольших статических усилиях обеспечивает уплотнение слоя металла, нанесенного ЭИЛем, и уменьшение его шероховатости. При этом микрорельеф поверхности зависит от формы и размеров деформирующих элементов, физико-механических свойств наносимого и обрабатываемого металла, режимов обработки и других факторов.

В качестве примера на образцы из стали 3 и стали 20 наносили покрытие из хрома. Металлографические исследования показали, что на упрочненной поверхности имеется белый слой, затем переходная зона и основной металл, состоящий из равноосных зерен, по границам которых расположены включения второй фазы. Микротвердость белого слоя достигала 7 ГПа, а исходного металла (стали Ст.3) – 2 ГПа.

На поверхности упрочненных образцов из стали Ст.3 обнаружены карбиды хрома: Cr_3C_2 и Cr_7C_3 , а на поверхности стали 20 таких соединений не обнаружено.

Шероховатость поверхности для стали Ст.3 и стали 20 после ЭИЛ: $R_z = 34$ мкм, после УЗУ: для стали Ст.3 $Ra = 2$ мкм, для стали 20 $Ra = 1$ мкм. При совмещенном упрочнении для стали Ст. 3 $Ra = 3 - 0,6$ мкм, для стали 20 $Ra = 2 - 0,4$ мкм. Срок службы увеличился в 3 раза.

Таким образом, представление о механизме совмещенного ЭИЛ и УЗУ можно объяснить как результат совместного действия на поверхностный слой деталей в зоне схватывания диффузионного проникновения капли металла легирующего электрода и ее кристаллизации на поверхности с одновременным ультразвуковым воздействием, способствующим миграции легирующего металла в зону контакта и вызывающим пластическое деформирование, упрочнение, уменьшение шероховатости и перераспределение остаточных напряжений.

2.10. Физические основы плазменной обработки

Плазма – это частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы. Ионизация газа, т.е. разделение нейтральных атомов и молекул на ионы и электроны, вызывается его нагревом (термическая ионизация), взаимодействием с электромагнитным излучением (фотоионизация) и бомбардировкой газа заряженными частицами.

Важнейшим свойством плазмы является квазинейтральность – в объеме, большем некоторого критического – V_D , суммарный электрический заряд плазмы равен нулю. V_D носит название дебаевского объема,

$$V_D = \frac{4}{3} \pi \cdot r_D^3, \quad (2.1)$$

$$V_D = \left(\frac{2\epsilon_0 kT}{n_e q_e^2} \right)^{1/2}, \quad (2.2)$$

где r_D – дебаевский радиус; T – температура плазмы; n_e – концентрация

электронов в плазме.

Величина r_D играет значительную роль в описании свойств плазмы. Так, электрическое поле отдельной заряженной частицы экранируется частицами противоположного знака на расстоянии – r_D ; r_D – определяет глубину проникновения внешнего электростатического поля в плазму; а также протяженность области вблизи границы плазмы, где в силу большей подвижности электронов при их тепловом движении, происходит нарушение квазинейтральности и образование двойного электрического слоя (рис. 2.9)

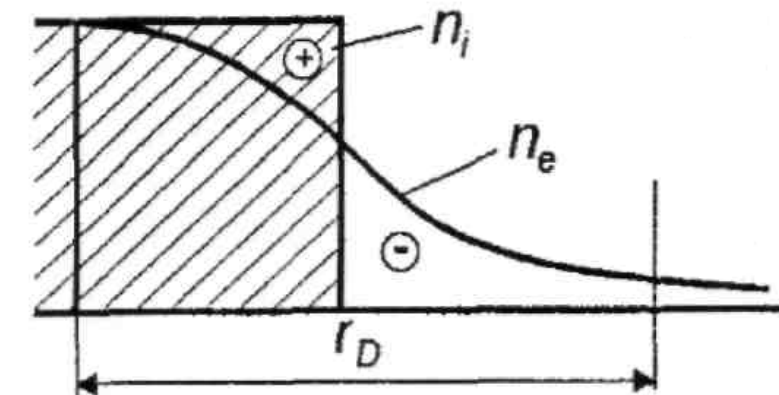


Рис. 2.9. Нарушение квазинейтральности ($n_e = n_i$) на границе плазмы

Степень ионизации плазма – α определяется как

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_a}, \quad (2.3)$$

где n_i – концентрация ионов; n_a – концентрация нейтральных атомов в плазме.

В условиях термодинамического равновесия α задается формулой Саха:

$$\alpha = (1 + K)^{-1/2}, \quad K = N_A \exp\left(\frac{E_i}{kT}\right), \quad (2.4)$$

где E_i – энергия ионизации; $N_A = n\lambda_e^3$ – число частиц всех сортов в кубе с ребром λ_e , равным тепловой длине волны де Бройля для электронов; n – их концентрация; $\lambda_e = h(2\pi/m_e kT)^{1/2}$.

Так, для Ag-плазмы при $T = 10^4$ К $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3}$; при $T = 3 \cdot 10^4$ К $\alpha = 0,116$.

Помимо температуры α сильно зависит от E_i , увеличиваясь при фиксированной T с уменьшением E_i . В зависимости от величины α различают слабоионизованную ($\alpha < 1$), сильноионизованную ($\alpha \sim 1$) и полностью ионизованную ($\alpha = 1$) плазму.

Температура плазмы T характеризует в равновесной, или изотермической плазме среднюю кинетическую энергию теплового движения частиц, что соответствует распределению Максвелла этих частиц по скоростям. В неравновесной плазме из-за резкого различия времен релаксации, т.е. времен установления теплового равновесия для электронов, ионов и атомов, средние кинетические энергии этих частиц в тепловом движении различны. Поэтому различают электронную – T_e , ионную – T_i , и атомную – T_a температуры, причем:

$$T_e > T_i > T_a. \quad (2.5)$$

Плазму, удовлетворяющую условию (2.5), называют неизо-термической. Для изотермической плазмы:

$$T_e = T_i = T_a = T. \quad (2.6)$$

Обычно это условие выполняется при высоких давлениях в плазме (рис. 2.10).

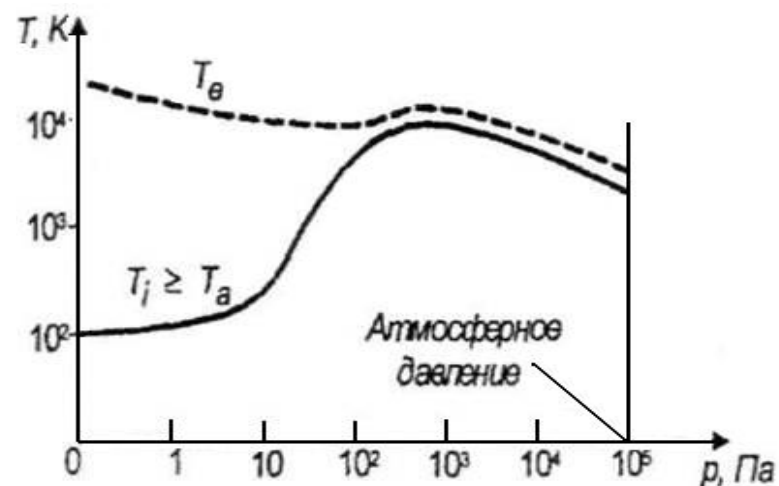


Рис. 2.10. Зависимости электронной T_e и ионной T_i температур от давления p

Низкотемпературной плазмой принято считать плазму с $T < 10^5$ К, вы-

сокотемпературной – с $T \geq 10^6$ – 10^7 К. В технологиях обработки материалов применяется низкотемпературная плазма.

В отличие от нейтральных газов между частицами плазмы действуют кулоновские силы притяжения и отталкивания. Плазма «ведет себя» как идеальный газ, если энергия кулоновского взаимодействия $E_{кул.} \sim (n_e/T)^{1/2}$ мала по сравнению с тепловой $E_T \sim T$. Например, для Ag-плазмы с однозарядными ионами Ag^+ при $T = 1,1 \cdot 10^4$ К кулоновским взаимодействием можно пренебречь, если $n < 10^{22} \text{ м}^{-3}$. В этом случае полная энергия изотермической плазмы практически совпадает с ее тепловой энергией, а давление p находится по уравнению состояния идеального газа:

$$P = (n_e + n_i + n_a)kT = nkT, \quad (2.7)$$

$$n = (n_e + n_i + n_a). \quad (2.8)$$

Переход газа в состояние плазмы связан с поглощением молекулами (атомами) газа энергии, необходимой для «развала» молекулы на атомы (диссоциация) и «отрыва» электрона (электронов) от атома с превращением последнего в ион (ионизация). Обычно для чистых газов энергия ионизации E_i более, чем вдвое, превышает энергию диссоциации E_d , так что в чистых газах в области заметной ионизации (а это происходит при температурах $T = 1/10 E_i/k$) молекул чаще всего уже не остается.

В смесях газов может быть иная ситуация. Например, ионизация воздуха начинается с отрыва электрона (ионизации) молекул NO, которые образуются при нагреве воздуха и обладают низким потенциалом ионизации. Ионизации, таким образом, могут подвергаться не только атомы, но и молекулы – в результате образуются молекулярные ионы и электроны.

Другим важным, влияющим на энергобаланс плазмы элементарным процессом, является перезарядка – быстрый ион, сталкиваясь с нейтральным медленным атомом, «забирает» у него электрон. В результате образуется быстрый нейтральный атом и медленный ион. Перезарядка – основной канал потерь энергии быстрыми ионами.

Процессы, обратные диссоциации и ионизации – ассоциация и рекомбинация – происходят с выделением энергии, причем в разреженной плазме эта избыточная энергия выделяется в виде излучения. В плотной плазме ассоциация и рекомбинация происходят при столкновениях частиц плазмы.

С точки зрения термических технологий плазменной обработки материалов энергии ассоциации и рекомбинации представляют собой один из видов внутренней энергии плазмы, трансформирующейся в теплоту при воздействии плазмы на поверхность обрабатываемого материала. Например, в Ag^+ -плазме при $T = 3 \cdot 10^4$ К и $p = 10^5$ Па плотность энергии рекомбинации составляет $w_i = 9,8 \cdot 10^6$ Дж/м³, в то время как плотность тепловой энергии $w_T = 3,8 \cdot 10^6$ Дж/м³. Таким образом с учетом энергий ассоциации и рекомбинации обобщенной энергетической характеристикой плазмы является удельная энтальпия -И, или теплосодержание, которая, например, для изотермической плазмы одноатомного газа составляет:

$$h = \frac{1}{m_a} \left(\frac{5}{2} kT(1 + \alpha) + \alpha \cdot E_i \right), \quad (2.9)$$

где m_a – масса атома (иона); E_i – энергия ионизации атома.

Для получения высоких температур плазмы применяются одноатомные газы, например, Аг, для получения высоких энтальпий – многоатомные, с возможно большими величинами энергии диссоциации. Так как $h \sim 1/m_a$, то наибольшей удельной энтальпией ([Дж/кг]) обладает водород.

Баланс энергии плазмы должен также включать и кинетическую энергию направленного движения плазмы. Плотность этой энергии составляет:

$$W_{\text{кин}} = \rho u^2/2, \quad (2.10)$$

где $\rho = m_i n_i + m_a n_a = m_i (n_i + n_a)$ – плотность «плазменного» вещества, u – скорость направленного движения плазмы.

В отсутствие полей облако ионизованного газа - плазмы расплывается за счет диффузии заряженных частиц. Так как при $T_e = T_i$ скорости элек-

тронов - v_e и ионов v_i относятся как $v_e/v_i = (m_i/m_e)^{1/2} \gg 1$, а коэффициенты диффузии их - $D_e/D_i \sim v_e/v_i$ соответственно, т. е. $D_e \gg D_i$, то спустя некоторое время на месте первоначального облака остался бы некомпенсированный положительный заряд. Действительно, так и происходит, когда $n_e = n_i$ малы. Фактически это означает, что размер облака $r \ll r_D$, и подобная диффузия называется свободной, когда ионы и электроны диффундируют независимо. Однако при $r \gg r_D$ «разделения» зарядов и, следовательно, нарушения электронейтральности не происходит – более быстрые электроны «тянут» за собой более медленные ионы, последние тормозят таким образом диффузионное движение электронов. Такая согласованная диффузия электронов и ионов называется амбиполярной, а ее коэффициент диффузии D_a имеет вид:

$$D_a = \frac{D_i \mu_e + D_e \mu_i}{\mu_e + \mu_i}, \quad (2.11)$$

где μ_e и μ_i – подвижности электронов и ионов, соответственно.

Подвижности зависят от так называемой эффективной частоты столкновений выделенной частицы плазмы с частицами другого сорта (например, электронов с ионами и атомами) – ν_m , а именно:

$$\mu_e = \frac{q_e}{m_e \nu_m}, \quad \mu_i = \frac{q_i}{m_i \nu_m}. \quad (2.12)$$

Так как $m_e \ll m_i$, $D_e \gg D_i$, то

$$D_a \cong D_i + D_e \frac{\mu_i}{\mu_e}, \quad (2.13)$$

т. е. больше D_i , но меньше D_e .

В равновесной плазме, где $T_e = T_i$, $D_a = 2D_i$. Расчеты показывают, что при $T_e = 10^4$ К и $r \sim 10^{-2}$ м диффузия будет амбиполярной для $n > 10^{12}$ м⁻³, т. е. практически для всех технических применений плазмы.

При наличии внешнего электрического – E и магнитного – B полей характер движения электронов и ионов и, следовательно, плазмы в целом

существенно изменяется. Определяющим при этом будет именно движение электронов как более подвижных частиц.

Неизменное во времени и однородное в пространстве электрическое поле действует на электрон с силой $F_e = -q_e E$, что при наличии столкновений его с ионами и атомами плазмы приводит к дрейфовому движению электрона с постоянной средней скоростью v_d , причем

$$\vec{v}_d = -\frac{q_e \vec{E}}{m_e \nu_m}. \quad (2.14)$$

Отсюда проводимость плазмы (в пренебрежении ионным током, он меньше электронного в $\mu_e / \mu_i \gg 1$ раз) – σ_e есть

$$\sigma_e = -\frac{q_e^2 n_e}{m_e \nu_m}. \quad (2.15)$$

В области $\alpha < 10^{-3}$ проводимость пропорциональна n_e/n_a ; в области $\alpha > 10^{-3}$, где существенную роль играют столкновения электронов не с атомами, а с ионами, проводимость падает и практически перестает зависеть от n_e .

В этой области

$$\sigma_c = AT^{3/2}, \quad (2.16)$$

где

$$A = \frac{(4\pi\epsilon_0)^2 (3k)^{3/2}}{\pi \cdot q_e^2 m_e^{1/2} L},$$

L – так называемый кулоновский логарифм, $L = 10-15$.

Над электроном,двигающимся с дрейфовой скоростью v_d , силы поля в единицу времени совершают работу – $q_e E v_d$. Поэтому плотность мощности тока, протекающего через плазму, – q_T есть

$$q_T = jE = q_e n_e v_d E = \sigma_e E^2.$$

Это – джоулево тепло тока – диссипация энергии поля, вызванная существованием столкновений электронов с атомами и ионами. Приобретая на длине свободного пробега l энергию $\Delta W = q_e E l \approx m V_o^2$, электрон при

столкновении передает атому или иону эту кинетическую энергию направленного (дрейфового) движения, так что после очередного столкновения скорость электрона оказывается полностью «хаотизированной» – вектор скорости электрона в среднем равен нулю. Переданная энергия переходит в теплоту, нагревающую плазму.

В свою очередь ионы в достаточно сильном поле E тоже набирают энергию сверх тепловой $3/2$ кТ. Эта добавочная энергия, полученная от поля на длине свободного пробега иона, определяется по формуле:

$$\Delta W_i = (m_a + m_i)^{3/2} / 2 m_a \cdot m_i^{1/2} q_e E l. \quad (2.17)$$

Эта формула относится к случаю, когда $T_i \gg T_a$, а поле E достаточно велико. В отличие от электронов этот прирост энергии ионов накапливается не в хаотической, т. е. тепловой, форме, а в направленной составляющей движения, т. е. в направлении вектора E .

Однородное магнитное поле B также влияет на дрейф, электрический ток, диффузию зарядов в плазме, особенно, если оно достаточно велико. Это влияние обусловлено магнитной силой, или силой Лоренца F_m , т. е.

$$\vec{F}_m = q[\vec{v} \times \vec{B}], \quad (2.18)$$

где v – скорость движения заряда q . Как известно, если скорость заряда q массой m равна v и направлена под углом β к B , то траектория движения заряда имеет вид спирали, шаг которой h определяется продольной составляющей скорости $v_{\text{прод}} = V \cos \beta$

$$h = \frac{2\pi m v \cos \beta}{qB}, \quad (2.19)$$

а радиус спирали r поперечной составляющей $v_{\text{поп}} = V \sin \beta$, имеет вид

$$r = \frac{m v \sin \beta}{qB}, \quad (2.20)$$

Траектория заряда как бы «навивается» на вектор B .

Уравнение движения электрона под действием F_c и F_m , а также с учетом «силы трения», обусловленной его столкновениями с ионами и атома-

ми в плазме, имеет вид:

$$m_e \vec{v} = -q_e \vec{E} - q_e [\vec{v} \times \vec{B}] - m_e \vec{v} v_m. \quad (2.21)$$

Последний член справа учитывает эффект столкновений. Если E и B параллельны, то никакого влияния на дрейф B не оказывает, так как $v \uparrow \uparrow E \uparrow \uparrow B$ и $v \times B = 0$. Поэтому, не нарушая общности рассмотрения, можно считать $B \perp E$, т.е. магнитное и электрическое поле скрещены: $E = E_x$, $B = B_z$.

В стационарном случае $v = 0$ и $v = v_d$. Спроецируем на оси x, y, z , после решения полученной системы, находятся составляющие дрейфовой скорости:

$$v_{dx} = -\mu_e \frac{E_x}{1 + \frac{\omega_e^2}{v_m^2}}, \quad v_{dy} = \mu_e \frac{\frac{\omega_e}{v_m} E_x}{1 + \frac{\omega_e^2}{v_m^2}}, \quad v_{dz} = 0, \quad (2.22)$$

где $\mu_e = q_e / m_e v_m$ - подвижность в отсутствие магнитного поля.

Следует:

а) в скрещенных полях E и B скорость дрейфа не совпадает по направлению с E ;

б) в направлении E дрейфовая составляющая $v_{dx} < v_d$ - в отсутствие поля B ;

в) возникает дрейф в направлении, перпендикулярном к E и B при этом, когда $(\omega_e / V_m)^2 \gg 1$, то получается:

$$v_{dy} = \frac{E}{B}, \quad (2.23)$$

г) в сильном магнитном поле - $(B / \mu_e)^2 \gg 1$ подвижность вдоль E уменьшается в B^2 раз. Плотность тока $j = -q_e n_e v_d$ не совпадает по направлению с E . Плотность тока в направлении оси y - $j_y = \sigma E_y$ называется током Холла. Джоулева тепла этот ток не выделяет, так как $j_y E = 0$.

Плотность тепловой мощности - q_T^* определяется:

$$q_T^* = \vec{j} \vec{E} = \frac{\sigma_e E^2}{1 + \frac{\omega_e^2}{v_m^2}}, \quad (2.24)$$

где $\sigma_e = q_e^2 n_e / m_e v_m$, или в сильном магнитном поле, когда $(\omega_e / v_m)^2 \gg 1$, $q_T^* = V_m^2 \sigma_e E^2 / \omega_e^2 \ll \sigma_e E^2 = q_m$, т. е. в присутствии сильного магнитного поля тепловыделение в плазме уменьшается.

Что касается ионного тока, то для него эффекты, аналогичные выписанным, наступают при существенно больших магнитных полях, так как ионная циклотронная частота ω_i определяется по формуле

$$\omega_i = q_i B / m_i \quad (2.25)$$

существенно ниже электронной - $\omega_i / \omega_e = m_e / m_i \ll 1$, q_i - заряд иона, $q_i = q_e$ для однозарядных ионов. Таким образом, в достаточно широком диапазоне магнитных полей от $B_{e-кр} = m_e V_m / q_e$ до $B_{i-кр} = m_i V_m / q_i$ магнитное поле не влияет на движение ионов и, напротив, сильно влияет на движение электронов.

Так как в диффузионном потоке заряженные частицы обладают отличной от нуля средней скоростью, то действие градиента плотности и эквивалентно действию электрического поля. Значит, магнитное поле B влияет на диффузию также, как и на дрейф. А именно:

а) вдоль магнитного поля частицы диффундируют также, как и без поля;

б) в поперечном направлении они диффундируют с коэффициентом диффузии $D_{\perp} < D_{e,i}$, где $D_{e,i}$ - коэффициенты диффузии электронов и ионов при $B = 0$;

$$D_{\perp} = D_{e,i} \left(1 + \frac{\omega_{e,i}^2}{v_m^2} \right)^{-1}; \quad (2.26)$$

в) в очень сильном поле B

$$D \perp \cong \frac{D_{e,i} v_m^2}{\omega_{e,i}^2} . \quad (2.27)$$

Так как $\omega_i \ll \omega_e$, то ионы диффундируют поперек поля быстрее, чем электроны; вдоль, как обычно, медленнее. В целом, сильное B уменьшает диффузионный поток заряженных частиц, т. е. препятствует «расплыванию» плазмы за счет диффузии (так называемое магнитное удержание плазмы).

ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ (ЭХО) И ПРИМЕРЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

3.1. Разновидности ЭХО

При протекании тока через электропроводные жидкости (электролиты) происходит процесс электролиза, подчиняющийся законам Фарадея. В зависимости от конкретных условий наблюдаются такие процессы, как осаждение на катоде тех или иных металлических элементов, входящих в состав электролита; образование на аноде окисных пленок, растворение металла анода и др.

Для ускорения подобных процессов прибегают к различным искусственным приемам, которые позволяют осуществлять размерную обработку, использующую явление анодного растворения.

Среди процессов ЭХО выделяют 3 группы:

Первая группа. Размерная ЭХО в движущемся электролите.

Автор этого метода обработки В. Н. Гусев назвал его «Электрогидравлическим»; позже ему давали названия: «Размерная ЭХО в проточном электролите»; «Анодно-гидравлическая обработка»; «Электрохимико-гидравлическая обработка» и др.

Но чаще всего этот процесс называют «Размерной ЭХО». Слово «размерная» применяют для того, чтобы подчеркнуть, что электрохимические явления использованы в данном случае в целях формообразования, а не для обработки поверхности изделий (полирование, анодирование, нанесение покрытий, окраска и т. д.).

Вторая группа. Анодно-абразивная обработка, в которой сочетаются процессы анодного растворения и абразивного резания.

Третья группа. Электроэрозионно-химическая обработка, использующая комбинацию анодного растворения и процессов, которые обычно сопровождают электроэрозионную обработку.

3.2. Теория ЭХО. Электродные процессы

При ЭХО, ведущейся на постоянном напряжении (от единиц до нескольких десятков вольт), съём металла заготовки происходит непрерывно и одновременно на всей обрабатываемой поверхности.

ЭХО осуществляют на прямой полярности: ЭИ – катод, ЭЗ – анод. Рабочей средой служит водный раствор электролита, прокачиваемый через МЭП насосом.

Формообразование основано на явлении анодного растворения: ток через границу анод-раствор сопровождается переходом вещества ЭЗ из атомного состояния (в заготовке) в ионное (в растворе). Перенос зарядов между ЭИ и раствором обеспечивает реакция восстановления водорода.

Средние плотности тока на ЭЗ достигают нескольких ампер на мм², зазор лежит в пределах 0,05 – 1 мм.

Электрохимия – наука, изучающая поведение ионов в растворах и явления на границе между твердым телом и раствором.

В полярном растворителе, в том числе и воде, молекула электролита диссоциирует (распадается) на положительно заряженные катионы и отрицательно заряженные анионы.

Для ЭХО используют концентрированные растворы сильных электролитов: NaCl, NaNO₃, H₂SO₄, NaOH и др.

Все молекулы сильного электролита диссоциируют на ионы, окружаемые полярными молекулами воды (так называемой гидратной оболочкой).

После погружения электрода в раствор в системе электрод – электролит устанавливается равновесное состояние, при котором через границу металл – раствор внешний ток отсутствует, поскольку электрод пока ни в какую цепь не включен.

На поверхности электрода протекает обратимая электрохимическая реакция:



где n – валентность металла; Me^{n+} – ион в растворе.

В общем случае энергия, которой обладает ион Me^{n+} в растворе, не равна энергии атома Me в кристаллической решетке металла.

Через границу металл – раствор переходят заряженные частицы, поэтому неравенство указанных энергий означает существование *равновесного электрического потенциала* (ϕ_p) металла относительно раствора. Поверхность металла, а также ионы в растворе образуют *двойной электрический слой*, в котором (со стороны раствора) различают плотную и диффузную часть. Толщина плотной части, которая состоит из ионов, тесно примыкающих к электроду, приблизительно равна радиусу самих гидратированных ионов, т. е. $\approx 10^{-9}$ м.

Диффузная часть размыта вследствие теплового движения ионов в растворе, ее толщина уменьшается с ростом концентрации электролита и поэтому в условиях ЭХО очень мала. Двойной слой эквивалентен конденсатору, имеющему на обкладках разность потенциалов, равную ϕ_p , и довольно большую удельную емкость (0,2 – 0,6 мкФ/мм²).

Разность потенциалов (ϕ_p) локализуется в двойном электрическом слое, т. е. в основном в плотной его части.

При равновесии одинаковы скорости прямой и обратной реакций по уравнению (1), т. е. соответственно окисления атомов Me (ионизации) и восстановления ионов Me^{n+} (осаждения).

Скорость электрохимической реакции определяется плотностью тока. Для пересечения границы раствор – электрод, между которыми имеется произвольная разность потенциалов ($\phi_{эл}$), электроны, участвующие в реакции, должны преодолеть некоторый потенциальный барьер.

Для всех электронов, принявших участие в реакции 1 кг·моль металла, энергию необходимо умножить на 1000 N (N – число Авогадро), поскольку

в 1 кг·моль содержится $10^3 N$ атомов металла.

1 кг·моль вещества имеет массу, значение которой в килограммах численно равно атомной или молекулярной массе вещества.

Число Авогадро – число структурных элементов (атомов, молекул, ионов) в одном моле вещества. $N = 6,022045 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Упомянутые выше энергии: $\Delta W_{\text{ок}} \cdot N \cdot 10^3$ и $\Delta W_{\text{вос}} \cdot N \cdot 10^3$ для реакции являются энергиями активации. ($\Delta W_{\text{ок}}$ – энергия активации окисления, $\Delta W_{\text{вос}}$ – энергия активации восстановления).

Потенциал электрода измеряют не относительно раствора, а относительно так называемого *нормального водородного электрода* (н.в.э.), на поверхности которого в стандартных условиях протекает обратимая реакция



Потенциал н.в.э. по отношению к раствору при всех температурах условно считается равным нулю.

Положительное направление принято считать для потенциалов от анода к раствору и от раствора к катоду.

Электродные процессы

Электродными процессами называют явления, происходящие при потенциале электрода ($\phi_{\text{эл}}$), отличном от равновесного.

Разность потенциалов $\Delta\phi = \phi_{\text{эл}} - \phi_{\text{р}}$ называется перенапряжением.

При $\Delta\phi \neq 0$ через границу электрод-раствор проходит внешний ток, нарушается равновесие прямой и обратной реакции и преобладающими становятся процессы окисления:



или восстановления:



Если происходит окисление, то электроны переходят в раствор. Для

того чтобы происходил процесс окисления, нужно соответствующий электрод подключить к положительному зажиму источника питания (ИП), при этом сам процесс называется анодным.

Плотность тока на аноде $i_{\text{эл}}$ равна разности $i_{\text{ок}}$ и $i_{\text{вос}}$ – плотностей токов окисления и восстановления.

Если положительное перенапряжение очень велико, то скорость окисления намного больше скорости восстановления. При этом плотность анодного тока равна плотности тока окисления.

В процессах восстановления $\Delta\phi < 0$. При большом отрицательном перенапряжении восстановление протекает быстрее окисления и поэтому плотность катодного тока равна плотности тока восстановления.

На чистой поверхности, не покрытой слоем какого-либо вещества (на так называемом активном электроде), электродный процесс обычно складывается из двух последовательных стадий: собственно электрохимической реакции в плотной части двойного слоя и диффузионной, которая обеспечивает подвод или отвод участников реакции к двойному слою (или от него).

Если максимальная скорость диффузии вещества в растворе велика, то говорят, что электрод работает в режиме *электрохимической кинетики*, а перенапряжение ($\Delta\phi$) называют электрохимическим ($\Delta\phi_{\text{эх}}$). Концентрации веществ в двойном слое существенно не меняются в сравнении с равновесными.

Если предельные скорости диффузионного отвода или доставки веществ к поверхности электрода невелики, то при протекании электродного процесса концентрации ионов в двойном слое будут отличаться от равновесных значений.

В результате двойной слой обогащается веществом, возникающим после реакции, и обедняется веществом, которое вступает в реакцию.

Режим, когда электрохимическое перенапряжение небольшое, называется режимом *диффузионной кинетики*, а перенапряжение ($\Delta\phi$) называ-

ется концентрационным ($\Delta\varphi_{\text{кон}}$), поскольку оно вызвано изменением концентраций веществ в двойном слое.

Приэлектродный слой раствора, на протяжении которого выравниваются концентрации реагирующих веществ до соответствующих значений во внутренних областях раствора, носит название *диффузионного слоя*.

Если предельные скорости диффузионной и электрохимической стадий соизмеримы, то возникает режим *смешанной кинетики*.

На одном электроде может одновременно протекать несколько электродных процессов.

Отношение доли тока, переносимого за счет данной реакции, к полному току через электрод называется выходом по току (A). A – величина безразмерная.

Для анодного растворения скорость удельного съема (m_z , кг/(м²·с)), определяется по закону Фарадея:

$$m_z = A \cdot E_z \cdot i_{\text{ан}}, \quad (3.4)$$

где E_z – электрохимический эквивалент металла электрод – заготовки, кг/А·с.

3.3. Катодные процессы

На поверхности ЭИ простейшая реакция восстановления водорода $2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2$ протекает при ЭХО в концентрированных кислотах. Поскольку концентрация ионов H^+ в нейтральных и щелочных растворах мала, то данная реакция не может обеспечить высокой плотности катодного тока. Поэтому в таких растворах на ЭИ происходит разложение воды:



Стандартный потенциал такой реакции около $-0,8\text{В}$. В этом случае не наблюдается недостатка во вступающих в реакцию молекулах воды и основная часть перенапряжения – электрохимическая.

В результате реакции разложения воды в раствор переходят ионы OH^- , вблизи катода рабочая среда подщелачивается. На ЭИ возникают пузырьки водорода, которые при сообщении движения электролиту смываются с его поверхности.

По закону Фарадея на единице поверхности ЭИ в единицу времени выделяется масса водорода:

$$M_{\text{вод}} = E_{\text{вод}} \cdot i_{\text{кат}}, \quad (3.6)$$

где $E_{\text{вод}}$ – электрохимический эквивалент водорода.

Масса водорода, выделившегося за одну секунду на всей поверхности ЭИ в кг/с:

$$M_{\text{вод}} = 1 \cdot 10^{-8} \cdot J_{\text{ср}}, \quad (3.7)$$

где $J_{\text{ср}}$ – средний рабочий ток, А.

Реакции разложения воды, протекающей при плотности тока на инструменте ($i'_{\text{кат}}$), соответствует некоторый потенциал катода ($\varphi'_{\text{кат}}$) относительно раствора. Этот потенциал может оказаться меньше (алгебраически), чем равновесный потенциал другой реакции, например, осаждения катионов. Если это так, то для данной реакции возникающее перенапряжение ($\varphi'_{\text{кат}} - \varphi_{\text{р2}}$) оказывается отрицательным, и она может протекать как катодный процесс. В этом случае на ЭИ могут осаждаться катионы с большим равновесным потенциалом $\varphi_{\text{р2}}$, в частности те, которые перешли в раствор вследствие анодного растворения материала заготовки (Fe^{2+} , Ni^{2+} и др.).

Появление осадка на инструменте снижает точность и стабильность ЭХО.

Обычно благодаря подщелачиванию почти все ионы обрабатываемых металлов не достигают прикатодной области, поскольку образуются нерастворимые гидроксиды ($\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Ni}(\text{OH})_2$).

При малой плотности тока и незначительном подщелачивании возможно появление осадка, чего не наблюдается на электрод - инструменте

из металлов с высоким стандартным потенциалом (медь, серебро). На инструменте не происходит осаждения катионов самого электролита (в частности, катионов щелочных металлов Na^+ , K^+), имеющих высокий отрицательный стандартный потенциал, меньше, чем рабочий потенциал катода.

3.4. Анодные процессы

Анод сохраняется активным лишь при небольших анодных перенапряжениях ($\Delta\varphi > 0$).

При высоких потенциалах анода ($\varphi_{\text{ан}}$) (более так называемых потенциалов пассивации - $\varphi_{\text{п}}$) на его поверхности вследствие окисления металла, например, кислородом, содержащимся в молекулах воды, образуется окисный слой.

Потенциал активного анода ($\varphi_{\text{ан}}$), равный $\varphi_{\text{п}}$, может быть достигнут благодаря суммарному или независимому действию концентрационного или электрохимического перенапряжений.

Появление слоя с высоким электрическим сопротивлением замедляет анодное растворение и приводит к так называемой *пассивации*.

Потенциал пассивного анода включает в себя и падение напряжения в пассивирующем слое при протекании рабочего тока.

В режиме электрохимической кинетики потенциал анода является функцией местной плотности тока: $\varphi_{\text{ан}} = f(i_{\text{ан}})$.

Такая зависимость называется анодной поляризационной характеристикой. Ее снимают экспериментально.

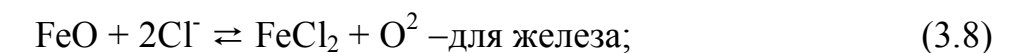
Анионы электролита делятся на три группы в зависимости от того, как они меняют поведение анода по сравнению с некоторым идеальным случаем, когда в растворе находятся только ионы обрабатываемого металла:

1) активирующие, устраняющие действия окисной пассивации и ускоряющие анодное растворение;

2) нейтральные;

3) пассивирующие, замедляющие анодное растворение.

Воздействие *активирующих* анионов на процесс растворения объясняется тем, что при определенных концентрациях, температуре и анодном потенциале они могут частично или полностью вытеснять кислород из поверхностных окислов и образовывать растворимые соединения металла, которые диффундируют от анода, а затем уже в растворе диссоциируют на ионы.



Активирующая способность проявляется избирательно по отношению к обрабатываемому металлу и может быть оценена как по тепловому эффекту реакции вытеснения кислорода, так и по растворимости продуктов этой реакции.

В частности, ионы гидроксидов OH^- активируют только многовалентные металлы W и Mo, поскольку после реакции вытеснения кислорода образуются растворимые в щелочах кислоты.

Ионы хлора обычно активны по отношению к железу.

Анодное растворение в условиях ЭХО включает в себя промежуточную стадию окисления металла ЭЗ, недостаток активирующих анионов может замедлить процесс обработки, поэтому для ЭХО используют концентрированные растворы электролитов.

Подбор раствора для ЭХОсплавов осложняется тем, что нередко некоторые анионы электролита являются активирующими для одного компонента сплава, но растворение других не ускоряют (или даже тормозят).

Нередко пассивация отдельных элементов в сплаве прекращает обработку.

Общий электрохимический эквивалент сплава ($E_{\text{сп}}$) определяют по

формуле:

$$E_{cn} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{K_i}{E_i}}, \quad (3.10)$$

где K_i – относительное содержание i -го элемента по массе;

E_i – электрохимический эквивалент i -го элемента;

N – число элементов в сплаве.

Удельную плотность сплава определяют по формуле:

$$\rho_{сп} = \sum_{i=1}^N K_i \cdot \rho_i, \quad (3.11)$$

где ρ_i – удельная плотность i -го элемента.

3.5. Гидродинамические процессы при ЭХО

Скорости течения раствора в МЭП доходят до десятков м/с. Раствор в МЭП может вводиться через отверстие в ЭИ.

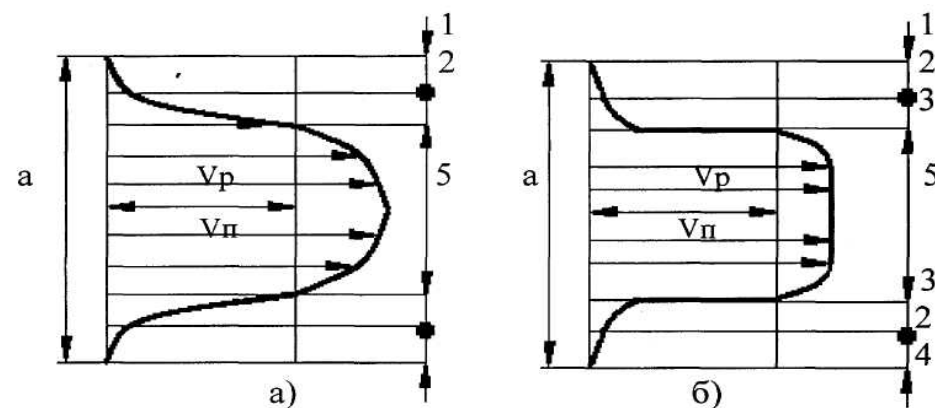


Рис. 3.1. Схема течения электролита:

а – турбулентный поток; б – ламинарный поток

1, 4 – электроды; 2 – квазитвердый слой жидкости; 3 – ламинарный подслой; 5 – турбулентное ядро потока; V_p – скорость раствора в зазоре;
 a – зазор

Непосредственно около электродов 1 и 4 существует так называемый *квазитвердый слой* жидкости (2 на рис. 3.1, а), толщина которого составля-

ет несколько ионных рядов (до 0,01 мкм). На этот слой распространяется молекулярное электростатическое воздействие твердого тела.

Наличие этого слоя, где жидкость практически неподвижна, уменьшает живое сечение потока и не обеспечивает предел сужения МЭП.

Гидродинамический режим характеризуют безразмерным числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_p \cdot a}{\nu}, \quad (3.12)$$

где a – зазор; V_p – средняя скорость раствора в зазоре; ν – кинематическая вязкость жидкости.

При $Re > 2000$ возникает устойчивый турбулентный, а при $Re < 1000$ – ламинарный режимы потока.

Так как местные значения V_p , ν непостоянные по длине МЭП, то в разных его областях одновременно могут существовать оба режима.

В *ламинарном* потоке отсутствуют завихрения жидкости. Приэлектродные слои, где раствор движется медленнее, чем в середине потока, имеют неравномерную толщину.

В *турбулентном* потоке происходит беспорядочное перемешивание раствора. Такое движение жидкости характеризуется средней скоростью потока (V_p) и скоростью беспорядочных пульсаций (V_n), местные значения которых меняются в МЭП. Для ориентировочных расчетов принимают:

$$V_n = \frac{0,4 Re^{0.25}}{V_p} \quad (3.13)$$

Непосредственно около анода и катода (рис. 3.1, б) существует ламинарный подслой 3, толщина которого близка к $5\nu/V_n$; турбулентное ядро потока 5 с полностью развитым вихревым движением начинается на расстоянии $0,3\nu/V_n$ от поверхности электродов 1 и 4.

При выборе насоса для прокачки электролита необходимо знать перепад давления между входом и выходом из МЭП, то есть *гидравлические*

потери, которые складываются из местных потерь, возникающих вследствие изменения формы и размеров МЭП, и потерь на трение о поверхности электродов.

Доля местных потерь мала в ламинарном режиме и велика в турбулентном. Требуемый для ЭХО перепад давлений увеличивается с уменьшением МЭП, увеличением площади обработки, увеличением расхода жидкости и увеличением вязкости жидкости.

Жесткость механической части станка должна быть повышена при обработке больших заготовок и высоком давлении прокачки.

При использовании инструмента, не имеющего оси симметрии, на него могут действовать значительные изгибающие силы.

В потоке раствора водородные пузырьки отрываются от ЭИ, поэтому около катода пограничные слои жидкости насыщены газом.

В ядре турбулентного потока пузырьки равномерно распределены по сечению, в ламинарном потоке пузырьки располагаются в основном вдоль поверхности ЭИ.

Для ускорения эвакуации продуктов обработки и отвода теплоты из МЭП необходимо увеличить скорость прокачки электролита, чему препятствует как увеличение гидравлических потерь, так и нарушение сплошности потока: кавитация, разделение потока на ряд отдельных струй и застойные зоны.

В областях нарушения сплошности уменьшается скорость анодного растворения, возникшие на поверхности ЭЗ выступы снижают точность ЭХО и повышают вероятность коротких замыканий между электродами.

Кавитация появляется в тех частях МЭП, где гидростатическое давление в жидкости меньше, чем давление насыщенных паров раствора.

При кавитации жидкость насыщается пузырьками пара, увеличивается местное гидравлическое сопротивление МЭП, уменьшается электропроводность раствора, уменьшается площадь поверхности контакта между ЭЗ

и раствором. В итоге уменьшается скорость анодного растворения и появляются так называемые струйные неровности.

Кавитацию устраняют:

- 1) введением сжатого газа в раствор;
- 2) применением ЭИ с несколькими отверстиями (при обязательном наличии центрального отверстия);
- 3) изменением на обратное направление движения раствора;
- 4) увеличением статического давления в жидкости при обработке в герметичной камере, где давление выше атмосферного;
- 5) применением ЭИ со специальной геометрией отверстия;
- 6) охлаждением раствора.

3.6. Химические реакции в потоке при ЭХО. Перенос теплоты в МЭП

Если электролит подобран правильно, то в *прианодном* слое соединения металла с анионами диссоциируют, при ЭХО в хлористом натрии согласно реакции :



Для нормального протекания *катодного* процесса необходимо, чтобы гидроксильные соединения катионов (Na^+ , K^+) были хорошо растворимы; в противном случае, в частности, для катионов Ca^{2+} на ЭИ возникает осадок, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, нарушающий стабильность ЭХО. В потоке раствора происходят необратимые реакции между ионами OH^- и катионами металла (Me^{n+}) с образованием шлама – нерастворимых гидроксильных соединений: $\text{Me}(\text{OH})$, $\text{MeO}(\text{OH})$.

Перенос теплоты в МЭП

Протекание тока через МЭП сопровождается выделением в единице

объема раствора Джоулевой теплоты.

Теплота образуется также вследствие прокачки под давлением вязкой жидкости (электролита) через МЭП. По мере удаления от места входа раствора в МЭП (по длине потока) увеличивается средняя температура рабочей среды и на выходе из МЭП достигает максимального значения.

Величину повышения температуры электролита на выходе находят из баланса теплоты, полагая, что на нагревание рабочей среды расходуется вся мощность источника питания ($P_{ип}$) и вся мощность двигателя ($P_{дв}$), приводящего во вращение насос для прокачки.

Эта суммарная мощность определяет величину *минимального расхода* жидкости, при котором она не закипает по формуле:

$$Q_{\min} = 3,2 \cdot 10^{-8} (P_{ип} + P_{дв}). \quad (3.15)$$

В общем случае температура раствора распределена неравномерно, как по длине потока, так и в каждом его сечении. Неравномерность температуры раствора по длине уменьшается с увеличением его расхода, а неравномерность падает при турбулизации потока. В месте ввода рабочей среды в МЭП электропроводность раствора такая же, как в ванне. По длине потока меняется средняя электропроводность в сечении вследствие нагревания раствора и увеличивается газонаполнение.

3.7. Подбор раствора при ЭХО

Процесс ЭХО при заданных растворе и электродах определяется подачей инструмента, электрическим и гидравлическим режимами.

Любая величина, описывающая режим, может быть постоянной, произвольно меняющейся (например, из-за неустойчивости) или периодической.

Различают два вида режимов ЭХО:

1) непрерывный (с постоянными или медленно меняющимися вели-

чинами);

2) прерывистый (с периодическим импульсным управлением движением подачи, давлением прокачки электролита или напряжением).

Независимо от режима оптимизация ЭХО определенного материала включает в себя подбор раствора электролита в целях предельно возможного улучшения или только одного какого-то показателя процесса, или некоего их сочетания.

Чтобы получить *высокую плотность* тока и, следовательно, производительность используют растворы с большой электропроводностью: любые анионы и катионы самого электролита должны образовывать хорошо растворимые соединения, а концентрация раствора должна быть достаточно велика.

В целях *повышения точности* путем уменьшения зазоров необходимо понижать концентрацию, отчего понижается электропроводность и уменьшается производительность.

К катионам нейтрального или щелочного раствора предъявляют следующие требования:

1) высокий отрицательный стандартный потенциал, меньший (алгебраически) рабочего потенциала катода, благодаря чему эти катионы не участвуют в катодном процессе;

2) хорошая растворимость гидроксильных соединений катионов, что позволяет повысить плотность тока, несмотря на подщелачивание прикатодного слоя.

Обоим требованиям удовлетворяют катионы щелочных металлов: Na^+ или K^+ .

Основное в подборе электролита – выбор типа анионов. Для снижения энергоемкости и повышения производительности ЭХО следует понизить анодный потенциал, т. е. использовать растворы, содержащие анионы, которые активируют все компоненты сплава и образуют с ними хорошо рас-

творимые соединения.

Для повышения точности ЭХО используют анионы с недостаточной активирующей способностью, вследствие чего развивается пассивация, повышается анодный потенциал и уменьшаются зазоры.

Большинство двухвалентных металлов и сплавов на их основе (Fe, Ni) обрабатывают в нейтральных и кислых растворах.

Многовалентные материалы (W, Mo), окислы которых проявляют кислотные свойства, обрабатываются в щелочах.

В растворы иногда добавляют дополнительные вещества:

1) буферные добавки – (например, борную кислоту – 3 кг/м³) для стабилизации водородного показателя;

2) поверхностно-активные вещества (например, ОП-7) в целях предотвращения кавитации и понижения гидравлического сопротивления МЭП;

3) ингибиторы (хроматы, фосфаты), уменьшающие коррозию деталей станка.

Соображения стоимости и дефицитности, условия безопасности при обслуживании ЭХ установок ограничивают возможности выбора электролита. Поэтому на практике обычно применяют водные растворы хлористого и азотнокислого натрия, соляной и серной кислоты.

Наиболее распространенным является 10–25%-ный водный раствор *NaCl*: длительная работоспособность, доступность, безопасность, простота приготовления, хорошие эксплуатационные свойства способствуют широкому его применению при ЭХО железа Армко, легированного чугуна, сталей 45, 40Х, У10, 5ХНВ, 7ХЗ, меди, латуни, алюминия, титана и других металлов.

При обработке сталей достоинством этого раствора является постоянство рН в пределах от 10 до 11, что объясняется гидролизом основной соли $\text{Fe}(\text{OH})\text{Cl}$, образующейся в ходе промежуточных реакций.

Для ЭХО большой номенклатуры штамповых сталей, жаропрочных и цветных сплавов успешно используют 10 – 30%-ный раствор *азотнокислого натрия* (NaNO_3), достоинства которого заключаются в пассивации анода при малой плотности тока, что уменьшает скорость анодного растворения и позволяет в ряде случаев повысить точность обработки благодаря уменьшению зазоров.

Вместе с тем, растворы NaNO_3 обладают меньшей агрессивностью, что снижает коррозию оборудования.

Хорошие результаты дают *растворы* Na_2SO_4 – при обработке аустенитных сталей, *щелочи* – при обработке вольфрама; *бромидов* – при обработке ниобия. Сложный раствор: $\text{NaNO}_3 + \text{NaNO}_2$ применяют при ЭХО нержавеющей сталей X18H9T, 15X11MФ.

При обработке некоторых сплавов можно значительно снизить выделение водорода на ЭИ, если ввести в состав электролита хлористый аммоний, активирующий анодный процесс в той же степени, что и NaCl .

3.8. Выход по току при ЭХО

Выход по току влияет на точность формообразования и определяет степень совершенства технологического процесса, в том числе и соответствие подобранного раствора конкретной задаче ЭХО.

Выход по току увеличивается с повышением концентрации электролита, что особенно проявляется для концентрированных растворов (350 – 500 кг/м³).

При обработке углеродистых сталей в растворах хлористого натрия влияние плотности тока заметно при $i = 4 - 5 \text{ А/см}^2$.

В обычном диапазоне режимов ЭХО изменение плотности тока на 1 А/см² меняет выход по току на 0,05.

Если анодная поверхность пассивируется, то зависимость выхода по

току от плотности тока резко усиливается.

Например, при ЭХО нержавеющей стали X18H9T в растворе NaNO_3 повышение плотности тока на 1 А/см^2 увеличивает выход по току на 0,1 – 0,15.

Однако возможны и обратные закономерности. Так, при ЭХО титанового сплава ВТЗ-1 рост плотности тока вызывает уменьшение выхода по току и снижение скорости съема, что может явиться причиной короткого замыкания электродов.

Температура электролита на выход по току заметно влияет при пассивации анода. Например, при ЭХО никелевых сплавов в растворах азотнокислого и фосфорнокислого натрия колебания температуры от 25 до 50 °С на 1 °С меняют выход по току в пределах от 0,04 до 0,05.

С повышением скорости течения электролита облегчаются условия выноса продуктов из МЭП и повышается скорость анодного растворения.

Так, оптимальные скорости для ЭХО стали ОХМ лежат в пределах от 10 до 14 м/с; для стали X18H9T: 12 – 15 м/с (при зазоре 0,4 – 0,5 мм).

Обычно колебания скорости потока на 1 м/с изменяют выход по току на 0,01 – 0,02.

При ЭХО нержавеющей стали X18H9T в нитратно-нитритном электролите зависимость выхода по току от температуры и скорости потока различна для высокой и низкой плотностей тока. При малых зазорах и высокой плотности тока незначительные колебания скорости раствора влияют на зазор и вызывают заметную погрешность обработки, чего не наблюдается при низкой плотности тока.

Изменение свойств раствора в процессе ЭХО

На электрохимическое формообразование большое влияние оказывает изменение свойств раствора, объясняемое многократной прокачкой через МЭП одного и того же объема электролита. Образование на ЭИ ионов OH^- повышает водородный показатель pH нейтральных растворов.

Водородный показатель – величина, характеризующая концентрацию ионов водорода в растворе, численно равна отрицательному десятичному логарифму концентрации ионов водорода. При 25 °С в нейтральной среде $\text{pH} = 7$, в кислых средах $\text{pH} < 7$, в щелочных $\text{pH} > 7$.

При повышении pH при ЭХО сталей повышается анодный потенциал, снижается выход по току и соответственно изменяются зазоры. pH стабилизируют введением в раствор буферных добавок или подкислением электролита.

Если электролит подобран правильно, то общая масса его ионов в растворе не меняется. Поскольку относительный расход воды на катоде невелик, то в процессе ЭХО концентрация электролита остается примерно постоянной.

При повышении температуры снижается вязкость, понижается гидравлическое сопротивление МЭП, увеличивается скорость прокачки, изменяется шероховатость поверхности, увеличивается электропроводность и зазоры.

Для стабилизации температуры применяют охлаждающие устройства или баки больших размеров. Очистка раствора от твердых продуктов обработки производится с помощью фильтров, центрифуг, отстойников. Для ускорения коагуляции частиц шлама и осаждения их применяют синтетические коагуляторы (например, полиакриламид).

3.9. Виды ЭХО: ЭХшлифование, ЭХшлифование-полирование, ЭХглянцевание, ЭХполирование

Все разновидности ЭХО можно разделить на отделочную и размерную.

Отделочная ЭХО предназначена для изменения состояния свойств поверхностей деталей.

Сюда входит травление (удаление заусенцев и скругление кромок) и улучшение микрогеометрии поверхности, т.е. понижение Ra до среднего класса (шлифование), до высокого класса (шлифование-полирование) и до высшего класса (полирование).

Электрохимические (анодное) шлифование - это анодное растворение поверхности, улучшающее ее микрогеометрию и позволяющее получать $Ra = 0,32 - 2,5$ мкм как при чистовом механическом шлифовании. Его применяют для отделочной обработки поверхности, удаления заусенцев, скругления кромок и т. д. Длительность удаления заусенцев 5 – 60 с. ЭХШ проводят вращающимся металлическим или графитовым электродом круглой формы в стационарном или движущемся электролите. Производительность обработки зависит от химического состава электролита, его температуры и плотности тока и лежит в пределах 10 – 200 мкм/мин.

В состав электролитов для обработки сталей входят глицерин, HNO_3 HCl – остальное вода.

В проточных электролитах используются соли (их растворы).

Плотности тока: для низко- и среднеуглеродистых сталей 40 – 50 А/дм²; для высокохромистых – 30 – 200 А/дм²; $t_{эл-та} = 20 - 30$ °С; $U = 3 - 6$ В.

Электрохимическое (анодное) комбинированное шлифование-полирование - анодное растворение, проводимое в переменных режимах, позволяющих плавно переходить от микрогеометрии поверхности, характерной для шлифования ($Ra = 0,16 - 2,5$ мкм), к микрогеометрии поверхности, характерной для полирования ($Ra = 0,02$ мкм) без переноса обрабатываемой заготовки из одной ванны в другую. ЭХШП проводят в стационарном электролите.

Удельный съем при обработке также определяется составом и температурой электролита и плотностью тока. Удельный съем при шлифовании

равен 50 – 100 мкм/мин; при полировании – 0,5 – 5,0 мкм/мин.

Например, при обработке сплавов ВМ-1 используется электролит 85%-ный водный раствор серной кислоты, $i = 100 - 400$ А/дм², $U = 20 - 30$ В, $t = 20 - 40$ °С. Съём металла в среднем составляет 10 мкм/мин. Для полного сглаживания микронеровностей необходимо растворить слой, толщина которого в 5–6 раз больше R_z исходной шероховатости.

Электрохимическое (анодное) глянецвание – это анодное растворение, результатом которого является появление повышенного блеска (глянцевого отражения) обрабатываемой поверхности без заметного изменения исходной микрогеометрии или с небольшим его улучшением. ЭХГ ведут в стационарном и в проточном электролите. Удельный съём – незначителен.

Электрохимическое (анодное) полирование (ЭХП) – анодное растворение, приводящее к значительному улучшению микрогеометрии обрабатываемой поверхности ($Ra = 0,04$ мкм), высокой степени зеркального блеска, к изменению многих физических, физико-химических, физико-механических свойств поверхности. ЭХП ведут в стационарном и проточном электролите. Удельный съём – незначителен, но может меняться в широких пределах (от 0 до 500 мкм/мин) в зависимости от состава и температуры электролита и плотности тока. Электролиты: растворы кислот повышенной концентрации с различными добавками, реже растворы щелочей, $t = 40 - 80$ °С, реже 18 – 20 °С.

3.10. Электрохимическая размерная обработка (ЭХРО)

ЭХРО предназначена для изменения формы, размеров и шероховатости обрабатываемой заготовки. При обработке растворение металла происходит при прохождении тока через электролит, прокачиваемый под давлением в зазоре между электродом-заготовкой (ЭЗ) и электродом-инструментом (ЭИ). Наибольшее интенсивное растворение происходит на

участках, где зазор минимален, а плотность тока – наибольшая. В ходе обработки происходит выравнивание плотности тока в межэлектродном зазоре (МЭЗ или МЭП) и, как следствие, копирование профиля ЭИ на заготовке. В связи с растворением металла заготовки и необходимостью поддержания оптимальной величины МЭЗ для продолжения процесса ЭИ (катоду)сообщается движение подачи, направленное к обрабатываемой поверхности.

Производительность обработки характеризуют величиной линейной скорости растворения (V_L), которая пропорциональна анодной плотности тока. Линейную скорость растворения еще называют скоростью съема. Эта величина зависит от электрических параметров процесса, состава, температуры и скорости прокачки электролита в МЭЗ. При обработке небольших поверхностей (площадью S до $0,1 \text{ м}^2$) $V_L =$ до 1 мм/мин , а для больших ($S > 0,1 \text{ м}^2$) $V_L = 0,02\text{--}0,2 \text{ мм/мин}$.

В качестве электролитов используют растворы солей NaCl , NaNO_3 , Na_2SO_4 и слабый раствор HCl . Наиболее часто используют активный электролит на основе NaCl , который дешев и обеспечивает длительную работоспособность благодаря непрерывному восстановлению в растворе NaCl .

В среднем параметры ЭХРО следующие: $i = 5\text{--}250 \text{ А/см}^2$; $U = 6\text{--}60 \text{ В}$; $Ra=0,32\text{--}2,5 \text{ мкм}$.

$C \uparrow, Ra \downarrow$.

Поверхности заготовки, не требующие обработки, электроизолируют, так же, как и поверхности ЭИ, с которыми недопустимо электрохимическое взаимодействие заготовки.

Размерной ЭХО подвергают наружные и внутренние поверхности. Она служит для прошивки и наружного калибрования отверстий, клеймения и маркировки деталей и т. д. Выполняют ЭХРО на специальных станках, включающих:

– источник электропитания (выпрямитель);

– гидросистему для подачи, слива и очистки электролита;

– устройства, контролирующие работу систем;

– средства автоматики, поддерживающие оптимальный МЭЗ и другие параметры.

3.11. Анодно-механическая обработка

АМО представляет собой метод, позволяющий соединить производительность электроэрозионной обработки с возможностью получения высококачественных поверхностей, что характерно для электрохимического растворения. Соединение электроэрозионного и электрохимического воздействий при АМО происходит таким образом, что создаются благоприятные условия для повышения эффективности электрохимического воздействия.

Для создания таких условий движущийся инструмент-катод прижимается к обрабатываемой поверхности (аноду), в результате чего разрушаются образующиеся на ней пленки продуктов растворения и обеспечивается их вынос из рабочей зоны. Таким образом, механическое воздействие на обрабатываемую поверхность со стороны инструмента интенсифицирует электро-физико-химические процессы в рабочей зоне и увеличивается производительность съема металла.

Переход при АМО от преобладания электроэрозионного разрушения металла к электрохимическому осуществляется изменением энергетических параметров процесса. С увеличением напряжения и удельной мощности, подводимой в зону обработки, преобладает электроэрозионный процесс, а с уменьшением напряжения и удельной мощности преобладает электрохимическое растворение.

На черновых режимах при скорости инструмента 25 м/с , давлении прижима 200 кПа и $i =$ до 300 А/см^2 производительность равна

$(0,8-10) \cdot 10^4 \text{ мм}^3/\text{мин}$, $R_z = 500-600 \text{ мкм}$.

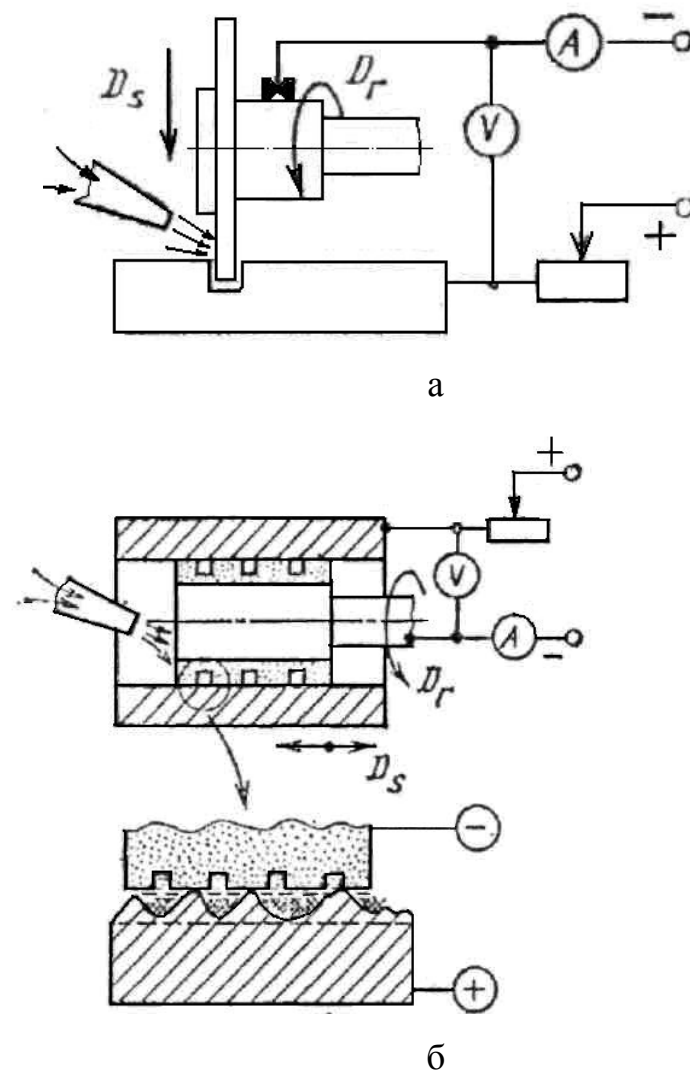


Рис. 3.2. Схема анодно-механической резки (а).
Полирование отверстия трубы (б)

На чистовых режимах при скорости 0,5–25 м/с, давлении прижима 50 кПа, $i=0,1 - 0,8 \text{ А/см}^2$ гарантируется $R_a = 0,01 \text{ мкм}$ и съем 0,6 мм³/мин.

В качестве электролита используется раствор силиката натрия в воде (жидкое стекло или силикатный клей), электролит подается струей в рабочую зону. $U = 14-28\text{В}$ от источника постоянного тока. При АМО происходит малый износ инструмента, составляющий на черновых режимах 20–30 % и на чистовых режимах 2–3 % по сравнению с износом при ЭЭО.

Областью применения АМО является широкая номенклатура операций анодно-механической резки (рис. 3.2, а) (отрезание литниковых систем, вырезание профилей, прорезание пазов, разрезание труб и слитков) и операций анодно-механической шлифовки (профилирование, заточка и доводка режущего инструмента, шлифование твердосплавных изделий, обдирка отливок и поковок), полирование отверстий труб (рис. 3.2, б)

3.12. Оборудования для ЭХ-размерной обработки

Виды оборудования для ЭХРО:

1) Отрезные и вырезные станки:

- для разрезания диском;
- для разрезания лентой;
- для разрезания проволокой;
- для вырезки по контуру;
- для резания струей электролита.

2) Прошивочные:

- для прошивания глубоких отверстий;
- для прошивания сит и сеток;
- для обработки методом трепанации (операция вскрытия костной полости, например, черепа).

3) Копировально-прошивочные станки:

- для обработки сложнофасонных объемных полостей;
- для клеймения и маркирования;
- для обработки пера лопаток;
- для гравирования.

4) Токарные:

- для обработки поверхностей тел вращения (точение);
- для изготовления резьб.

5) Разные:

- для обработки методом протягивания;
- для удаления заусенцев и скругления кромок;
- для калибрования и доводки.

Разновидностью ЭХРО является электроабразивная обработка, выполняемая по двум схемам:

1) электрод – инструмент представляет собой токопроводный абразивный инструмент (шлифовальный круг, хонинговальный и суперфинишный брусок);

2) инструмент состоит из двух элементов: электрода и нетокопроводного абразивного инструмента.

В обоих случаях абразивные зерна удаляют пассивационную пленку из продуктов растворения с обрабатываемой поверхности, чем значительно активизируют процесс дальнейшего анодного растворения материала заготовки. При этом на долю анодного растворения приходится 80–95 % припуска и 20–5 % на резание абразивными зернами. По сравнению с обычной абразивной обработкой производительность ЭХАО в 2–3 раза выше. Станки: шлифовальные, хонинговальные, заточные, суперфинишные, разные.

Таблица 3.1

Оборудование для электрохимической размерной обработки

Группа станков	Примеры выполняемых операций	Марка или модель станка
Копировально-прошивочные	Гравирование и обработка неглубоких полостей. Изготовление высокоточных пресс-форм со сложными многоэлементными гравюрами.	СЭП-902М, АТ-80, АТ-90, ЭХКП-1, Э-402, Э-460

Продолжение табл. 3.1

Группа станков	Примеры выполняемых операций	Марка или модель станка
	Обработка: сложных профильных каналов; копировально-прошивочные операции; гравирование гравюр ковочных штампов панелей, кронштейнов; формообразование сложных полостей; прошивка фасонных отверстий крупных (до (450–850)х450) мм штампов, пресс-форм, кокилей; отверстий сложных форм; по наружному и внутреннему контуру ковочных штампов, пресс-форм размером до 350х780х80 мм; сквозных и глухих полостей различной формы; то же до 250х300х160 мм; то же до 480х350х400 мм; различные копировально-прошивочные операции и формообразование сложных полостей	ЭХП-1 ЭКУ-400 4424 4421 4422, 4423 4А423ФЦ ЭКУ-150, ЭКУ-151, АГЭ-10, АГЭ-11, Э-468, ЭКГ-151, 4420Ф4, 4423ФЦ
Прошивочные	Прошивание щелей и глубоких отверстий. Прошивание фасонных отверстий в нежестких деталях из труднообрабатываемых материалов; прошивание большого числа отверстий в листовых заготовках. Обработка конических полостей	4427, ЭПЛ-320, ЭПЛ-630 ЭПЛ-1000, ЭХЭС-3, ЭСВК-2, 4422, 4423, 4427 ЭГП
Для разрезания	Разрезание труднообрабатываемых материалов	МА4428, ЭЗ-32, МА4429, ЭЗ-23
Для обработки пера лопаток	Обработка лопаток длиной: 100–170 мм до 200(300) мм	ЭГС-100, ЭГС-150, ЭХО-1, АГЭ-3 ЭХО-2, ЭХО-300, АГЭ-2, ЭХС-10А, МЭ-77
	до 630 мм до 1200-1500 мм	МЭ-57 МЭ-75, ЛЭ-145, ЛЭ-146, ЛЭ-156, ЛЭ-158, ЛЭ-159

Продолжение табл. 3.1

Группа станков	Примеры выполняемых операций	Марка или модель станка
Для обработки тел вращения	Комбинированная токарно-копировально-прошивочная обработка; обработка наружных и внутренних поверхностей	4412
Для удаления заусенцев, калибровки и контурной обработки	Удаление заусенцев на зубчатых колесах. Полуавтоматический цикл (удаление заусенцев, скругление кромок). Автоматическая обработка по всему циклу (подготовка, снятие заусенцев, промывка, пассивация, сушка)	ЭЗ-9Д, ЭЗ-65 4405, 4406, 4407, 4408Д, 4420, 4420Д, 4450, 4413, 4432 МА-31М
Для обработки глубоких отверстий	Калибрование, формирование полостей, протягивание пазов в заготовках валов (труб)	ЭХО-6, ЭХО-8, ЭХТ-1500
Для контурной вырезки и доводки	Сложно-контурные вырезы Контурная доводка Ручная контурная доводка по чертежу-шаблону	4429 4462ФЗ ДСФ-1.ДСФ-3-2
Для маркирования	Маркирование: Ручное, автоматическое, бестрафаретным методом; автоматическое подшипников и других массовых деталей; программное; универсальными электродами; автоматическое маркирование режущего инструмента	ЭХМ-1А, ЭК-1, 4401, ПЭМ-1М МЭ311, МЭ301, МЭ309 ГРЭМ-1, ГРЭМ-2 МЭ316, ЭХМ
Для шлифования	Шлифование: плоское; профильное; круглое наружной и внутренней поверхности; трудно обрабатываемых материалов; одной поверхности	3Э730, 3Э731, 3Э754Л 3Э754ЛФ1 3Э70Ф2 3Э110М СШ101
Для заточки инструмента	Заточка: твердосплавных резцов сверл фрезерных головок разнообразного инструмента (универсальные станки)	3Е624Э, 3625Э, 3622Э 3653Э 2Э667 3762

Окончание табл. 3.1

Группа станков	Примеры выполняемых операций	Марка или модель станка
Для хонингования и суперфиниширования	Суперфиниширование. Доводка штампов, пресс-форм, литейных форм после электроимпульсной обработки	38711БЭ Э3101

3.13. Типовые операции ЭХ размерной обработки

Типовые операции ЭХ размерной обработки приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Операция	Эскиз
Струйная прошивка отверстий и вырезка по контуру	
Удаление заусенцев и скругление кромок	

Продолжение табл. 3.2

Операция	Эскиз
Хонингование отверстий	
Шлифование токопроводящим абразивным кругом плоских, цилиндрических и профильных поверхностей	
Калибрование фасонных отверстий и сложных поверхностей. калибрование и контурная обработка неподвижным электродом	
Клеймение и маркировка деталей (печатная и по трафарету)	

Окончание табл. 3.2

Операция	Эскиз
Обработка тел вращения (точение, токарная обработка). Обработка вращающимся катодом	
Объемное копирование сложных поверхностей (формообразование гравюр штампов и пресс-форм). Профилирование пера лопаток	
Прошивание отверстий лопаток	

ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

4.1. Современные достижения электрохимических и электрофизических методов обработки

Электрические методы и многие виды комбинированной обработки, сочетающие электроэрозионные, ультразвуковые, механические и другие способы, были предложены нашими соотечественниками в 40 – 60 годы.

Наиболее заметные успехи достигнуты в электроэрозионной обработке (ЭЭО), при которой удалось, в частности, достичь высокого качества поверхности и повышения производительности, устранить износ инструментов, снизить стоимость их изготовления. Эти успехи связаны с совершенствованием оборудования (повышением точности и жесткости станков, высокой степенью автоматизации перемещения и контроля положения инструмента, автоматизацией смены инструмента и др.), в том числе генераторов (расширение диапазона работы, оптимизация режимов). При создании современного оборудования учитываются достижения вычислительной техники, оснащенность его системами автоматизированного управления и регулирования процесса, устройствами для загрузки-выгрузки. Последнее позволило обеспечить автономность работы станков до четырех суток.

Высокие технологические показатели достигнуты фирмой «Ажи» (Швейцария), которая гарантирует для прошивочных станков точность профиля 2 мкм, возможность получения внутренних радиусов скругления 0,02 мм, шероховатость обработанной поверхности 0,1 – 0,2 мкм. Станки такого типа широко используются для изготовления пресс-форм, литейных форм, ковочных штампов, при получении глубоких отверстий (отношение длины к диаметру до 400). Освоена обработка новых материалов: поликри-

сталлических алмазов, керамических и полупроводниковых материалов. Создаются гибкие переналаживаемые модули.

Часть из них имеет управляемое планетарное перемещение электрода, что позволяет обрабатывать прямые и обратные конусы, поднутрения, выемки. Это заметно расширяет технологические возможности метода. Модули способны одновременно обрабатывать несколько деталей по индивидуальным программам, позволяющим оптимизировать режимы, автоматически менять инструменты. Оригинальный многокоординатный электроэрозионный станок для обработки участков сложного профиля создан в конструкторском бюро «Искра». Здесь в качестве инструмента применен непрофилированный стержень, позволяющий выполнять построчечную обработку деталей любого профиля.

Сравнительно-экономические расчеты показывают, что для многих деталей после ЭЭО можно применять лезвийный инструмент. Но сопутствующее разряду упрочнение поверхности затрудняет использование в качестве металлорежущего инструмента даже высокотвердых керамических материалов, и поэтому приходится выполнять финишные операции на электроэрозионных станках, удорожая стоимость операции.

Несколько необычное применение нашел электроэрозионный процесс при разделении стружки. Используемые для этого традиционные методы оказались малоэффективными при чистовом точении медных сплавов на автоматизированном оборудовании. Предложены устанавливаемые в зоне резания приспособления для разделения стружки на мерные отрезки (длина 100–120 мм) при скорости резания до 250 м/мин. Для расширения области использования перспективного для машиностроения метода, обеспечивающего применение безлюдной технологии, необходимо изыскать материалы, резко (с 20 до 300 ч) повышающие стойкость электродов, найти способы перемещения витой стружки через приспособление.

В связи с достижением высокой точности и локализацией процесса

электрохимическая размерная обработка получила дальнейшее развитие при изготовлении сложно-фасонных поверхностей (лопаток ГТД, ковочных штампов), при маркировании деталей, удалении заусенцев, скруглении кромок и др. Большой интерес представляет получение лопаток ГТД из вольфрамовых, титановых и других сплавов с окончательным профилем пера, кромок и переходных участков. Отраслевые НИИ совместно с авиационными вузами в основном решили вопросы электрохимической обработки лопаток с длиной пера до 200 мм.

Для изготовления ковочных штампов, пресс-форм с площадью гравюры до 150 см² созданы станки, позволяющие автоматически получать точные (погрешность 20 – 30 мкм) вставки с шероховатостью профиля 3,2 – 6,3 мкм. При этом наибольшее использование получили относительно простые станки Ивановского химико-технологического и Казанского авиационного институтов, работающие по методу копирования.

Созданы технология и оборудование для изготовления рабочей поверхности штампов и пресс-форм непрофилированным электродом в форме стержня, перемещаемого с помощью пятикоординатной системы станка с ЧПУ. По сведениям разработчиков, таким способом удастся за один проход снять припуск до 0,8 мм при скорости перемещения инструмента до 25 мм/мин.

Мировым сообществом электротехнологов многое сделано в целях совершенствования оборудования, оснастки и технологии обработки деталей непрофилированным электродом-проволокой. Созданы станки для обработки деталей толщиной до 250 мм при точности позиционирования 0,001 мм и предельном угле наклона проволоки 30°. На оборудовании предусмотрена автоматическая заправка проволоки, установка ее в исходное положение без участия оператора, автоматическое регулирование натяжения и подачи проволоки, режимов обработки. В результате достигнуто получение профиля детали с точностью до 2 мкм при шероховатости поверх-

ности 0,02–0,1 мкм. В ЭНИМСе созданы гибкие переналаживаемые модули, работающие с вольфрамовой и латунной проволокой диаметром до 0,3 мм. Они позволяют автоматически поддерживать натяжение проволоки и обеспечивают шероховатость обработанной поверхности 0,8 мкм при погрешности 0,005 мм.

Станки с непрофилированным электродом-проволокой конкурентоспособны по сравнению со станками для механической обработки при изготовлении рабочих частей вырубных штампов различного профиля (известны штампы с длиной контура 2000 мм и выше), гибочных штампов, кулачков управления, шаблонов, зубчатых профилей, рабочих частей режущего и мерительного стального или твердосплавного инструмента, мелких партий деталей из листа и др. Электроэрозионные станки нашли применение при выпуске оснастки для станков, производящих товары народного потребления (штампы и пресс-формы для посуды, игрушек, столовых приборов, спортивный инвентарь и др.), в аппаратостроении.

При оценке возможности применения новых процессов нужно учитывать вопросы экологии. В частности, в электроэрозионных станках в качестве рабочей жидкости применяют воду, керосин, углеводородные среды. При этом замена углеводородных сред водой заметно снижает технологические показатели процесса, в частности, затрудняет получение высокой чистоты поверхности.

Усилиями ЭНИМСа решены многие проблемы изготовления инструмента (снижение трудоемкости, механизация операций, применение наиболее подходящего материала, вида заготовки и технологии). Вместе с тем возникли новые проблемы, вызванные необходимостью освоения новых технологий.

Оптимальное сочетание анодного растворения с электроэрозионной и механической обработкой позволяет создать эффективный процесс комбинированной обработки непрофилированным электродом-щеткой. Таким

инструментом эффективно удалять заусенцы, обрабатывать кромки деталей, снимать грат, зачищать облой, места сварки и наплавки, полировать поверхности любой формы. Метод успешно заменяет массовые слесарные операции по зачистке литья, штамповок, при ремонте деталей. Электродом-щеткой удается без смены инструмента обрабатывать детали различной формы с переменным исходным припуском. При полировании коррозионно-стойкой стали достигнута шероховатость менее 0,63 мкм, что исключает последующую доработку поверхности. Скорость удаления припуска с корпусов приборов, полученных литьем под давлением, равняется 4 м/мин. С такой же скоростью можно удалять припуски высотой до 3 мм с чугунного литья в земляные формы, что ранее требовало большого числа слесарных операций.

Представляет интерес установленный в последние годы эффект повышения пластичности титановых сплавов после поверхностной обработки электродом-щеткой, после которой за один переход удается вытягивать полости в 3 – 5 раз большей глубины, чем ранее, увеличить угол загиба стандартных образцов с 85 – 95 до 165°. Зачистка титанового листа электродом-щеткой перед формообразованием позволяет заметно сократить брак заготовок и снизить трудоемкость операций.

Сочетание в одной операции электрохимического формообразования и дорнования позволило получить каналы различного сечения с точностью по качеству 7 при стабильном обеспечении расчетного наклепа. Это достигнуто благодаря управлению скоростью перемещения дорна при снятии припуска до расчетной величины электродом-инструментом, упруго соединенным с дорном. Применен новый принцип управления процессом, при котором поддерживается постоянное усилие продольного перемещения инструмента, а усилие рассчитывается исходя из натяга, требующегося для получения заданного наклепа поверхности дорном. Скорость продольного перемещения инструмента обратно пропорциональна общему при-

пуску, при этом припуск под дорнование стабилизируется. Как известно, электрохимическая обработка не вносит наклепа. Таким образом, припуск под дорнование имеет заданную величину независимо от размеров и свойств материала заготовки. Это обеспечивает высокую точность и стабильный наклеп поверхности.

Предложенный технологический процесс позволяет создать наклеп, обеспечивающий максимальную прочность материала при циклических нагрузках. Наклеп поверхности заметно повышает сопротивление усталости сплавов. Однако представляется неверным существующий подход к упрочнению, как к операции, при которой должен быть достигнут предельный наклеп, поскольку наибольшее сопротивление усталости для большинства сплавов соответствует наклепу ниже его предельного значения. Недонаклеп или перенаклеп даже на несколько процентов значительно снижает прочность материала относительно экспериментального значения. Предложенный способ позволяет обеспечить расчетный наклеп, соответствующий наибольшему сопротивлению усталости с погрешностью не более ± 1 %. Тогда для стали 40ХНМА можно повысить прочность при циклических нагрузках на 10 % по сравнению с исходным состоянием, что на 6,5 % выше, чем при наклепе до предельного состояния. Аналогичные результаты наблюдаются для титановых сплавов.

Сочетание локального ультразвукового облучения с анодным растворением позволило получить эффективный способ удаления металлических вставок и получения отверстий различного сечения и периметра в заготовках из порошков. Получены отверстия с диаметром от 8 мкм и выше, глубиной до 500 диаметров. Такие показатели значительно превышают возможности других известных технологических приемов. Результаты получены для диэлектрических керамических материалов. Решается проблема формообразования аналогичных каналов в заготовках из металлических порошков.

Для чистовой обработки вязких, хрупких, высокопрочных сплавов используется электроабразивное шлифование зернами из корунда, алмаза и других материалов. Процесс может осуществляться при прямой и обратной полярности. В последнем случае анодным растворением снимается с инструмента материал, вызывающий «засаливание» круга, особенно при обработке вязких сплавов. Круги для электроабразивного шлифования имеют высокую стоимость (на порядок выше кругов из карбида кремния), практически не требуют профилирования в процессе обработки, однако достаточно дефицитны. Другая проблема, которую следует решить в процессе широкого внедрения электроалмазного шлифования, – автоматизация профилирования самого круга с учетом искажения профиля детали на участках врезания и выхода инструмента из детали. Применяемые в настоящее время методики расчета профиля инструментов для электроабразивной обработки содержат большое число коэффициентов, определяемых экспериментально, что затрудняет получение точных деталей, особенно при запуске в производство новых изделий, выполненных из ранее не применявшихся материалов. Электроабразивная обработка позволяет значительно снизить усилия резания, что следует учитывать при назначении операций шлифования для нежестких деталей, устранить шаржирование обработанной поверхности, снизить мощность привода до 3 раз, температуру в зоне резания до 2 раз.

Результаты механических испытаний показали, что после электроабразивного шлифования сопротивление усталости жаропрочных сплавов возрастает на 8–12 % по сравнению с электрохимической обработкой, а для хрупких материалов предел прочности сплавов при циклических нагрузениях увеличивается на 30–50 % по сравнению со шлифованием абразивом.

В приборостроении нашла использование комбинированная электрохимикомеханическая разрезка тонкими алмазными кругами (толщина не

более 0,3 мм) хрупких полупроводниковых материалов и дефицитных сплавов (вольфрама, кобальтовых и других материалов), где требуется получить бездефектный срез высокой точности при минимальных потерях материала. Созданный в отраслевом институте двухкоординатный модуль позволяет автоматически регулировать усилия, исключая тем самым скол кромок, сохранить плоскостность инструмента, обеспечить точность торцов детали в пределах 0,02 мм при шероховатости поверхности 0,16 – 0,32 мкм. Решается проблема разработки безотходной технологии разрезки сплавов и регенерации продуктов обработки.

Для чистовой обработки полостей, куда доступ инструмента затруднен, используется метод электрохимической обработки, при котором рабочая среда представляет собой смесь электролита и токопроводящих гранул, подаваемая в виде свободной струи от катода к заготовке-аноду. В результате соударений гранул с обрабатываемой поверхностью происходит ее депассивация и полирование. Управляя направлением подачи струи и режимами обработки, можно обеспечить размерный съем металла на расстоянии до 100 мм от катода.

Комбинирование механического воздействия на поверхность неабразивных притиров с катодным процессом осаждения хрома позволило получить износостойкие герметичные покрытия толщиной до 150 мкм, отличающиеся высокой адгезией, шероховатостью ниже 0,1 мкм. Это можно эффективно использовать при выпуске гидро- и пневмоаппаратуры высокого давления, а также при ремонте и реставрации изделий.

Оборудование для электрических методов обработки требует повышенного расхода электрической энергии. Если принять в качестве базы для сравнения шлифование высокопрочных сплавов абразивным инструментом, где расход энергии на килограмм снятого материала составит 6 – 8 кВт·ч/кг, то для электроэрозионной обработки короткими импульсами этот показатель составит 25 – 30 кВт·ч/кг, для ультразвуковой –

200–250 кВт·ч/кг, электрохимической размерной обработки – 15–25 кВт·ч/кг, электроалмазного шлифования и резки – 10–12 кВт·ч/кг. Однако при оценке реального расхода энергии следует принимать во внимание ее затраты на заточку и возобновление металлорежущего инструмента, учитывая, что некоторые рассматриваемые процессы, например электрохимическая размерная обработка, осуществляются без износа инструмента. Кроме того, в ряде случаев замена механообработки на электрические методы позволяет резко повысить производительность и заменить несколько станков, на изготовление которых также потребовалось бы затратить электрическую энергию (начиная с выплавки сталей и кончая сборкой и испытанием готовой продукции). Вместе с тем проблема поиска и формирования энергосберегающих процессов существует, для чего у создателей оборудования и технологии для электрических методов обработки имеется немало резервов.

4.2. Комбинированные электрофизикохимические процессы обработки

Комбинированные электрофизикохимические процессы обработки (КЭФХПО) основаны на объединении в одной операции нескольких технологических воздействий, среди которых базовым является электрохимическое. Объединение двух и более воздействий позволяет управлять с высокой производительностью технологическими показателями качества изделия – точностью, шероховатостью поверхности и свойствами поверхностного слоя.

Рассматриваемые процессы отличаются интегральным характером воздействия на поверхность заготовки (анода) в рабочем пространстве обработки (РПО) и локальным воздействием концентрированным потоком энергии (КПЭ) различной природы: механической, электромагнитной (ла-

зерное излучение), электрической и тепловой.

Теоретические исследования физико-химических явлений и эффектов взаимодействия базируются на основных положениях физики твердого тела, электрохимии, теплофизики и термодинамики необратимых процессов. Эти положения позволяют теоретически исследовать эффекты взаимодействия внешних технологических воздействий при их комбинировании в единой технологической операции. Особенностью всех процессов, протекающих в РПО, является их нестационарность, вызванная локальным импульсным воздействием КПЭ на поверхность анода. После окончания воздействия КПЭ происходит процесс релаксации (возврата к прежнему стационарному состоянию) в локальной области поверхности анода. В итоге возникает нестационарность всех физико-химических явлений и эффектов, прямо или косвенно влияющих на формообразование.

В пределах РПО можно выделить несколько зон, в которых наблюдаются различные явления и эффекты. Эти явления и эффекты могут увеличивать (I) или снижать (II) локальную скорость диспергирования материала, а также генерировать электрические разряды (III). Так, в *анодной приповерхностной зоне* происходят фазовые превращения (I). *Анодная реакционная зона* характеризуется наличием термокинетических явлений (I), хемомеханического и механохимического эффектов (I), выделением кислорода (II), репассивацией поверхности (II) и формированием ювенильных поверхностей (I). В *транспортной зоне* наблюдается изменение параметров процесса переноса (т. е. физико-механических параметров рабочей среды) (I), а также фазовые превращения (III) и электрический пробой (III). В *катодной реакционной зоне* выделяется водород (III) и протекают термокинетические явления (I). Наконец, *катодная приповерхностная зона*, так же как анодная приповерхностная, характеризуется фазовыми превращениями (I).

Рассмотрим основные явления и эффекты взаимодействия внешних

воздействий в различных зонах РПО. Исследования и практика применения КЭФХПО показывают наличие трех механизмов локального повышения скорости электрохимического формообразования, обуславливающих различное изменение локальной скорости диспергирования в зависимости от плотности и длительности КПЭ:

- 1) механизм локальной депассивации поверхности заготовки (образование ювенильной поверхности);
- 2) локальный термокинетический механизм;
- 3) механизм генерирования локального активированного деформационного объема на поверхности заготовки.

Каждый из этих механизмов действует определенное время (время перехода из нестационарного состояния в стационарное) и создает в РПО пространственно-временную неоднородность. Формирование каждого механизма под влиянием КПЭ в виде механического, электрического или лазерного воздействия определяется уровнем энергии, вводимой в локальную область РПО.

Первый механизм (локальной депассивации), реализуемый механическим или термическим воздействием, способствует образованию локальной ювенильной поверхности, на которой происходит активное анодное растворение в режиме электрохимического перенапряжения с одновременной репассивацией и возвратом в исходное стационарное состояние. Теоретическое исследование скорости процессов релаксации при репассивации анодной обрабатываемой поверхности основано на тафелевских зависимостях с учетом омического падения напряжения в межэлектродном зазоре.

Согласно современным представлениям все явления на анодно растворяющейся поверхности металла определяются едиными процессами, кинетика которых зависит от анодного потенциала. Начальной стадией репассивации являются адсорбционные процессы, которые в конце активно-

пассивного перехода приводят к формированию первого слоя оксида. После этого анодное растворение металла проходит через слой оксида (формирование оксида на границе металл – оксид и его разрушение на границе оксид - электролит). Исследование скорости процессов релаксации показало, что время репассивации составляет 0,05–1 мс в зависимости от плотности анодного тока.

Локальные термокинетические процессы (второй механизм) интенсифицируют анодное растворение вследствие повышения температуры в поверхностных слоях заготовки. Данная закономерность выражается аррениусовской зависимостью скорости реакции (4.1):

$$i = A \exp[-(U_a - \alpha \cdot z \cdot F \cdot \eta)/(RT)], \quad (4.1)$$

где i – плотность анодного тока; A – константа скорости реакции; U_a – энергия активации ионизации металла при нулевом перенапряжении; α – коэффициент переноса; z – число зарядов иона; F – постоянная Фарадея; $\eta = \varepsilon - \varepsilon_{\text{равн}}$ – перенапряжение; ε – потенциал анода; $\varepsilon_{\text{равн}}$ – равновесный потенциал; R – газовая постоянная; T – термодинамическая температура.

Тогда при повышении локальной температуры, связанном с воздействием КПЭ, происходит локальное увеличение плотности тока.

Термокинетический механизм формируется в основном в результате лазерного воздействия с плотностью энергетического потока до 10^4 Вт/см². При этом дополнительно изменяются константы процессов переноса в межэлектродном пространстве и наблюдается локальное снятие диффузионных ограничений, вызванное так называемым «ядерным» кипением электролита. Переход кипения в пленочный режим экранирует зону обработки и снижает скорость анодного растворения, поэтому необходимо ограничивать длительность лазерного импульса (до нескольких миллисекунд).

Таким образом, термокинетический механизм может реализоваться в режиме электрохимического или диффузионного перенапряжения.

Наиболее универсален по эффективности третий механизм. Локальный активированный деформационный объем формируется на поверхности заготовки в основном в результате механического воздействия в режиме пластического деформирования. При этом возрастает свободная энтальпия вследствие образования дефектов кристаллической решетки в виде дислокационных скоплений. Максимальное изменение свободной энтальпии в приповерхностных слоях происходит при динамическом активировании поверхности вследствие создания неравновесной дислокационной структуры. При этом в локальной зоне возникает максимальная энергетическая неоднородность, так как в ней формируются микроучастки с ювенильной поверхностью, чередующиеся с микроучастками с фазовыми (оксидными) пленками. Поэтому рассматриваемый механизм частично включает в себя механизм локальной депассивации, которая приводит к созданию энергетически однородной ювенильной поверхности без изменения дефектности кристаллической решетки металла.

После окончания механического воздействия в поверхностном слое заготовки происходит релаксация напряжений, обусловленная перераспределением и уменьшением пиков внутренних напряжений в материале. Упругая энергия локальных пиков напряжения частично рассеивается в виде работы пластической деформации. Если процесс происходит при температуре меньше 0,2 от температуры плавления (без диффузионного переноса атомов), то пики внутренних напряжений уменьшаются вследствие микроскопических локальных сдвигов.

Время релаксации можно оценить на основе экспериментальных данных о релаксации напряжений для ряда металлов путем математической обработки релаксационных кривых напряжений. Так, для армко-железа оно равно 0,8 с; для ряда других металлов время релаксации лежит в пределах нескольких секунд. Таким образом, длительность времени максимальной неравновесности дислокационной структуры на три порядка пре-

вышает время репассивации ювенильной локальной области.

При высокой плотности дислокаций (механическое воздействие с высокой скоростью деформирования в режиме деформационного упрочнения) процесс формирования локальных экранирующих слоев в зоне механического воздействия приостанавливается из-за энергетической гетерогенности поверхности, поддерживаемой выходом дислокаций на поверхность с образованием ступенек скольжения. Такой режим создает высокую скорость локального анодного растворения, протекающего длительное время (до нескольких секунд).

Указанная скорость практически не зависит от химического состава и структурного состояния материала заготовки, типа применяемого электролита (активирующий или пассивирующий). Влияние этих факторов начинает ощущаться только после анодного растворения максимально наклепанного слоя. Равновесные дислокационные структуры (плоские скопления дислокаций) в поверхностном слое заготовки также могут привести к увеличению скорости локального анодного растворения при использовании активирующего электролита в результате действия механохимического эффекта, однако это происходит при коррозионных процессах без внешней поляризации.

Рассмотрим влияние электрохимического воздействия на смежное (механическое) воздействие КПА. Скорость диспергирования при механическом воздействии (способы электрохимического шлифования и хонингования) можно увеличить благодаря хемомеханическому эффекту, способствующему пластифицированию поверхности заготовки.

Механизм действия хемомеханического эффекта заключается в облегчении выхода на поверхность дислокаций, скапливающихся у поверхности, и вызывается активным анодным растворением поверхностного слоя. Это приводит к увеличению скорости диспергирования материалов, обладающих повышенной твердостью, что экспериментально подтверждается

увеличением длины стружки. При обработке же материалов, отличающихся повышенной вязкостью, для эффективного резания необходимо придать приповерхностным слоям большую хрупкость.

Такой режим можно создать путем электрохимического воздействия, которое формирует экранирующие оксидные слои с повышенной твердостью, увеличивающие критическое напряжение скола. Для этого необходимо подобрать электролит определенного состава, соответствующего химическому составу материала заготовки, и задать определенный электрохимический потенциал.

Таким образом, при комбинированном электрохимикомеханическом воздействии увеличение скорости диспергирования в результате одновременно происходящих анодного растворения и механического воздействия возможно только при обработке металлов и сплавов повышенной твердости. При обработке вязких труднообрабатываемых материалов возможно увеличить скорость или анодного растворения (путем механического воздействия в режиме создания активированного деформационного объема), или механического диспергирования (путем электрохимического воздействия).

Анализ теоретико-экспериментальных исследований позволил установить энергокинетические принципы, выполнение которых дает возможность проектировать эффективные технологические операции КЭФХПО. В их основе лежит теоретико-экспериментальное определение энергетических параметров технологического воздействия, обеспечивающих формирование в РПО локальных неравновесных процессов: неравновесного движения дислокаций в поверхностном слое заготовки; неравновесных термических потоков и фазовых превращений в рабочей среде (электролите на водной основе). Такие процессы способствуют локальному увеличению скорости диспергирования под влиянием смежного технологического воздействия.

Энергокинетические принципы можно представить рядом следующих положений:

1) смежные технологические воздействия должны быть независимы друг от друга, т. е. должно выполняться требование независимого изменения плотности энергетического потока и его длительности.

2) смежные технологические воздействия должны иметь импульсно-циклический способ реализации с согласованием между собой энергетических параметров.

3) значения длительности релаксации смежных технологических воздействий должны быть согласованы между собой.

4) необходимо ограничивать верхний уровень плотности энергетических потоков в целях управления фазовыми превращениями в РПО, создавая «ядерное» кипение электролита и предотвращая пленочное.

4.3. Повышение срока службы деталей машин с помощью комбинированных электротехнологических методов

Комбинированные электротехнологические методы, способствующие повышению и стабилизации долговечности деталей машин, которые функционируют в условиях эрозионно-механического, термо-эрозионного, ударно-усталостного, ударно-абразивного изнашивания и циклического знакопеременного нагружения, широко применяются вследствие создания в поверхностном слое оптимальных значений параметров качества (макро- и микрогеометрическая точность; распределение твердости; эпюра внутренних остаточных напряжений; структурный и фазовый состав поверхностного слоя и др.). Полученные результаты приводят к необходимости рассмотреть в целом изменения металло-физических параметров поверхностей деталей машин, подвергаемых воздействию комбинированных параллельно-последовательных электротехнологических методов, та-

ких как: алмазноэлектрохимическое хонингование (АЭХХ) и гальваническое хромирование (ГХ), дробеструйное упрочнение (ДУ) и электрохимическое полирование (ЭХП); электрохимическое импульсно-циклическое формообразование (ЭХО имп.) и ДУ; электрохимическое формообразование с неподвижным инструментом (ЭХО неподв.) и гальваническое хромирование (ГХ); электрохимическое протягивание (ЭП) и (ГХ); лазерное термоупрочнение (ЛТО) и ультразвуковое выглаживание (УЗВ); электроискровое легирование (ЭИЛ) и УЗВ.

Параллельными называются комбинированные сочетания, когда воздействия объединены в единый энергетический центр, а последовательными - комбинированные сочетания, когда воздействия располагаются в последовательную цепь. Параллельно-последовательными называются комбинированные сочетания, включающие сформированную последовательную цепь с наличием единых энергетических центров воздействий.

Исследование оптимизации параметров качества поверхностного слоя сочетаний осуществлялось в условиях экспериментальных исследований, стендовых и натурных испытаний. Рассмотрим характер взаимосвязи параметров качества с достигаемыми эффектами прироста долговечности.

Установлены следующие прямые связи:

1) ЭХО неподв. и ЭХ с ГХ – термоэрозионное изнашивание; макро- и микрогеометрическая точность; осыпаемость гальванического покрытия;

2) АЭХХ и ГХ – термоэрозионное изнашивание; макро- и микрогеометрическая точность; распределение твердости, остаточных внутренних напряжений, осыпаемость гальванического покрытия;

3) ДУ и ЭХП – циклическое знакопеременное разрушение; макро- и микрогеометрическая точность, распределение твердости, эпюры внутренних остаточных напряжений;

4) ЭХО имп. и ДУ – циклическое знакопеременное нагружение; ударно-усталостный износ; макро- и микрогеометрическая точность; рас-

пределение твердости, эпюры внутренних остаточных напряжений;

5) ЛТО и УЗВ – ударно-абразивный износ; макро- и микрогеометрическая точность; распределение твердости, эпюры внутренних остаточных напряжений, структурно-фазовый состав поверхностного слоя;

6) ЭИЛ и УЗВ – ударно-абразивный износ; макро- и микрогеометрическая точность; распределение твердости, эпюры внутренних остаточных напряжений; структурно-фазовый состав поверхностного слоя.

Названные выше связи определяются рядом специфических моментов в достижении определенного прироста долговечности (снижение показателей макро- и микрогеометрической точности на 10–35%; увеличение твердости на 20–40 %, сжимающих остаточных напряжений на 15–20%). Снижение осыпаемости гальванического хромового покрытия на 0,5–7,0 % способствует приросту долговечности при применении таких параллельно-последовательных методов как АЭХХ и ГХ; ЭП+ГХ; ЭХО имп.+ ГХ; ЭХО неподв. + ГХ. В этих комбинациях реализуются три методических принципа: совмещение, исключение, совершенствование.

Главенствующим принципом образования комбинированных методов является принцип совершенствования, а принципы совмещения и исключения являются соподчиненными.

По принципу исключения формируются комбинированные последовательные сочетания воздействий путем изъятия некоторых из них в пространстве и во времени для обеспечения определенного качественного уровня параметров поверхностного слоя, что создает необходимую долговечность.

По принципу совмещения формируются комбинированные параллельные сочетания воздействий путем помещения определенных из них в замкнутый пространственно-временной энергетический центр.

По принципу совершенствования образуются комбинированные параллельно-последовательные сочетания воздействий путем объединения в

пространстве и во времени в последовательные комплексы параллельных энергетических центров формообразования и упрочнения. Принцип обеспечивает получение нового качественного уровня параметров поверхностного слоя, создающих необходимую долговечность деталей машин.

Реализация принципа исключения (АЭХХ) формирует адгезионно-когезионный механизм изнашивания, обеспечивает повышение износостойкости деталей-образцов на 5–10 %, при этом оптимальная зона режимного обеспечения создает менее протяженные участки когезионного изнашивания, что объясняется значительным эффектом упрочнения, достигнутым посредством назначения оптимальной продолжительности выхаживания АЭХХ.

Выполнение принципа совершенствования (АЭХХ+ГХ) позволяет снизить величину стенового износа на 10–20%, полностью исключив адгезионно-когезионные эффекты. В этом случае на фрактограммах превалируют области светло-серого тона, причем увеличение толщины гальванического покрытия (до 70 мкм) способствует формированию трещин на поверхностях образцов, что укладывается в зону оптимальных режимов, обеспечивающих снижение осыпаемости гальванического покрытия, прирост твердости, формирование эпюры сжимающих напряжений.

Реализация принципов исключения и совершенствования в условиях применения последовательных методов (ЭХО неподв. + ГХ; ЭП+ГХ) исключает образование макро- и микропогрешностей поверхностного слоя. Этот эффект оценивается значениями в 10–15 %, что на 0,5 – 1,0 % снижает осыпаемость гальванического хромового покрытия, обеспечивая за счет этого повышение долговечности на 5 – 10 %. Необходимо подчеркнуть, что увеличение толщины гальванического покрытия до 220 мкм вызывает образование многочисленных трещин и сколов вследствие реализации эффекта пластического оттеснения в условиях контактного трибологического взаимодействия. Надежное функционирование в условиях цик-

лического знакопеременного нагружения и ударно-усталостного изнашивания обеспечивается комбинированными последовательными сочетаниями: ЭХО имп.+ДУ; ДУ+ЭХП, которые способствуют снижению макро- и микрогеометрической точности на 10 – 15 %, увеличению твердости поверхностного слоя на 45 – 50 %, формированию эпюры сжимающих напряжений при увеличении последних на 40 - 50%. В то же время применение второго сочетания улучшает микрогеометрические показатели на 10–15 %, твердость на 75 – 90 %, образуется эпюра сжимающих напряжений при увеличении значений последних на 60 – 75 %, прирост долговечности в условиях циклического знакопеременного нагружения составляет 10 – 30 %.

Реализация некоторых принципов комбинирования (исключения и совмещения) весьма специфична для сочетаний технологических методов при проведении комплекса трибологических испытаний. Для формообразующе-упрочняющих сочетаний (ЭХО имп. + ДУ; ДУ + ЭХП) характерно наличие механизма когезионно-адгезионной формы изнашивания. Изменение механизма изнашивания в сторону адгезионной формы характерно для упрочняющего сочетания и, наоборот, эффект когезии относится к формообразующему комбинированному методу (ЭХО имп.+ДУ). Обеспечение долговечности в условиях ударно-абразивного изнашивания при использовании последовательных комбинаций (ЛТО + УЗВ; ЭИЛ + УЗВ) реализуется при направленном изменении твердости, эпюры внутренних остаточных напряжений, структуры и фазового состава поверхностного слоя. Улучшение макро- и микрогеометрической точности при установленных оптимальных режимах незначительно и составляет 5 – 6 %, в то же время изменение величин, характеризующих распределение твердости, для последовательных методов (ЛТО+УЗВ; ЭИЛ+УЗВ) составляет 45 – 50 и 30 –45 % соответственно. В поверхностном слое осуществляется образова-

ние сжимающей эпюры напряжений, обеспечивающей прирост последних на 30 – 45 %. Все это способствует повышению долговечности в условиях циклического нагружения на 5 – 8 %.

Трибологическая апробация комбинированных последовательных сочетаний (реализуя принципы исключения, совмещения) создает 1,5–2-кратный запас долговечности в условиях ударно-абразивного изнашивания. Эти результаты объясняются трансформацией структуры поверхностного слоя (принцип совмещения) в условиях УЗВ, которая снижает содержание аустенитных составляющих с 35 – 40 до 2 – 5 %. Подобный эффект приводит к повышению поверхностной твердости, формированию эпюры внутренних остаточных напряжений. В этих условиях изнашивания когезионно-адгезионный механизм, сопровождаемый макро- и микродефектами поверхностного слоя, трансформируется в граничный трибохимический, формируя 1,5–2-кратный прирост долговечности.

Результаты проведенного комплекса исследований параметров качества поверхностного слоя, стендовых, натурных испытаний подтвердили справедливость выделенных сочетаний. При этом выявлены общие закономерности увеличения долговечности при оптимизации определенных сочетаний или определенных параметров качества. В частности, необходимо отметить следующее.

1. С учетом систематических лабораторных и стендовых испытаний, имитирующих реальные условия эксплуатации деталей машин, установлены общие кинетические закономерности процессов поверхностной повреждаемости сталей, упрочненных рассматриваемыми методами, при эрозионно-механическом, термоэрозионном ударно-абразивном, ударно-усталостном изнашивании, а также при циклическом знакопеременном нагружении.

2. На основании систематизации результатов экспериментальных исследований взаимообусловленности трибологической долговечности и

свойств поверхностных упрочненных слоев материалов определен и обоснован минимальный набор геометрических, физических, структурных параметров качества, достаточных в определенных их сочетаниях (комплексах) для оценки эксплуатационных свойств материалов: макро- и микрогеометрическая точность; осыпаемость; структурно-фазовый состав; распределение твердости и остаточных внутренних напряжений по глубине поверхностного слоя. Такими комплексами являются:

- а) геометрические параметры и осыпаемость;
- б) геометрические параметры, твердость, остаточные напряжения;
- в) геометрические параметры, остаточные напряжения, структурно-фазовый состав;
- г) геометрические параметры, осыпаемость, остаточные напряжения;
- д) геометрические параметры, осыпаемость, твердость, остаточные напряжения.

Установлено качественное соответствие между различными комплексами параметров качества, определенными комбинациями параллельно-последовательных электротехнологических комплексов.

3. На основании экспериментальных, стендовых и натурных испытаний сформированы комплексы параметров качества, определяющие пути повышения долговечности деталей машин. В то же время параметры структуры и фазового состава поверхностных слоев нормируют лишь ударно-абразивное изнашивание. Эрозионно-механические, ударно-усталостные, ударно-абразивные условия воздействия внешней среды однозначно сочетаются соответственно в комплексах (а, б, в). В то же время термоэрозионное изнашивание определяется двумя (а и д), а долговечность в условиях циклического изнашивания уже тремя (а, в и г) комплексами. Обнаруженные соответствия между комплексами параметров качества и

условиями эксплуатации деталей позволили определить следующие оптимальные режимы методов 1–6 (табл. 4.1).

Метод 1	
Плотность тока, А/см ²	30 – 40
Напряжение, В.....	14 – 20
Продолжительность, с.....	90 – 1200
Электролит.....	10 – 15 %-ный раствор NaCl
Скорость перемещения катода-инструмента, мм/мин.....	178 – 196
Метод 2	
Плотность тока, А/см ²	20 – 30
Давление брусков хона, МПа.....	0,4 – 0,5
Напряжение, В.....	14 – 20
Продолжительность, с.....	90 – 200
Электролит.....	10 – 15 %-ный раствор NaNO ₃ ; 0,01 ТМС – 31
Давление электролита, Па.....	0,6 – 0,8
Вид алмазного инструмента-бруска...	А СР 80/63 Р9/Р11 ТУ-037-200-77Е
Метод 3	
ЭХО:	
плотность тока, А/см ²	35 – 40
напряжение, В.....	8 – 12
продолжительность, с.....	900
электролит.....	10 – 15 %-ный раствор NaNO ₃
Продолжительность ДУ, с.....	1080 – 1200
Метод 4	
Продолжительность ДУ, с.....	400 – 800
ЭХП:	
плотность тока, А/см ²	0,6 – 0,7
напряжение, В.....	14 – 18
продолжительность, с.....	До 480
Метод 5	
ЛТО:	
плотность мощности, Вт/см ²	1,1·10 ⁴ – 8·10 ⁵
скорость перемещения, мм/с.....	0,5 – 1,5
диаметр луча, мм.....	1
УЗВ:	
давление, МПа.....	(26 – 84)10 ⁵
скорость перемещения, мм/с.....	0,05 – 0,2
Метод 6	

ЭИЛ:	
энергия импульса, Дж.....	0,1 – 0,3
рабочий ток, А.....	0,8 – 0,9
материал легирующего электрода..	Т15К6, БрБ2
УЗВ:	
удельное сопротивление, МПа.....	(26 – 84)10 ⁵
скорость перемещения, мм/с.....	0,05 – 0,2

Таблица 4.1

Сравнительные данные по увеличению параметров качества поверхности

Метод	Увеличение параметров качества при использовании данных методов по сравнению со штатным методом, %					
	толщины по-верх-ност-ного слоя	шеро-хова-тости по-верх-ности	напря-женного состоя-ния по-верх-ностного слоя	макро-геомет-риче-ской точно-сти по-верхно-сти	твер-дости по-верх-ност-ного слоя	долговечно-сти
1	2	3	4	5	6	7
1. Последователь-ные методы ЭХО неподв.+ГХ (9–18 мкм), ЭП+ГХ (18–220 мкм)	10–15	15–18	До 15	10–20	До 20	10–30 в ус-ловиях эро-зионно-механиче-ского цикли-ческого на-гружения
2. Параллельно-последовательный метод АЭХХ-ГХ (9–70 мкм)	10–15	25–30	15–20	30–35	30–40	10–30 в ус-ловиях тер-моэрозион-ного цикли-ческого на-гружения
3. Последователь-ный метод ЭХО имп.+ДУ	10–12	10–15	45–50	10–15	45–50	10–15 в ус-ловиях цик-лического знакопере-менного на-гружения
4. Последователь-ный метод ДУ+ЭХП	20–30	10–15	60–75	10–15	До 50	10–30 в ус-ловиях цик-лического знакопере-менного на-гружения

Окончание табл. 4.1

1	2	3	4	5	6	7
5. Последовательный метод ЛТО+УЗВ	10	10	45–50	10	50	180–240 в условиях ударно-абразивного изнашивания
6. Последовательный метод ЭИЛ+УЗВ	10	10–12	15–20	10–15	30–45	180–260 в условиях ударно-абразивного изнашивания

4.4. Прогрессивные электрофизические методы модификации инструментальных твердых сплавов

В числе прогрессивных технологических направлений, обуславливающих и обеспечивающих научно-технический прогресс металлообработки, одно из первых мест занимают методы электрофизической обработки материалов, с каждым годом все более широко используемые в промышленности и дающие большой экономический эффект. К методам электрофизической обработки относят различные по схемному и аппаратурному оформлению и назначению методов обработки, основанных на использовании электрической энергии или специфических физических явлений, создаваемых этой энергией, для удаления материала, нанесения защитных покрытий или модификации поверхностного слоя.

В инструментальном производстве электрофизические методы обработки применяются для упрочнения режущего инструмента с целью повышения его эксплуатационных характеристик. Быстрое разрушение изделий, работающих при высоких скоростях, нагрузках и температурах, к каковым относится режущий инструмент, требует разработки и внедрения в производство новых методов упрочнения.

Традиционные способы повышения стойкости как поверхностная термообработка, различные диффузионные и другие химико-термические

способы обработки, нанесение электролитических покрытий, наплавка и другие в ряде случаев не обеспечивают необходимой износостойкости или неприемлемы по другим причинам. Поэтому все большее распространение получают такие способы, как нанесение износостойких покрытий и поверхностное упрочнение изделий из металлов и сплавов методами ионно-плазменной обработки. Эти способы обработки позволяют получать покрытия и упрочненные слои, которые служат диффузионными барьерами, уменьшают трение, износ инструмента, усилия резания и деформирования. Благодаря малой теплопроводности эти покрытия и слои защищают подложку от перегрева, снижают склонность к сварке с обрабатываемым материалом и налипанию его на инструмент.

Наиболее широкое применение указанные способы получили для повышения износостойкости неперетачиваемых режущих пластин из твердых сплавов. Твердые сплавы, как инструментальные материалы широко и эффективно применяются в металлообработке. Достаточно отметить, что твердосплавным инструментом снимается около 70% всей стружки. Однако качественные изменения в металлообработке (появление новых труднообрабатываемых материалов, применение станков с ЧПУ, многоцелевых станков, ГПС и т. д.) повышает требования к работоспособности и надежности твердосплавного инструмента. Поэтому необходимо не только создавать новые твердые сплавы с заданными свойствами, но и улучшать качество наиболее распространенных твердых сплавов.

Впервые твердосплавные пластины с покрытием из карбидов титана (TiC) появились на мировом рынке в 1969 г. К настоящему времени более 50 % всех твердосплавных пластин, выпускаемых западными фирмами, имеют покрытия на основе таких соединений, как карбид титана TiC, нитрид титана TiN, оксид алюминия Al_2O_3 и др. В отечественной промышленности широкое применение нашли установки типа «УВМ», «Пуск», «Булат», позволяющие наносить на инструмент одно- и многослойные

покрытия.

Методы ионно-плазменной обработки основаны на конденсации на поверхности изделий компонентов паровой фазы в условиях обработки частицами высоких энергий.

Их главное преимущество – обеспечение высокой адгезии наносимого материала к основе за счет применения различных, основанных на физических явлениях приемов подготовки поверхности и активации процессов обрабатывания переходных зон, в том числе нагрева, предварительной очистки поверхностей, бомбардировкой ионами инертных газов или металлов и обработки ионами в процессе конденсации, осаждения высокоэнергетических ионов, а также атомов и молекул с участием плазмохимических процессов.

При ионно-плазменных методах осаждения возможно нанесение в виде однослойных или многослойных покрытий широкого класса материалов, в том числе сложнолегированных сплавов, износостойких соединений типа окислов, карбидов, нитридов, простых и сложных композиций на базе различных металлов. Применение твердых покрытий, полученных ионно-плазменными методами осаждения, позволяет существенно повысить стойкость режущего и деформирующего инструмента.

Известные способы повышения стойкости инструментов имеют свои положительные и отрицательные стороны. Положительно то, что: 1) уменьшаются силы резания; 2) уменьшаются силы трения; 3) уменьшается температура в зоне резания; 4) стойкость инструментов значительно возрастает. Отрицательно: 1) необходимость в использовании в качестве рабочей среды различных газов (азота, углерода, водорода и т.д.); 2) для получения этих сред необходимо иметь специальное оборудование; 3) необходима тщательная очистка газов от кислорода и кислородосодержащих соединений; 4) необходимо осуществлять контроль за температурой изделий во избежание их перегрева и для их охлаждения необходимо преду-

сматривать специальные приспособления; 5) процессы достаточно трудоемкие и продолжительные.

С целью повышения производительности процесса упрочнения, повышения срока службы изделия за счет увеличения износостойкости и твердости поверхности, улучшения качества процессов при сохранении геометрических и конструктивных параметров изделий лабораторией упрочнения кафедры «МРСиИ» Белорусско-Российского университета создан техпроцесс упрочнения изделий из металлов и сплавов потоком низкоэнергетических ионов, сущность которого заключается в том, что этот процесс заключается без специального приготовления и вводимой в камеру рабочей среды (азота или азотосодержащих газов), изделия упрочняются при более низких температурах, не вызывающих термических превращений, за более короткое время. Изменение свойств поверхностных слоев происходит вследствие торможения в нем бомбардирующих ионов, за счет чего повышается стойкость и износостойкость материалов. Применение созданного процесса упрочнения по сравнению с существующими способами обеспечивает следующие преимущества: возможность получения более высокой стойкости и износостойкости, что важно для современной технологии металлообработки; сокращение общей продолжительности процесса упрочнения в результате отсутствия ряда операций – подогрева, нагрева и охлаждения изделий, предварительной термообработки, что повышает производительность процесса; большую экономичность, обусловленную отсутствием дополнительной, специально подготавливаемой рабочей среды и устройства для ее приготовления; сохранность конструктивных и геометрических размеров обрабатываемых изделий; процесс не токсичен и соответствует требованиям по защите окружающей среды.

Данный способ упрочнения защищен авторским свидетельством №1309593. Согласно ему, между электродами, один из которых является

анодом, а другой катодом, зажигают тлеющий разряд при давлении остаточных газов 10–3...10–1 мм рт.ст. и межэлектродном расстоянии 300...400 мм. Напряжение горения тлеющего разряда при этом составляет 2..5 кВ, а его плотность тока – 0,05...0,4 мА/см². Указанный способ также характеризуется тем, что осуществляется в устройстве, схема которого изображена на рис. 4.2. Регулирование рабочего давления в камере осуществляется заслонкой.

Система измерения давления остаточной атмосферы включает термопарный преобразователь давления ПМТ-2 или ПМТ-4М, и вакуумметр, ВТ-3 или ВТ2-2А-П, соответственно. Блок измерения электрических параметров разряда состоит из киловольтметра и миллиамперметра, посредством которых соответственно, измеряют напряжение горения тлеющего разряда и его силу тока.

Цикл процесса обработки инструмента включает его очистку, промывку в бензине, ацетоне и этиловом спирте. Далее, инструмент загружают на рабочий стол – катод в камеру. Из последней откачивают воздух до давления 100–10 мм рт. ст., а затем до давления порядка 10–3 мм рт.ст. После этого, затвор парамасляного диффузионного насоса закрывают и включают цепь питания источника высокого напряжения, благодаря чему между электродами создается разность потенциалов, величину которой устанавливают в пределах 3...4 кВ. В результате этого возникает пробой разрядного промежутка, так называемый таунсендовский пробой газа, с возникновением самостоятельного разряда. Далее, управляя источником высокого напряжения и заслонкой, устанавливают величины давления остаточных газов, напряжения горения разряда и плотности тока в вышеуказанных пределах. Область этих режимов характеризуется тем, что при постоянной силе тока, с увеличением межэлектродного расстояния или давления остаточных газов, напряжение горения разряда уменьшается; разряд занимает всю поверхность катода; с увеличением силы тока напря-

жение горения разряда и плотность тока увеличиваются. Указанные свойства разряда характерны для аномального тлеющего разряда. По истечении времени обработки изделий в плазме аномального тлеющего разряда, при поддержании на заданном уровне параметров этого процесса, высокое напряжение выключают. Производят напуск воздуха в камеру, а затем, из последней извлекают обработанные изделия.

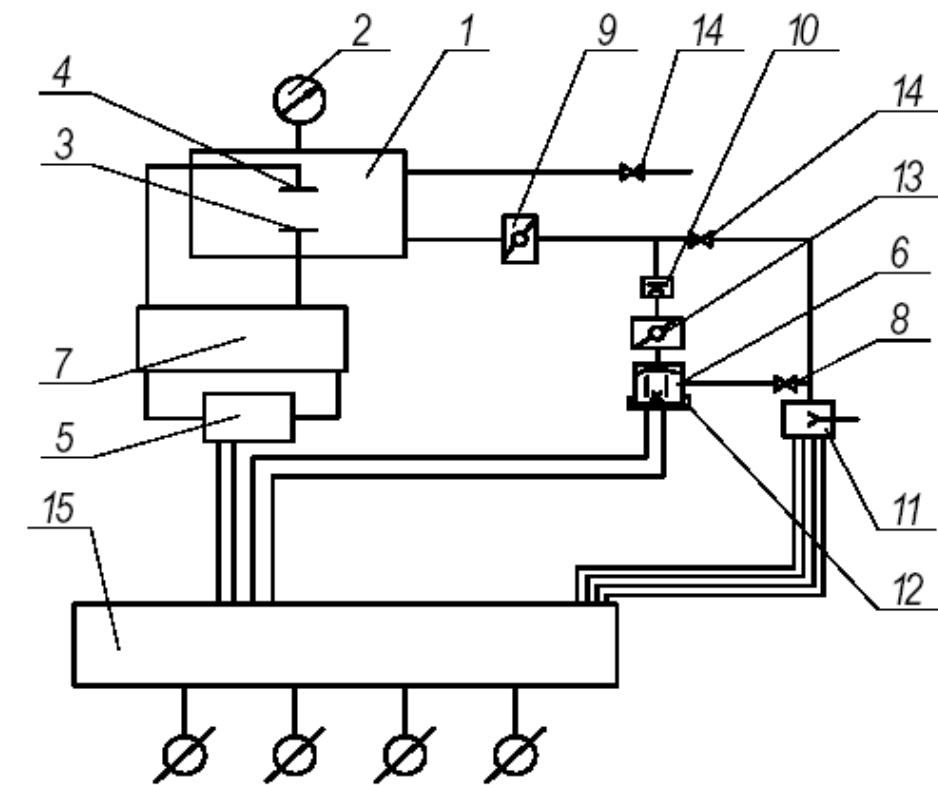


Рис. 4.1 – Схема установки для обработки:

1 – камера; 2 –система измерения давления; 3 –стол-катод; 4 – анод; 5 – источник высокого напряжения; 6 –паромасляный диффузионный насос; 7 – блок измерения электрических параметров разряда; 8,14 – клапана; 9 – заслонка; 10 – ловушка; 11 –механический насос; 12 – плитка; 13 – затвор; 15 – блок питания

До настоящего времени основное внимание при изучении процесса повышения стойкости инструментальных материалов путем воздействия

на них потока низкоэнергетических ионов уделялось быстрорежущим сталям. По обработке инструмента из быстрорежущей стали было защищено несколько диссертационных работ, отработан технологический процесс упрочнения, позволяющий производить обработку на оптимальных режимах. Значительные успехи в области порошковой металлургии привели к возрастанию доли твердосплавного инструмента. Физико-механические свойства твердосплавного инструмента выше, чем у инструмента изготовленного из быстрорежущей стали, что позволяет производить обработку им на более высоких режимах, что повышает производительность обработки. Несмотря на перечисленные выше преимущества твердосплавного инструмента рекомендации по его упрочнению и практическому применению для повышения эффективности процесса резания отсутствуют. Это обусловлено тем, что до настоящего времени не выявлена физическая картина процесса упрочнения твердосплавного инструмента.

Эксперименты, проводимые по упрочнению твердосплавного инструмента показали повышение стойкости обработанных образцов по отношению к необработанным в 1,5-2,5 раза. Упрочнение наблюдалось как при обработке инструмента в исходном состоянии, так и при обработке предварительно упрочненного инструмента методами конденсации покрытий из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхностей инструмента (КИБ), плазменными, газопламенными и другими методами. Актуальность развития ресурсосберегающих технологий и возрастающий процент твердосплавного инструмента используемого в промышленности делают решение этой проблемы перспективной и экономически целесообразной. Полученная формула определяет повышение микротвердости твердосплавных пластин в результате модификации последних потоком частиц в плазме тлеющего разряда.

4.5. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин лазерным модифицированием

Технологическое оборудование предприятий имеет большое количество узлов трения. Около 80 % мощности машин расходуется на преодоление работы сил трения. Износ деталей является следствием работы сил трения, возникающих при взаимном перемещении трущихся поверхностей. Характер износа, интенсивность и природа изнашивания во многом зависят от вида фрикционного контакта. Скорость изнашивания деталей машин зависит, в том числе, от точности и качества их изготовления, качества сборки и наладки оборудования, а также от технологии изготовления и упрочнения деталей.

Предлагается комбинированный метод упрочнения рабочей поверхности детали из сплава Д16, представляющий собой лазерное модифицирование анодированной поверхности.

Термическое упрочнение лазерным излучением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и охлаждении этого участка со сверхкритической скоростью после прекращения воздействия за счет теплоотвода во внутренние слои металла. Основной особенностью воздействия лазерного излучения на материалы является локальный характер теплового источника, обеспечивающий формирование жесткого термического цикла при поверхностной обработке с высокими скоростями перемещения источника нагрева и высокими скоростями нагрева и охлаждения материала.

Тепловое воздействие при лазерном упрочнении регулируется в широких пределах за счет изменения параметров лазерного излучения и режимов обработки. Это обеспечивает регулирование скоростей нагрева и охлаждения металла, времени пребывания металла при высоких температурах, что позволяет получать требуемую структуру поверхностного уча-

стка и соответствующие свойства.

Технологические возможности лазерного упрочнения позволяют использовать этот процесс в качестве заключительной операции без последующей механической обработки. Причем лазерное термоупрочнение отдельных участков можно проводить после сборки конструкции или узла машины. Следует особо подчеркнуть возможность автоматизации процесса лазерного термоупрочнения. С учетом высокой производительности процесса операции лазерного модифицирования могут быть встроены в современное гибкое автоматизированное производство.

Требуемые свойства поверхности при лазерном термоупрочнении получают за счет создания соответствующего термического цикла с заданными оптимальными параметрами, определяемыми максимальной температурой нагрева, скоростью нагрева, скоростью охлаждения, временем пребывания металла при температуре выше характерной.

Лазерную обработку образцов осуществляли импульсным излучением неодимового лазера на стекле ГОС-301 в режиме свободной генерации импульса при различной энергии накачки и степени расфокусировки ΔF , которая влияет на плотность энергии, рассеиваемой по поверхности.

Режимы лазерной обработки приведены в табл. 4.2. Диапазон интенсивности воздействующего на поверхность излучения варьировался от 10 до 200 кВт/см².

Проводилось исследование упрочненной поверхности. Микротвердость образцов измерялась с помощью прибора ПМТ-3 по стандартной методике.

Наличие зоны с повышенными механическими свойствами покрытия свидетельствует о том, что при обработке поверхности лазерным излучением требуемой интенсивности можно достичь упрочнения оксидного покрытия. Оптимальным режимом упрочняющей лазерной обработки является 10–15 кВт/см². При этом максимальная величина микротвердости

достигает 700 HV.

Таблица 4.2

Режимы лазерной обработки образцов

№ опыта	Режим обработки			Размеры образцов		Величина износа, мкм (за 20 км пути трения)
	E , кДж	ΔF , см	q , кВт/см ²	a , мм	b , мм	
1	5	-32	10	21	21	13
2	5	-22	20	16	16	8
3	7,5	-22	30	16	16	6
4	12,5	-22	50	16	16	15
5	10	-15	60	8,5	14,2	16
6	10	-10	110	7	12	18
7	10	-5	120	6	10	-
8	10	-2	200	5	7	-

Металлографические исследования показали, что при воздействии лазерного излучения интенсивностью ниже 30 кВт/см² видимых изменений на поверхности не наблюдается. Внешние изменения начинаются при q свыше 30 кВт/см² – поверхность становится матовой и плохо рассеивает свет, на некоторых участках поверхности темный цвет покрытия изменяется на белый, плотность и толщина покрытия уменьшаются. Это свидетельствует о начале термодеструкции покрытия. При q свыше 100 кВт/см² на поверхности образуется зона оплавления. Она имеет форму эллипсовидного кратера размерами 3–5 мм с углублением по середине и натеками расплавленного металла по краям.

Структура в зоне оплавления является типичной для сплавов, закаленных из расплавленного состояния при лазерной обработке. Она представляет собой мелкие ячейки светлого поля, очерченные темным полем размера в несколько микрометров. Степень травимости различных макроучастков расплава различна, что свидетельствует о химической неоднородности легированного слоя. Форма макроучастков указывает на конвек-

тивный характер перемешивания расплава. Фазовый состав ячейки светлого поля – α -фаза, на границах ячеек – квазиэвтектика.

Поверхность анодной пленки пористая, что снижает ее износостойкость при работе в паре трения. При воздействии лазером происходит передача теплоты в глубину металла. В результате алюминий, выплавляясь, поднимается вверх по капиллярам и заливает их, что приводит к получению беспористой, прочной и износостойкой рабочей поверхности детали.

Было изучено влияние лазерного воздействия на фазовый состав покрытия с помощью методов электронной микроскопии. Установлено, что микродифрактограммы поверхности до лазерной обработки являются кольцевыми.

В соответствии с этими результатами структура может быть интерпретирована как ГЦК с периодом решетки $a = 4,051 \pm 0,022$, что соответствует поликристаллическому алюминию. Других фаз, например, оксидов или гидроксидов не обнаружено. Очевидно, оксидное покрытие до обработки не имеет выраженной кристаллической решетки — оно аморфно.

Вид микродифрактограмм после лазерной обработки существенно изменяется. Все полученные микродифрактограммы точечные, что говорит о том, что порошок имеет кристаллическую структуру. Можно говорить о том, что при лазерной обработке в изначально аморфном оксидном покрытии перед его разрушением интенсивно развиваются процессы кристаллизации. Таким образом, удалось подтвердить наличие дисперсно-упрочненного слоя, формирующегося в процессе воздействия лазерного излучения на анодированно-пористую поверхность.

Была проведена проверка коррозионной стойкости различных покрытий. Проверялась модель износа в присутствии электролита. Установлено, что коррозионная стойкость получаемых покрытий на образцах (анодирование, эматалирование, лазерное модифицирование) в щелочной среде и в кислой среде удовлетворительна. Разрыхления получаемых покрытий не

наблюдается.

4.6. Физические методы упрочнения режущего инструмента

Физические методы упрочнения инструмента – сравнительно новые. Они преследуют, вообще говоря, ту же цель, что и традиционные: улучшить физико-механические свойства и микроструктуру поверхностного слоя материала. Но другими средствами: с помощью лазерного луча, магнитного поля или глубокого холода.

В настоящее время наиболее распространенным стал первый из них – метод лазерного упрочнения. Его сущность – мощное, с большой плотностью энергии, импульсное воздействие светового пучка на упрочняемую поверхность. В результате данная поверхность практически мгновенно нагревается выше температуры закалки стали, из которой изготовлен инструмент. За нагревом сразу же следует резкое охлаждение: тепловая энергия поглощается слоями материала, не подвергавшимися воздействию лазерного луча. Поэтому облученный слой приобретает ярко выраженную мартенситную структуру.

Для лазерного упрочнения инструмента чаще всего применяют отечественную импульсную установку «Квант-16» с регулируемыми параметрами лазерного луча (энергии – в диапазоне 18 – 54 Дж, диаметра – 3,0 и 4,5 мм, коэффициента перекрытия, т. е. отношения разности диаметра "пятна" закалки и шага обработки к диаметру "пятна"; частоты следования импульсов – 0,2–0,33 Гц). Такие диапазоны достаточны для хорошего упрочнения инструментов из любых марок сталей. Но следует все-таки иметь в виду: чем меньше частота следования импульсов и больше диаметр лазерного луча, тем выше получается микротвердость обрабатываемой поверхности инструмента.

Однако возможности лазерного упрочнения наши заводы АТЭ ис-

пользуют, к сожалению, далеко не полностью. Причина – недостаток информации об оптимальных режимах обработки инструментов. Фактически такая информация есть лишь по семи маркам инструментальных сталей (табл. 4.3). Что, конечно, явно мало. Хотя даже из этих данных, если их внимательно проанализировать, можно сделать интересные практические выводы. Например, такой: величину энергии лазерного луча нужно выбирать в зависимости от диаметра «пятна» закалки и марки стали.

Таблица 4.3

Оптимальные режимы лазерной обработки инструментов

Марка инструментальных сталей	Энергия импульса лазерного луча, Дж, при диаметре пятна закалки, мм			
	3	3,6	4	4,5
У8	23	31	41	54
У12	22	30	39	52
ХВГ	22	30	39	51
9ХС	21	29	37	49
Х12М	20	28	35	46
Р6М5	18	27	32	43
Р18	18	27	33	45

Заметим, что после лазерного упрочнения режущих инструментов на режимах, приведенных в таблице, микротвердость HV поверхности во всех случаях близка к 1150–1200 ед., а износостойкость повышается, по сравнению с исходной, в 1,25–2,5 раза. Если же режимы выдерживаются не столь точно, другими получаются и результаты. Так, на АТЭ-1 лазерному упрочнению в свое время подвергли грибковые фрезы из стали Р6М5. Однако их износостойкость при обработке шпоночной канавки на валу (сталь марки 45) генератора Г250 повысилась лишь на 22,5 %. Что, конечно, тоже выигрыш, но – меньше ожидаемого. Другое предприятие подотрасли, СОАТЭ, в настоящее время тоже применяет лазерную импульсную установку «Квант-16» для упрочнения режущего инструмента. И результаты у него явно лучше: износостойкость сверл,

зенкеров и разверток из той же стали Р6М5 повысилась в 1,25—1,75 раза.

Лазерное упрочнение дает значительный эффект и при обработке твердосплавного инструмента. Причем характерно, что режимы нужны те, что и в случае инструментальных сталей. К примеру, износостойкость инструментов из твердых сплавов ВК6–ВК15 после лазерного упрочнения повышается в 2 – 3 раза.

Обработка инструмента в магнитном поле – один из самых новых методов упрочнения инструмента. При ней готовый к эксплуатации инструмент (концевая фреза, сверло, развертка и т. д.) закрепляется в патроне обычного токарного станка, а в резцедержателе – электромагнит или постоянный магнит, создающий сравнительно слабое магнитное поле. При вращении инструмент, очевидно, подвергается перемагничиванию с частотой, равной частоте вращения патрона. В результате снижаются остаточные напряжения от заточки инструмента и коэффициент трения. Продолжительность процесса зависит от габаритных размеров обрабатываемого инструмента и напряженности магнитного поля. После обработки в магнитном поле инструмент размагничивают.

Как видим, метод отличается исключительной простотой и эффективностью: после обработки стойкость инструментов повышается в 1,5–2 раза.

Сущность обработки инструмента глубоким холодом (в жидком азоте) заключается в том, что при охлаждении до 83 К (–190 °С) остаточный аустенит, образовавшийся при закалке, которая неизбежна по традиционной технологии термической обработки инструментов, практически полностью переходит в мартенсит. При этом возрастает твердость материала, а стойкость инструмента возрастает в 1,25 – 1,5 раза по сравнению со стойкостью после обычной термической обработки.

4.7. Влияние лазерной обработки, карбонитрации и сочетания с вакуумно-плазменным покрытием TiN на некоторые свойства стали Р6М5

Из известных способов поверхностного упрочнения лишь немногие можно использовать для повышения работоспособности режущих инструментов из быстрорежущих сталей. Среди таких способов значительный интерес представляют еще редко применяющиеся и недостаточно изученные лазерная обработка и карбонитрация.

При анализе влияния поверхностного упрочнения инструментов из быстрорежущих сталей на их работоспособность главное внимание обращают на изменения твердости, теплостойкости и износостойкости инструментального материала. Не отрицая важности этих свойств, подчеркнем, что основным фактором, влияющим на работоспособность режущих инструментов из быстрорежущих сталей, является температурный режим резания, определяющий характер контактных процессов на рабочих поверхностях инструментов и закономерности наростообразования на передней поверхности. На температурный режим резания, кроме задаваемых параметров процесса (геометрии заточки инструмента, скорости V , подачи S , глубины резания t), существенно влияют теплофизические свойства инструментального материала и его схватываемость (адгезия) с обрабатываемым материалом. Поэтому очень важно знать, каким образом поверхностное упрочнение изменяет эти характеристики инструментального материала.

В литературе нет данных о влиянии карбонитрации и лазерной обработки на теплофизические свойства быстрорежущих сталей и схватываемость с конструкционными материалами при резании. Нет таких сведений и для случаев использования карбонитрации и лазерной обработки в комплексе с покрытиями типа TiN.

Сталь Р6М5, являющаяся типичной быстрорежущей сталью умеренной теплостойкости, выбрана в качестве объекта исследования как наиболее распространенная в металлообработке.

Заготовки образцов для исследований в виде кубиков с размером ребра 10 мм и заготовки для резцов в виде параллелепипедов с размерами 12x12x50 мм вырезали из прутков стали Р6М5 в состоянии поставки. Заготовки подвергали обычной для этой стали термообработке: закалке от 1230 °С в масло и последующему трехкратному отпуску при 560 °С (длительность каждого отпуска 1 ч, охлаждение с печью). Твердость стали после термообработки составляла (64 – 65)HRC₃.

Далее заготовки со всех сторон шлифовались на глубину 1 мм. Готовые образцы для исследований имели форму кубика с размером ребра 10 мм. Резцы затачивали на универсальном заточном станке модели ЭП-642 эльборовым кругом. Геометрия заточки: $\gamma = 0^\circ$; $\phi = 45^\circ$; $\phi_1 = 15^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 12^\circ$; $\lambda = 0^\circ$, где γ – передний угол; ϕ – главный угол в плане; ϕ_1 – вспомогательный угол в плане; α – задний угол; α_1 – вспомогательный задний угол; λ – угол наклона главного лезвия. Такой выбор геометрии режущей части резца обусловлен стремлением упростить методику изучения контактных характеристик.

Изготовленные образцы были использованы для металлографических исследований влияния карбонитрации и лазерной обработки на структуру стали, для измерения твердости и изучения триботехнических характеристик. Резцы были разделены на 6 основных групп (табл. 4.4).

Перед карбонитрацией и лазерной обработкой поверхности образцов и резцов тщательно обезжировали.

Карбонитрацию осуществляли в печи Ц-75 при 570°С ($\pm 10^\circ$ С) в течение 20 мин. Для получения рабочей атмосферы использовали гранулированный карбамид (величина гранул 1...5 мкм). Поскольку на поверхности стали при карбонитрации образуется рыхлый слой окалины толщиной

~100 мкм, все образцы и резцы после обработки зачищали наждачной шкуркой. Микротвердость после этого была равной (11500...13000) МПа.

Таблица 4.4

Обозначение видов обработки резцов

Номер группы	Вид обработки
1	Термообработка
2	Термообработка + карбонитрация
3	Термообработка + лазерная обработка передней поверхности
4	Термообработка + нанесение покрытия TiN
5	Термообработка + карбонитрация + покрытие TiN
6	Термообработка + лазерная обработка + покрытие TiN

Лазерную обработку осуществляли на импульсной лазерной установке «Квант-16». Задав ширину диаметра пучка 4,5 мм и длительностью импульса $5 \cdot 10^{-3}$ с, в широких пределах варьировали наиболее важный параметр обработки – энергию импульса (10...30 Дж). Изучение зависимости микроструктуры, образующейся в результате лазерного воздействия на поверхность, от плотности энергии в пучке позволило выбрать оптимальный режим обработки, приводящий к формированию специфической структуры. Полученная структура отличалась слабой травимостью в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте, более высокими по сравнению с исходным состоянием стали (после термообработки) твердостью и износостойкостью.

Оптимальный режим обработки (плотность энергии 1,8 Дж/мм²) был использован для упрочнения I образцов для триботехнических испытаний, а также для упрочнения передней поверхности резцов. В последнем случае был использован единичный импульс, при этом граница лазерного «пятна» отстояла от главной и вспомогательной режущих кромок на расстояние ~0,1 мм.

Вакуумно-плазменные покрытия TiN толщиной ~6 мкм были нанесе-

ны на переднюю поверхность резцов в установке «Булат-3Т» по режимам, рекомендуемым при промышленном использовании метода КИБ.

Исследование микроструктуры стали Р6М5 после карбонитрации и лазерной обработки осуществляли на металлографическом микроскопе МИМ-7, микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 г.

Испытания триботехнических характеристик осуществляли на машине трения СМЦ-2 по схеме «плоскость-цилиндр», при этом неподвижным телом служили кубические образцы стали Р6М5 с различной обработкой, а подвижным телом - цилиндрические шлифованные образцы диаметром 50 мм, изготовленные из нормализованной стали 45. В качестве смазки использовали 3% эмульсию на основе эмульсола ЭГТ. Смазывание осуществляли погружением части подвижного тела в эмульсию. Испытания на износостойкость проводили при нагрузке 1000 Н (при заданной геометрии образца этой нагрузке соответствует напряжение $\sigma \approx 200$ МПа) и скорости скольжения 1,3 м/с. Длительность испытаний 1 ч.

Износ цилиндрических образцов определяли взвешиванием на весах АДВ-200, износ контртела подсчитывали по замерам ширины «дорожки» трения, образующейся на образцах-кубиках в процессе испытаний.

Коэффициент трения измеряли в зависимости от нагрузки при ступенчатом нагружении в диапазоне нагрузок 0,2...2,0 кН.

Контактное взаимодействие резцов с обрабатываемым материалом изучали на токарно-винторезном станке модели 1А62, оснащенном динамометром УДМ-600, при кратковременном (~30 с) точении нормализованной стали 45 (НВ 175...185) по следующему режиму: $V = 94,5$ м/мин; $S = 0,25$ мм/об, $t = 0,5$ мм. В процессе резания измеряли составляющие силы резания P_x , P_y , P_z , определяли коэффициент укорочения стружки K_L , длину контакта стружки с передней поверхностью инструмента l_n , калориметрически определяли мощность теплового потока в инструмент Q_p

На рис. 4.2 представлена зависимость микротвердости от глубины за-

легания исследуемых объемов под поверхностью карбонитрированного образца.

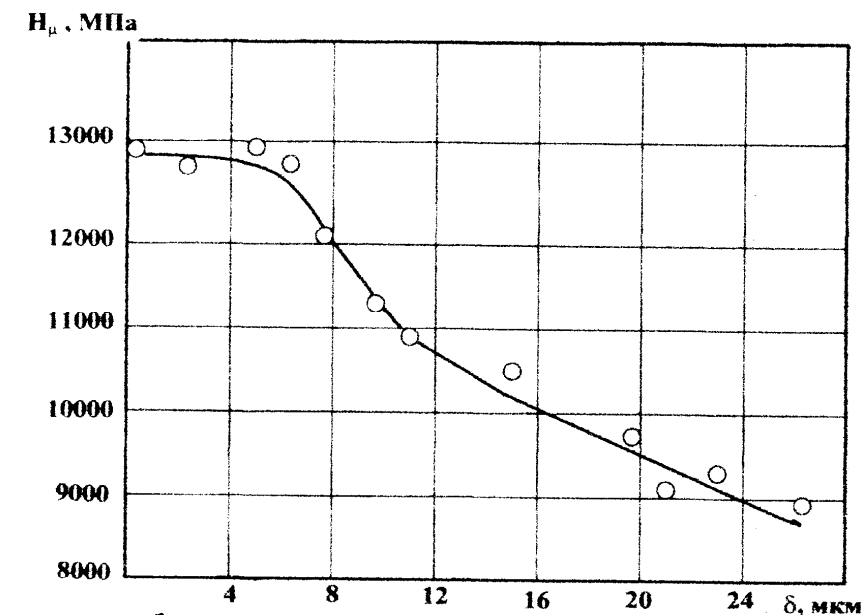


Рис. 4.2. Зависимость микротвердости карбонитрированного слоя от глубины залегания δ исследуемых объемов под поверхностью образца

Можно выделить две области: приповерхностную толщиной 5...6 мкм, где микротвердость имеет одинаковый уровень (~ 13 000 МПа), и внутреннюю область толщиной ~15 мкм, где микротвердость монотонно уменьшается от 13000 МПа до уровня, характерного для стали после термообработки (~9000 МПа).

В табл. 4.5 приведены результаты измерений микротвердости карбонитрированного слоя (измерения на поверхности образцов) в зависимости от температуры последующего дополнительного отпуска (отпуск осуществляли в муфельной печи под слоем чугунной стружки; длительность отпуска при каждой температуре 1 ч). Здесь же для сравнения приведены значения микротвердости после дополнительного отпуска в сердцевине образцов. Видно, что твердость карбонитрированного слоя во всем интервале исследуемых температур отпуска на 1400...2200 МПа выше твердости сердцевины. Таким образом, использованный режим карбонитрации обес-

печивает заметное (~ на 50 °С) повышение теплостойкости стали.

Таблица 4.5

Влияние температуры дополнительного отпуска на микротвердость стали Р6М5

Место измерения микро- твердости	Микротвер- дость перед отпуском, МПа	Микротвердость (МПа) по- сле отпуска при температуре		
		570 °С	600 °С	700 °С
Сердцевина образца	9000	9200	9300	5000
Карбонитрированный слой	13000	11000	10700	7200

В табл. 4.6 приведены результаты триботехнических испытаний. Как видно, карбонитрация обеспечивает некоторое увеличение коэффициента трения при больших нагрузках и повышает нагрузку задирообразования. Кроме того, благодаря карбонитрации существенно (почти в три раза) возрастает износостойкость стали Р6М5 и несколько увеличивается ее изнашивающая способность.

Таблица 4.6

Влияние карбонитрации и лазерной обработки стали Р6М5 на характеристики трения и изнашивания при трении по стали 45

№ партии образ- цов	Величина коэффициента трения ($\cdot 10^2$) при нагрузках P в кН										Износ колодки , $r \cdot 10^3$	Износ ролика, $r \cdot 10^3$
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0		
1	8,7	7,8	7,7	8,4	8,6	7,5	за- дир	—	—	—	14	17
2	8,7	7,8	7,7	9,1	9,8	9,6	9,4	9,6	за- дир	—	5	21
3	8,7	6,8	6,1	6,7	7,2	7,4	7,6	8,9	8,6	8,2	8	16

В целом результаты испытаний позволяют считать, что используемый режим карбонитрации обеспечивает эффективное и характерное для этого

вида химико-термической обработки изменение свойств быстрорежущей стали.

Металлографические исследования стали Р6М5 после лазерной обработки по оптимальному режиму показывают, что глубина упрочненного слоя, характеризующегося слабой травимостью в 3 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте и имеющего микратвердость ~ 10000 МПа, составляет ~ 40 мкм.

Из табл. 4.6 следует, что в рассматриваемых условиях трения использованный режим лазерной обработки обеспечивает повышение нагрузки задиροобразования и износостойкости стали.

Результаты изучения характеристик контактного взаимодействия резцов с обрабатываемым материалом представлены в табл. 4.7. Здесь $F = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ – сила трения стружки о переднюю поверхность резца; P_x , P_y , P_z – составляющие силы резания (P_x – продольная составляющая; P_y – радиальная составляющая; P_z – нормальная составляющая); $Q_m = \alpha F(V/K_L)$ – мощность теплового источника на передней поверхности; где α - коэффициент пропорциональности; $q = Q_m/S_k$ – интенсивность теплового источника на передней поверхности, где S_k – площадь контакта на передней поверхности; Q_p – мощность теплового потока в инструмент.

Анализируя представленные в табл. 4.7 результаты, важно отметить следующее:

– карбонитрация и в большей степени лазерная обработка приводят к существенному возрастанию составляющих сил резания, что связано, прежде всего, с увеличением адгезионного взаимодействия стружки с передней поверхностью резца в центральной (высокотемпературной) части контакта. В результате увеличивается мощность теплового источника Q_m и мощность теплового потока в инструмент Q_p .

Таблица 4.7

Результаты изучения характеристик контакта резцов из стали Р6М5 (после упрочняющей обработки) с обрабатываемым материалом

Вид обработки	1	2	3	4	5	6
F , Н	216	228	281	193	179	203
P_z , Н	326	353	365	305	306	319
K_L	2,60	2,70	2,65	2,31	2,43	2,30
l_n , мм	0,86	0,93	0,88	0,67	0,61	0,62
Q_m , Вт	140,9	143,2	179,9	130,8	116,6	138,8
Q_p , Вт	24,8	27,5	26,3	21,8	21,8	20,7
Q_p/Q_m , %	17,6	19Д	14,6	16,7	18,7	14,9
q , 10^6 Вт/м ²	231,7	217,8	289,0	276,8	275,0	322,7

– карбонитрация обеспечивает увеличение отношения Q_p/Q_m , а лазерная обработка – снижение этого отношения, что является следствием существенно различного влияния рассматриваемых обработок на теплопроводность объемов резца, прилегающих к площадке контактного взаимодействия стружки и инструмента.

В справедливости такого заключения можно убедиться при анализе задачи распределения возникающей при тoчении теплоты. В нашем эксперименте используется острый (незатупленный) инструмент, что позволяет исключить из рассмотрения процессы, происходящие на задней поверхности резца. Упрощенную схему тепловых потоков в этом случае можно представить следующим образом. В зоне условной плоскости сдвига действует деформационный источник теплоты мощностью Q_d . Часть этой мощности поступает в заготовку, а вторая часть переходит в стружку, обеспечивая одинаковое повышение температуры стружки в любой точке ее поперечного сечения. В надрезцовой части стружки (условно говоря,

непосредственно на передней поверхности инструмента) действует тепловой источник $Q_{\text{тп}}$ от работы силы трения F . Часть теплоты этого источника переходит в стружку, повышая температуру прирезцовых ее объемов, а вторая часть (Q_p) – поступает в резец. Таким образом, параметр $b = Q_p/Q_m$ – это по существу доля теплоты источника $Q_{\text{тп}}$, поступающая в резец. Анализ решения балансовых задач распределения теплоты между контактирующими и перемещающимися относительно друг друга телами, имеющими на площадке контакта источник теплоты, показывает, что b в общем случае является функцией теплофизических свойств контактирующих материалов и ряда других параметров (размера площадки контакта, скорости резания, коэффициента укорочения стружки), а характер функциональной зависимости определяется типом теплового источника.

В нашем эксперименте для практически одинаковых условий резания резцами, обработанными по типу 1, 2 и 3, наблюдаемые изменения b могут быть лишь следствием влияния лазерной обработки и карбонитрации на теплопроводность объемов материала резца, прилегающих к его передней поверхности. При этом увеличение b свидетельствует об увеличении теплопроводности этих объемов, а уменьшение b – об уменьшении теплопроводности.

Поэтому полученные результаты говорят о том, что карбонитрация приводит к повышению теплопроводности стали Р6М5, а лазерная обработка – к уменьшению ее теплопроводности. Причина такого влияния указанных обработок на теплопроводность может заключаться в а твердом растворе стали в результате карбонитрации. Она уменьшается в связи с частичным уходом легирующих элементов из твердого раствора в образующиеся нитриды, а в случае лазерной обработки - наоборот, концентрация легирующих элементов в твердом растворе увеличивается в связи с частичным растворением карбидной фазы при лазерном нагреве.

В отличие от карбонитрации и лазерной обработки покрытие TiN

снижает схватываемость передней поверхности со стружкой, в результате существенно снижаются силы резания, уменьшается K_L , уменьшается длина контакта стружки с передней поверхностью, снижается мощность источника $Q_{\text{тп}}$ и мощность теплового потока в инструмент Q_p . Некоторое уменьшение отношения $Q_p/Q_{\text{тп}}$ может быть связано как с низкой теплопроводностью покрытия TiN, так и с уменьшением протяженности теплового источника ($l_{\text{п}}$).

Весьма интересен результат, полученный на резцах партий 5 и 6. По сравнению с резцами 4 резцы 6 характеризуются большими значениями F , а значит более сильным схватыванием со стружкой. Резцы 5 – наоборот, обладают более слабым схватыванием. При этом как и в случаях без покрытия отношение $Q_p/Q_{\text{тп}}$ имеет самое низкое значение на резцах с лазерной обработкой (резцы группы 6) и самое высокое – на резцах с карбонитрацией (образцы группы 5). Эти результаты, с одной стороны, подтверждают вывод об увеличении теплопроводности стали Р6М5 при карбонитрации и об уменьшении ее при лазерной обработке, с другой – эти результаты свидетельствуют о существовании температурной зависимости схватываемости покрытия TiN с обрабатываемым материалом: чем ниже температура на передней поверхности, тем меньше схватываемость.

ВЫВОДЫ

1. Карбонитрация повышает износостойкость и теплостойкость стали, а также увеличивает ее теплопроводность.
2. Лазерная обработка по оптимальному режиму повышает износостойкость и уменьшает теплопроводность стали Р6М5.
3. Карбонитрация и лазерная обработка, а также их сочетание с вакуумно-плазменным покрытием TiN существенно изменяют схватываемость передней поверхности резцов из стали Р6М5 с обрабатываемым материалом, что можно использовать в практике для целенаправленной коррекции этого важного свойства инструмента.

4.8. Лазерная обработка материалов: возможности, перспективы

В последние годы технологическое применение лазеров постоянно расширяется. Этому способствуют как высокие технико-экономические показатели разработанных лазерных технологий и оборудования, так и появление совершенно новых процессов, основанных на использовании для обработки материалов лазерного излучения. Все эти новые технологии отличаются чрезвычайно высокой производительностью, высокими качеством и точностью обработки, возможностью достижения эффектов, позволяющих придать обрабатываемым материалам, деталям и инструментам совершенно новые свойства. На сегодняшнем уровне развития лазерной техники и технологии все виды лазерной обработки можно условно объединить в следующие группы: размерная обработка материалов, упрочняющая поверхностная обработка, лазерная интенсификация механической обработки, процессы обработки с незначительным массопереносом, комбинированные процессы.

Лазерная размерная обработка. К этой группе процессов прежде всего относится прошивка прецизионных отверстий. Отверстия малых размеров (диаметром от 0,001 до 2 мм, глубиной от 0,01 до 20 мм) получают воздействием одного или нескольких импульсов лазерного излучения длительностью от 0,1 до 3 мс и энергией 0,2 – 50 Дж. Отверстия больших диаметров получают методом трепанации (обходом по контуру). Отклонения диаметральных размеров обработанных отверстий обычно лежат в пределах 10–12 % номинала, что соответствует 6 – 7 качеству. Форма отверстий может быть не только цилиндрической, но и конической, с входным и выходным конусом и т. п. Производительность прошивки отверстий составляет от нескольких отверстий в минуту до десятков тысяч отверстий в секунду в зависимости от материала и его толщины.

Лазерная обработка отверстий получила довольно широкое распространение при изготовлении деталей типа форсунок, сопел, диафрагм, приборных камней, сит, волок и т. п. Вследствие специфики фокусирования лазерного излучения серьезной проблемой становится увеличение глубины прошивки отверстий до нескольких десятков миллиметров и более, прошивка качественных отверстий в многослойных материалах с различными теплофизическими свойствами. В этом плане перспективным направлением является расширение возможностей управления формой и длительностью импульсов, условиями их подачи в зону обработки.

К размерной лазерной обработке относится также получение пазов, резов в различных материалах, чаще всего неметаллических. При микрообработке пазов, щелей их размеры лежат в пределах единиц или десятков микрометров. Наибольшее распространение лазерная обработка щелей, пазов нашла в микроэлектронике (керамические, ситалловые подложки микросхем), ювелирной промышленности (естественные алмазы, сапфиры и т. п.).

Для раскроя хрупких неметаллических материалов хорошо себя зарекомендовало лазерное скрайбирование. При этом разделение хрупкого материала происходит под влиянием термических напряжений, развивающихся по траектории лазерного воздействия (термораскалывание материала), или после приложения незначительного механического усилия по микропазу, предварительно обработанному с помощью лазерного излучения. В обоих случаях обеспечиваются очень высокие качество и производительность разделения материалов.

Одной из наиболее распространенных областей лазерной обработки является раскрой металлических и неметаллических материалов. Лазерная резка листового материала в зависимости от толщины листа и вида материала осуществляется со скоростью до 10 м/мин при ширине реза до 0,8 мм и размеров зоны термического влияния до 0,5 мм. При этом шеро-

ховатость поверхности реза достигает несколько микрон по параметру R_z . При правильном выборе режимов обработки удастся получить рез без грат (грат – излишки металла, остающиеся на кромках изделия после какого-либо процесса обработки). До недавнего времени серьезной проблемой оставалось получение качественного реза в металлических материалах с высокой теплопроводностью (медь, алюминий и их сплавы). Использование одноканального режима излучения, специальных сопел для подачи рабочего газа, адаптивных систем контроля над ходом процесса и ряда специальных технических приемов позволили выполнять резы в указанных материалах с высокой точностью и хорошим качеством.

Создание лазеров с высокой частотой следования импульсов обеспечило возможность строго дозированного поэлементного съема материала и, таким образом, выполнения операции лазерного фрезерования. Это позволило, например, в деталях из конструкционной керамики обрабатывать полости сложной формы. Повышение качества лазерного фрезерования достигается точной синхронизацией подаваемых импульсов со сканирующими перемещениями луча в соответствии с программой.

Лазерная упрочняющая обработка. Благодаря высокой локальности лазерного воздействия на материал, обеспечению больших скоростей нагрева и охлаждения материала, возможности управлять в широких пределах энергетическими и временными параметрами излучения широкое распространение получили различные виды поверхностной упрочняющей лазерной обработки материалов. Лазерное упрочнение посредством фазовых переходов позволяет создать зону термического влияния с высокими физико-механическими характеристиками. В зависимости от интенсивности лазерного излучения и характера, протекающих в зоне лазерного воздействия процессов упрочненный слой в материале может достигать толщины 1–3 мм. При использовании мощного непрерывного лазерного

излучения производительность упрочнения поверхности составляет несколько сот квадратных миллиметров в минуту.

Для упрочняющей обработки в основном используют инфракрасное излучение мощных CO_2 – лазеров, в связи, с чем серьезной проблемой является повышение эффективности поглощения излучения поверхностью металлических сплавов. Несмотря на то, что в настоящее время и разработаны различные поглощающие покрытия, тем не менее, необходим дальнейший поиск в этом направлении с тем, чтобы максимально упростить технологию предварительного нанесения покрытия, повысить его теплоустойчивость, придать ему и другие свойства, позволяющие улучшить эксплуатационные характеристики упрочненной поверхности. Не менее важен постоянный контроль поглощающей способности поверхности во время облучения с целью создания адаптивной системы управления процессом лазерного упрочнения, которая обеспечит высокое качество упрочненной поверхности.

В настоящее время успешно развиваются методы лазерного легирования и наплавки, позволяющие локально изменять состав материала, придавая необходимые эксплуатационные свойства именно тем участкам деталей, которые подвержены интенсивному износу, коррозии или другим видам воздействия.

Наряду с использованием различных порошковых композиций, характерных для плазменного, детонационного нанесения покрытий, для лазерного легирования и наплавки разрабатываются специальные составы, учитывающие специфику процесса. Для подачи легирующего (наплавочного) состава в зону лазерного воздействия используются различные способы. Один из наиболее перспективных – инъекция порошковой композиции с помощью специального питателя. Расширение его возможностей зависит от надежности работы питателя и выбора оптимальной фракции порошка.

В этом плане резервы усовершенствования способа еще далеко не исчерпаны.

Хорошие результаты дает и использование электроэрозионной легирования, плазменного или детонационного напыления в качестве способов предварительного нанесения наплавочного состава. Несмотря на определенное усложнение технологии, в этом случае обеспечивается высокое качество лазерного легирования (наплавки).

Лазерная упрочняющая обработка – высокоэффективная технология с широкими возможностями. Она нашла применение в машиностроении для повышения эксплуатационных характеристик различных деталей, благодаря чему их износостойкость и ресурс работы возросли в 1,5 – 5 раз и выше.

Лазерная интенсификация механической обработки. Наиболее распространенная технология изготовления деталей – механическая обработка – благодаря использованию лазерного излучения может значительно расширить свои возможности. Стойкость резцов, фрез, протяжек, сверл, рабочих элементов вырубных штампов и других инструментов в результате лазерного упрочнения возрастает в 2 – 6 раз. Особенно эффективен этот способ для повышения стойкости сложного дорогостоящего инструмента.

Эффективность лазерного излучения бесспорна при использовании в качестве источника локального предварительного нагрева материала перед его дальнейшим удалением режущим инструментом. При этом до 70 % снижаются силы резания, уменьшается износ инструмента.

Лазерно-механическая обработка выгодно отличается от своего аналога – плазменно-механической обработки – отсутствием шума, большей локализацией теплового воздействия, широкими возможностями управления процессом. Лазерно-механическая обработка хорошо зарекомендовала себя на операциях чернового точения заготовок большого диаметра из высоколегированных жаропрочных труднообрабатываемых сталей.

Интересные возможности открываются при использовании лазерного излучения для дробления сливной стружки в процессе сверления глубоких отверстий малого диаметра. В этом случае лазерное излучение направляется по волоконному световоду и фокусируется на стружке в зоне резания. При этом достаточно одного-двух импульсов излучения для ее перфорации и дальнейшего надлома при контакте с поверхностью просверленного отверстия.

Определенные перспективы имеет и недавно предложенный модернизированный процесс резания труднообрабатываемого материала. Сфокусированный цилиндрической оптикой в виде «режущей кромки», лазерный луч частично расплавляет корень стружки, которая вспомогательным резцом отводится от обрабатываемой поверхности.

Процессы лазерной обработки с незначительным массопереносом или без него. Малые размеры зоны лазерного воздействия, возможность управления излучением с высокой точностью сделали его незаменимым инструментом для выполнения маркировочных работ, нанесения и считывания как буквенно-цифровых символов, так и штрихового кода. Это позволяет практически полностью автоматизировать процесс маркировки и анализа маркировочной информации с использованием компьютерной техники.

Новым шагом в развитии лазерной маркировки станет разработка технологической информатики – нового направления в технологии изготовления различных видов продукции. Вся технологическая информация с помощью лазерного излучения наносится на изделие в закодированном виде, а затем считывается и анализируется, что позволяет полностью автоматизировать управление процессом изготовления детали без использования бумажных, магнитных или других носителей технологической информации.

Новым видом лазерной обработки является формирование сложно-профильных деталей из листового металлического материала. В основе технологии лежит возможность создания в листовом материале управляемых термонапряжений, которые после охлаждения материала вызывают его деформацию по заданному закону. Данный способ позволяет осуществить формирующее воздействие без пуансона и матрицы, что значительно упрощает технологию получения деталей трубчатой, волнистой, уголкового профиля и т. п.

К перспективным методам изготовления деталей следует отнести формирование трехмерных объектов из жидкого полимера или порошкового металлического материала при лазерном облучении. Эти технологические процессы основаны на быстрой реакции, большом объеме памяти современных компьютеров и возможностях с помощью лазерного излучения мгновенно изменять состояние материала, а также управлять перемещением излучения в пространстве.

4.9. Современные методы быстрого прототипирования с применением лазерного излучения

С начала 80-х годов XX столетия интенсивно развиваются методы формирования трехмерных объектов не путем удаления материала (точением, фрезерованием, электроэрозионной обработкой) или изменения формы заготовки (ковкой, штамповкой, прессовкой), а путем постепенного наращивания (добавления) материала или изменения фазового состояния вещества в заданной области пространства. На данный момент значительный прогресс достигнут в послойном формировании трехмерных объектов по их компьютерным образам. В англоязычной литературе технологии, основанные на таком подходе, называются Rapid Prototyping или Desktop Manufacturing (RP&M), что характеризует возможность создания техно-

логического цикла на ограниченном пространстве с быстрой и недорогой модификацией.

Процессы послойного синтеза, называемые также аддитивными (additive) технологиями, вышли из стадии лабораторных исследований в конце 80-х годов, а в начале 90-х годов достигли уровня коммерческого и промышленного применения. В настоящее время их успешно используют в технологиях гибких процессов, предшествующих традиционным заготовительным процессам, например при производстве формообразующей оснастки (штампов, пресс-форм, литейных форм и т. д.). Качество и сроки изготовления деталей данными методами в основном определяют конкурентоспособность промышленной продукции. Эти процессы находят применение в различных отраслях промышленности, особенно эффективны они в машиностроении, автомобиле- и самолетостроении, производстве медицинской техники (оснастки), инструментов и др. Развитие и доступность мощной вычислительной техники, способной оперировать трехмерными образами, а также результаты, достигнутые при разработке и освоении пучковых (в том числе и лазерных технологий обработки материалов, явились основой бурного развития технологий послойного изготовления трехмерных объектов практически любой формы сложности с габаритными размерами до 1 м^3 при точности не ниже 0,025 мм.

Комплекс работ по изготовлению детали методами быстрого прототипирования состоит из трех основных этапов:

- на первом этапе создается компьютерная модель будущей детали одним из следующих методов: прямым компьютерным моделированием (AutoCAD, Solid Works, Euclid и др.); методом фотограмметрии; сканированием на 3D-сканерах;
- на втором этапе, используя соответствующую установку прототипирования, по созданной компьютерной модели осуществляется выращивание прототипа будущей детали одним из существующих методов;

– на третьем этапе выращенный прототип используется как визуальная модель, как модель для изготовления металлической отливки, как технологическая деталь по своему назначению.

Требования к точности деталей, получаемых методом выращивания, являются одним из основных параметров по которым следует проводить выбор метода и установок. Важной характеристикой является получаемая на конечной детали точность, которая обусловлена применяемыми методами построения детали, материалами построения и необходимостью дальнейшей обработки. Большинство производителей в спецификации оборудования дают такие характеристики, как точность используемых механических и оптических систем, минимальную толщину. Эти параметры отражают технически достижимую точность, наряду с ними надо учитывать процессы, связанные с различными фазовыми превращениями (жидкость – твердое тело, расплав – твердое тело), так как эти процессы вносят дополнительную погрешность. Максимально достижимая точность с использованием существующих технологий $\pm 0,05$ мм, в большинстве случаев она составляет $\pm 0,1$ мм.

Некоторые материалы не устойчивы к влиянию окружающей среды и подвергаются деградации с течением времени. Это приводит к потере точности под воздействием влажности, температуры и просто времени. Все размеры, имеющие более жесткие требования по точности, должны быть обеспечены последующей механической обработкой, поэтому механические свойства выращенной детали должны обеспечивать возможность последующей обработки.

Шероховатость выращенных деталей возникает как следствие ступенчатого эффекта. Соответственно, чем тоньше слои, тем меньше шероховатость. Наименьший параметр шероховатости поверхности, получаемый на существующем оборудовании без последующей обработки, равен 1 мкм.

Для получения лучшей шероховатости поверхности применяют различные методы последующей обработки, включая ручную полировку, обработку песком и т. д. Получение максимальной шероховатости может быть ограничено структурой используемых материалов. Например, пористые материалы ограничивают получение максимальной шероховатости размером частиц. С помощью существующих технологий можно получить последующей обработкой поверхности оптического качества как на пластмассе, так и металле.

Лазер как инструмент формирования поверхности применяют в следующих методах быстрого прототипирования: LOM-, SLS-, DMD- и SLA-процессы.

LOM-процесс (Laminated Object Manufacturing) – изготовление объектов с использованием ламинирования. Принцип процесса заключается в вырезке CO₂-лазером тонких слоев из бумаги, пластика или фольги и наклейки их друг на друга в заранее заданной последовательности. Контуры сечений создаются путем управления движением луча лазера по компьютерным данным, слой за слоем.

Работа машины для лазерного ламинирования основана на точности и высокой линейной скорости резки лазерным лучом. Машина лазерного ламинирования состоит из рулонной питающей системы, рабочей платформы и управляемого компьютером лазера. Тильная поверхность бумажной, металлической (фольги) или пластмассовой полосы покрыта клеящим составом. Нагретый ролик прижимает очередной лист к стопке предварительно вырезанных листов, обеспечивая склеивание и постепенное наращивание тела модели. После вырезки первого слоя рулон перемещается и на вырезанную поверхность приклеивается новый лист, на котором производится вырезка следующего слоя. Таким образом слой за слоем формируется объемная деталь.

Техническая характеристика установки LOM-2030H

Максимальный размер детали, мм...	813 × 559 × 508
Точность изготовления детали, мм...	0,25
Мощность CO ₂ -лазера, Вт.....	50
Диаметр луча лазера, мм.....	0,203-0,254
Система позиционирования.....	позиционируемый по XY стол перемещает оптику и луч лазера
Скорость резания, мс/с.....	0,5
Листовой материал.....	бумага пластик и другие материалы, покрытые связующим веществом
Толщина материала, мм.....	0,076–0,203
Форма материала.....	рулон шириной до 711 мм и диаметром 365 мм

После формирования слоеного блока его снимают с установки, удаляют излишки материала и обрабатывают деталь до гладкой поверхности, т. е. шлифуют, полируют и, если требуется, окрашивают.

Данный метод характеризуется быстротой исполнения и полным отсутствием деформации формы изделия, однако существуют проблемы с утилизацией отходов раскроя и присоединением листов друг к другу. Точность изготовления деталей таким методом составляет 0,25 мм.

При литье по выжигаемым моделям они выступают в качестве разовых моделей, которые наформовываются и выжигаются. Так как такие модели не расширяются и не трескаются при обжиге, возможно использование традиционных методов литья. Прочность и жесткость LOM-деталей делают их удобными формами для вакуумного литья тонких пластмассовых компаудов при малых и средних объемах производства. Благодаря вы-

сокой прочности такие формы выдерживают высокие напряжения при обработке.

При литье в песчаные формы LOM-детали используют для производства моделей или стержневых ящиков. Благодаря применению недорогих LOM-материалов изготовление модельно-литьевой оснастки и отливок становится простым и быстро окупаемым.

Геометрическая стабильность LOM-моделей и достаточная точность делают возможным их использование для литья гипсовых форм.

SLS (Selective Laser Sintering) – технология селективного лазерного спекания – это процесс, при котором изделия создаются из порошковых материалов за счет эффекта спекания при помощи энергии лазерного луча. Попадая на тонкий слой порошка, лазерный луч спекает его частицы и формирует твердую массу в соответствие с геометрией детали. В качестве материалов используют полиамид, полистирол, песок и порошки некоторых металлов. Эти материалы наиболее дешевые из всех, которые применяют в методах быстрого прототипирования. К недостаткам данного метода относится тот факт, что модели боятся влаги и их необходимо специально обрабатывать. Детали, полученные данным методом, имеют невысокую точность (13 – 14 квалитет).

SLS-процесс происходит в рабочей камере, заполненной азотом, используемым для защиты порошка от окисления. Перед началом процесса обрабатываемый порошок подогревается до температур, несколько ниже температур плавления легкоплавкой фазы. В зону обработки поступает необходимая доза порошка из системы снабжения и прокатывается валиком. Лазерное излучение подается на сканатор, который по программе, синтезирующей сечения модели, перемещается по поверхности порошка. Под воздействием излучения CO₂-лазера порошок спекается по обрабатываемому контуру. На следующей стадии новый слой порошка подается из системы снабжения, разравнивается и процесс повторяется.

Одним из преимуществ SLS-процесса является отсутствие так называемых поддержек при построении модели, поскольку построение ведется в однородной массе. После построения модели достаточно лишь высыпать остаточный порошок из внутренних полостей и модель готова к дальнейшей работе.

Модели из полистирола используют для литья по выжигаемым моделям. После построения модель весьма хрупкая и требует бережного обращения. Для придания модели большей прочности ее пропитывают расплавленным парафином (инфильтрация), после чего модель готова для заливки формовочной смесью и последующих технологических операций.

Другим материалом для построения моделей является полиамид. Его применяют для создания функциональных моделей, т. е. моделей, способных выполнить свою функцию как деталь машины или устройства, например, детали облицовки салона автомобиля или декоративные элементы кузова. В некоторых случаях полиамид пригоден для исследовательских работ по определению формы какой-нибудь ненагруженной детали, например впускного трубопровода автомобильного двигателя, а также для изготовления моделей с целью проверки собираемости сложного узла или проведения безмоторных испытаний. Например, головка цилиндров, изготовленная из полиамида, может быть использована при проведении газодинамических исследований впускных и выпускных каналов и камеры сгорания.

Большие технологические возможности открывает использование песка в качестве рабочего материала. Песчаные стержни сложной формы могут быть изготовлены непосредственно в машине без применения традиционной стержневой оснастки. Размеры рабочей зоны машины 320×380×460 (высота) мм. С помощью SLS-технологии можно изготовить пористую деталь из стального порошка. После пропитки пористой сталь-

ной детали бронзой ее можно использовать как функциональный прототип или формообразующую оснастку.

SLA (Stereo Lithography Apparatus) – лазерная стереолитография. Этот процесс предполагает изготовление твердых копий моделей посредством воздействия лазерного излучения на жидкие фоточувствительные полимерные композиции (ЖФПК). Основой лазерной стереолитографии является локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход жидкость – твердое тело) в результате фотоинициированной в заданном объеме полимеризации. Суть процесса состоит в создании с помощью инициирующего лазерного излучения в жидкой реакционно-способной среде активных центров (радикалов, ионов, активированных комплексов), которые, взаимодействуя с молекулами полимера, инициируют рост полимерных цепей, т. е. процесс полимеризации. Следствием полимеризации является изменение фазового состояния среды – в облученной области образуется твердый полимер. Так как активные центры появляются только в облученной области, то и полимеризация протекает преимущественно в этой области, т. е. достигается пространственная селективность фотоинициирующей полимеризации излучения лазера определенного спектрального диапазона.

С помощью этого метода можно изготавливать детали любой сложности с точностью до 25 мкм. За счет возможности вторичного использования непolyмеризованного ЖФПК метод достаточно экономичен.

В качестве исходного материала для модели применяют ЖФПК различного состава в зависимости от требуемых свойств и длины волны излучения лазера. Наиболее эффективно полимеризация проходит под воздействием ультрафиолетового излучения с длиной волны 325 нм. Однако при добавлении в стандартные ЖФПК красителей, поглощающих свет с высоким квантовым выходом возбуждения возможна эффективная полимеризация с видимым излучением с длиной волны 562 нм.

Исходя из составов ЖФПК выбирают соответствующие лазеры для облучения. Наиболее широко для лазерной стереолитографии применяют лазеры ультрафиолетового диапазона с длиной волны от 275 до 400 нм. Это связано с тем, что ЖФПК в данном диапазоне спектра наиболее распространены и обладают наибольшей чувствительностью. В большинстве установок в настоящее время применяют твердотельные лазеры с генерацией 3-й гармоники на длине волны 325 нм. Установки такого типа работают с ЖФПК, эффективно поглощающими ультрафиолетовое излучение. Также используются твердотельные лазеры с генерацией 2-й гармоники (532 нм) с диодной накачкой. Преимущества лазеров этого типа состоят в простоте конструкции и расходов на обслуживание, КПД таких лазеров достигает нескольких десятков процентов. В связи с меньшей энергией поглощения ЖФПК излучения на длине волны 532 нм возможно снижение толщины полимеризующихся слоев до 150 нм. При работе в непрерывном режиме средняя мощность таких лазеров составляет 2–10 Вт.

Функционально модель, выращенная SLS-методом, является лишь макетом изделия и выдерживает ограниченное число циклов изготовления литейных форм на их основе. Готовые модели выдерживают нагрев до 100 °С без изменений формы и размеров. Параметр шероховатости поверхности без какой-либо обработки не превышает 100 мкм. Отвержденный фотополимер легко полируется. Прочность готовых деталей сравнима с прочностью изделий из отвержденных эпоксидных смол. Основным фактором, определяющим точность метода лазерной стереолитографии, является изменение во времени объема (или усадка) и формы подвергнутой лазерному облучению области ЖФПК в результате полимеризации. Это изменение вызывает появление внутренних напряжений, приводящих к деформации объектов как на этапе их изготовления этим методом, так и при их постобработке (деполимеризации излучением ртутных или люминесцентных ламп).

Для компенсации усадки предусматривают расчетные допуски, заложенные в программу, а также специальные схемы полимеризации.

Полученные методом лазерной стереолитографии изделия применяют в следующих областях производства:

- формообразующая оснастка для различных видов точного литья – элементов штампов, пресс-форм и других функциональных узлов;
- конструкторские и дизайнерские прототипы при создании макетов изделий и сборок с целью максимального ускорения процесса конструирования и изготовления экспериментальных и опытных образцов;
- мастер-модели для изготовления инструментов методом электроэрозионной обработки с применением гальванопластики;
- воспроизведение объектов по данным рентгеновской, акустической или ЯМР-томографии или фотограмметрии для медицины, криминалистики, археологии. Например, методом томографии создается трехмерный образ подлежащего восстановлению органа, из него выделяется форма необходимого протеза и методом стереолитографии выращивается индивидуальный биосовместимый имплантат.

Лазерную фотополимеризацию, применяемую для создания 3D-полимерных микроструктур с микронным разрешением, называют микростереолитографией. Этот процесс заключается в отверждении точек лазерным лучом, узко сфокусированным внутри жидкого фотополимера. В данном методе не используется послойное отверждение при выращивании 3D-микроструктур, поэтому удастся избежать проблем, характерных для послойных технологий, применяемых при получении микрообъектов. В настоящее время разработаны микростереолитографические установки с Аг-лазером, обеспечивающие разрешение 1–2 мкм. На этих установках получены микротрубки с соотношением 16 (длина/диаметр) и реальные микроканалы и микроконусы на поверхности кремниевой подложки. Микростереолитография позволяет создавать подвижные микромеханизмы с

диаметром ротатора 24 мкм и диаметром вала 10 мкм. Общее время выращивания всего 3 мин.

Метод объемного формообразования деталей лазерным переплавом металлических порошков разработан на основе процесса лазерной наплавки с переплавом присадочного металлического порошка в зоне воздействия лазерного луча. Он позволяет получать пространственные фигуры за счет последовательного нанесения слоев по сложным криволинейным траекториям при минимальном термическом воздействии на основной металл. В отличие от традиционных технологий металлообработки, удаляющих материал, этот метод является уникальным аддитивным процессом, обеспечивающим свободу выбора материала и позволяющим точно контролировать место его нанесения для создания конечного продукта. Получающийся в результате материал имеет механические и физические характеристики, идентичные свойствам такого же материала, полученного традиционной ковкой или литьем. Также имеется возможность получения слоистых изделий, например внутри стальной детали можно создать каналы из меди или алюминия. С помощью данного метода можно изготавливать как новые детали, так и формировать на поверхности изделия объемные элементы, например при ремонте. Благодаря широкому выбору присадок можно получать детали, имеющие высокие механические и служебные свойства. Этот процесс чрезвычайно эффективен для ремонта деталей и оснастки в тех случаях, когда применение традиционных технологий может привести к ухудшению свойств основного металла в результате воздействия высоких температур.

Применяют два основных способа лазерного объемного формирования изделия: SLM (Selective Laser Melting) – выборочная лазерная наплавка и DMD (Direct Metal Deposition) – процесс прямого нанесения металлов.

Метод SLM состоит в том, что перед наплавкой каждого слоя на поверхность обработки наносится тонкий слой порошка. Затем лазер избира-

тельно, согласно заложенной программе, проплавляет необходимые участки. Затем снова наносится порошок и осуществляется оплавление. Так, слой за слоем формируется деталь.

Метод SLM характеризуется высокой гибкостью, что позволяет создавать детали любой геометрии и из любого материала, включая керамику, металлы, полимеры и композиты. Более того, появляется возможность локального изменения состава материала, микроструктуры и текстуры поверхности.

К основным преимуществам SLM-технологии относятся следующие:

- использование металла и керамики почти любого типа (цинк, бронзу, коррозионно-стойкую сталь, титан, хром, кобальт, карбид кремния и оксид алюминия);
- экономичность, так как финишные операции механической или термической обработки сводятся до минимума;
- высокая точность, отсутствие деформаций;
- высокая производительность;
- полная автоматизация процесса.

Для осуществления этого процесса разработаны специальные установки. Одна из таких установок MPC Analyzer производства Германии имеет следующие технические характеристики: скорость выращивания (для стали) 5 см³/ч; минимальная толщина слоя 50 мкм; максимальный объем порошка 15 дм³ (для стали); максимальные размеры детали 250×250×240 (z) мм; лазер 100 W/TEM00/IR/ диаметром 0,03 мм; источник питания – 240 В (одна фаза/50/60 Гц/3,0 кВ·А); расход аргона 3 л/мин; габаритные размеры установки 1600 × 800 × 2000 мм; масса установки 500 кг.

DMD-процесс предусматривает непосредственную подачу порошка в зону действия лазерного луча, за счет оплавления которого и формируется

изготавливаемое изделие. Отличие процесса состоит в одновременном нанесении и оплавлении порошка, осуществляемого послойно по заданному для каждого слоя контуру. Особенностью процесса является соосная подача лазерного излучения, присадочного порошка и защитного газа в зону обработки. В результате на поверхность твердого металла из сопла попадает уже расплавленный или сильно подогретый порошок. Эта особенность позволяет надежно соединять слои и формировать целостную металлическую деталь. За счет высоких скоростей охлаждения наплавленный металл может претерпевать закалку, что важно при изготовлении форм из инструментальных сталей, где требуется высокая твердость. Нерасплавленный металлический порошок используется повторно, поэтому процесс можно считать безотходным.

Состав оборудования для DMD-процесса зависит от его назначения и целей производителя. В принципе установка по виду напоминает большой обрабатывающий центр. Эта система использует мощные технологические CO₂-лазеры (3 – 5 кВт). Контроллер располагается у обрабатывающих центров. Зажимы и приспособления, характерные для механообработки, отсутствуют. Одним из основных элементов оборудования является специальная наплавочная головка, которая находится на месте вертикального шпинделя; она соседствует с оптическим устройством обратной связи, содержащим камеру наблюдения. Именно это устройство отличает DMD-технологию от других, так как при построении объекта создаются сотни слоев, и обратная связь крайне важна для получения высокого качества.

Диапазон перемещения обрабатываемой детали по осям X, Y и Z составляет 61 см. Установка оснащена CO₂-лазером фирмы Trumpf мощностью 2,4 кВт. Скорость нанесения слоя с использованием порошка на основе железа составляет примерно 4 дюйм³/ч, ширина наносимого слоя – 0,04 дюйма, а толщина – 0,0098 дюйма.

4.10. Применение лазеров в механической обработке

Создание лазеров большой мощности с непрерывной и импульсно-периодической генерацией излучения позволило применить их в процессах обработки с удалением обрабатываемого материала. Можно выделить два основных направления применения лазеров в механической обработке: использование лазера как источника дополнительного или предварительного нагрева обрабатываемого материала в процессах механической обработки – лазерно-механическая обработка (ЛМО); использование лазера в качестве инструмента, непосредственно удаляющего обрабатываемый материал. Сюда можно отнести известные процессы лазерной резки, прошивки отверстий, скрайбирования, а также новые процессы – лазерное точение (ЛТ) и лазерное фрезерование (ЛФ). При ЛТ и ЛФ сфокусированный лазерный луч формирует канавку на обрабатываемой поверхности в результате испарения материала. Перемещение лазерного луча по поверхности с некоторым перекрытием обеспечивает равномерное удаление материала и осуществление размерной обработки таких материалов, как керамика, карбиды, нитриды.

Одним из требований механической обработки с нагревом является максимальное снижение сил резания при поддержании температуры в контакте инструмент – деталь на некотором оптимальном уровне. Температура в контакте складывается из температуры Θ_n дополнительного нагрева и температуры $\Delta\Theta_d$, обусловленной процессами деформации и трения в зоне стружкообразования. Сфокусированный лазерный луч позволяет нагревать обрабатываемый материал в зоне стружкообразования до температур более 1000 К, значительно снижая силы резания и величину $\Delta\Theta_d$, в то время как у контактной поверхности температура нагрева 400–800 К. Таким образом, создаются условия для повышения производительности обработки при за-

данной стойкости инструмента или повышения стойкости инструмента при заданной производительности.

При ЛМО улучшается качество обработки: снижаются шероховатость обработанной поверхности, глубина и степень наклепа, устраняются сколы и микротрещины. Появляется возможность осуществлять прерывистое резание материалов с повышенными прочностными характеристиками, точение нежестких или тонкостенных изделий, чистовую обработку материалов, для которых нежелательны структурные и фазовые изменения ниже линии среза.

Лазерные технологические процессы имеют следующие дополнительные преимущества: универсальность применения для широкого класса материалов, возможность подвода излучения в труднодоступные места, простота управления пространственными и энергетическими характеристиками лазерного луча, возможность автоматизации процессов.

Лазерно-механическая обработка

Дополнительный лазерный нагрев дает эффект при внешнем продольном и торцовом точении, растачивании отверстий, сверлении, нарезании резьб, обкатке роликом, фрезеровании, строгании.

На рис. 4.4 показана схема установки для ЛМО (точения), применявшейся в экспериментах. Использовали CO_2 -лазеры ЛТ1 «Кардамон» и модернизированный ИАГ-лазер ЛТН-103 мощностью 400 Вт. Установка создана на базе токарного станка СУ-500 (Болгария). Излучение фокусируется на расстоянии $l \geq 0,5$ мм от режущей кромки. Эксперимент показал, что оптимальное значение $l \approx \nu z^2 / (2a)$ (ν – скорость резания; z – глубина съема в металле; a – температуропроводность). При меньших l материал не успевает прогреться, при больших l – успевает остыть до подхода к резцу.

Конструкция оптической системы позволяет стабилизировать положение фокального пятна относительно резца при произвольных перемещениях суппортов и, используя пьезопривод зеркала 4, осуществлять скани-

рование фокального пятна по поверхности резания. Наведение излучения в место обработки и юстировка оптической системы осуществлялись с помощью видимого излучения на длине $\lambda = 0,63$ мкм He-Ne-лазера ЛГ-78, оптическая ось которого совмещалась с оптической осью инфракрасного лазера зеркалами 2 и 3.

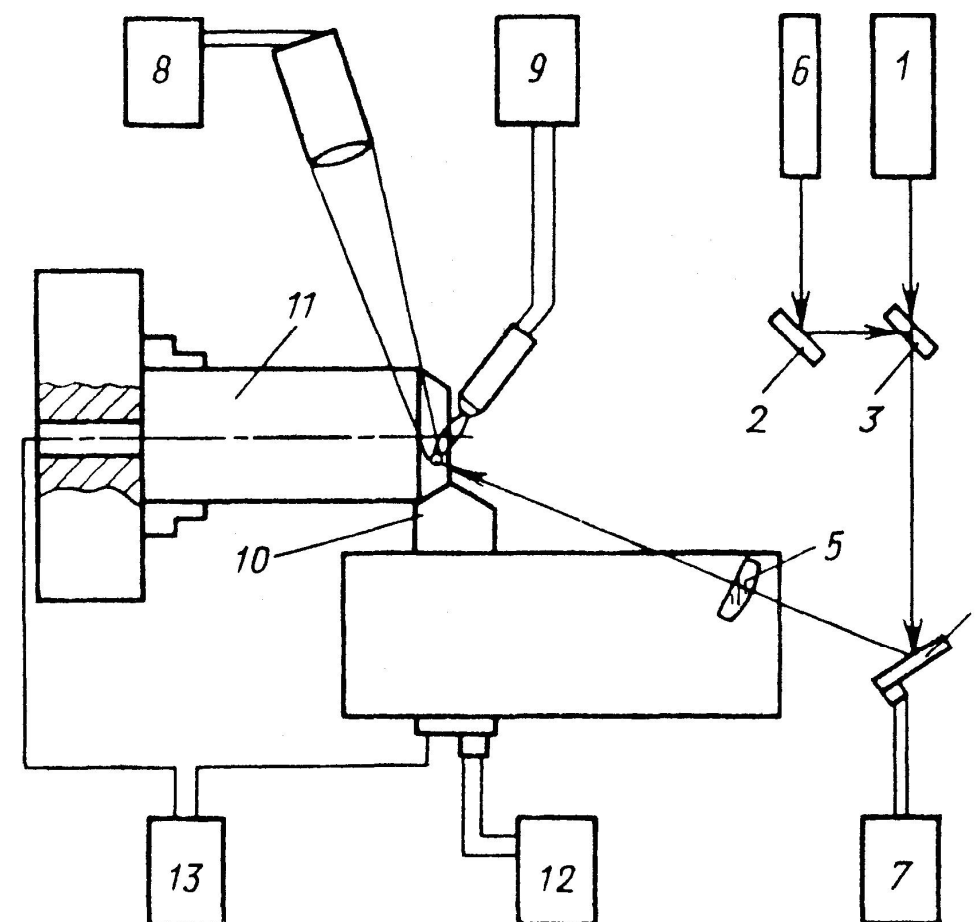


Рис.4.3. Схема установки для ЛМО (точение):

- 1 – CO_2 -лазер; 2, 3, 4 – поворотные зеркала; 5 – фокусирующая линза;
6 – He-Ne-лазер; 7 – пьезопривод; 8 – пирометр; 9 – плазмотрон; 10 – резец; 11 – деталь; 12 – измеритель акустических сигналов ИАС-4;
13 – осциллограф К-121

Для фокусировки излучения использовали линзы 5 из KCl , а также металлооптические системы: сферическое зеркало, комбинации плоского и

сферических зеркал, внеосевой телескоп со скомпенсированными абберациями. В большинстве случаев фокальное пятно на детали имеет эллиптическую форму.

Конфигурация температурного поля в этом случае определяется ориентацией эллипса относительно направления движения. При ориентации большой оси эллипса параллельно направлению движения образуется узкая и глубокая зона нагрева. Если большая ось эллипса перпендикулярна к направлению движения, образуется широкая зона нагрева маленькой глубины. Результаты расчетов и экспериментов показывают, что максимальная температура в зоне нагрева в первом случае в 4 раза выше, чем во втором. Выбор той или другой ориентации определяется схемой нагрева и размерами срезаемого слоя. Так, при нагреве со стороны обрабатываемой поверхности и больших величинах подачи предпочтительно выбирать первый вариант, а при нагреве со стороны поверхности резания с большими глубинами резания и маленькой подачей – второй. Если размеры плеча резания существенно превышают размеры фокального пятна, то характер износа резца зависит от положения фокального пятна на плече резания. Для получения максимальной стойкости резца требуется обеспечить нагрев по всей ширине плеча резания. В наших экспериментах это достигалось сканированием фокального пятна.

Основным недостатком лазерного нагрева является его низкая эффективность, обусловленная низкой поглощательной способностью ($A \approx 10 \dots 20 \%$) металлов на длине волны CO_2 -лазера $\lambda = 10,6$ мкм. Существует ряд подходов к решению данной проблемы: применение поглощающих покрытий; использование лазера с короткой длиной волны; предварительный нагрев или окисление; использование отраженного от детали излучения. Исследования показали, что для эффективного применения поглощающих покрытий при ЛМО необходимо выполнение следующих требований:

- 1) нанесение покрытия и удаление его в процессе ЛМО;
- 2) мелкодисперсность частиц покрытия для обеспечения устойчивого истечения струи;
- 3) локальность нанесения покрытия (на плечо резания);
- 4) быстрое сцепление с обрабатываемым материалом, так как воздействие излучения осуществляется в течение времени $\tau = 10^{-1} - 10^{-2}$ с;
- 5) хорошая тепловая и лучевая стойкость, а также минимальное испытание (приводит к экранированию луча в парах);
- 6) высокая поглощающая способность на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм;
- 7) инертность по отношению к обрабатываемому материалу;
- 8) минимальное абразивное воздействие на резец.

Лучшие результаты получены с покрытием K_2SiO_3 , наносимым струйным методом на плечо резания в процессе обработки.

Выполнение указанных выше требований – достаточно сложная задача, поэтому в ходе работы в целях повышения эффективности нагрева применяли другие методы.

Использовали излучение с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм ($A \approx 40 \%$) для таких металлов, как вольфрам, молибден, титан. Отраженное от детали излучение концентрировалось в зоне нагрева сферическим зеркалом, установленным на резце. Как показали результаты предварительных экспериментов, при ЛМО вольфрама, молибдена, титана доля поглощенной мощности $A \approx 60 \dots 65\%$, и удастся заменить мощный CO_2 -лазер ЛТ-1 лазером ЛТН-103 при небольших сечениях среза.

Использовали малогабаритный плазмотрон 9 мощностью ≈ 1 кВт и диаметром плазменной дуги $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Пятно лазерного нагрева служило анодным пятном плазменной дуги, что, с одной стороны, повышало поглощение лазерного излучения за счет окисления, нагрева детали, с другой – обеспечивало более высокую локальность плазменного нагрева и стабильность положения дуги относительно резца. Ближе чем на 4 мм подвес-

ти дугу к резцу в экспериментах не удавалось, так как периферийная часть нагретого газового столба попадала на резец. Для ЛМО использовали резцы с напаянными пластинами из сплавов ВК8, ВК6-ОМ, нитрида бора, гексанида Р. При ЛМО контролировали основные параметры процесса. Температуру в центре пятна нагрева измеряли пирометром ПФМ-315, температуру в контакте резец – деталь – методом естественной термопары, силы резания – динамометром УДМ-100, износ резца – методом акустической эмиссии (АЭ) с помощью измерителя ИАС-4 акустических сигналов, амплитуду вибраций – прибором Balantron-2003.

После ЛМО контролировали: шероховатость обработанной поверхности, глубину и степень наклепа, наличие сколов, микротрещин, структурных и фазовых превращений на обработанной поверхности. Сопоставление результатов металлографического анализа с характеристиками сигнала АЭ показало, что задача контроля и поддержания (за счет изменения параметров нагрева) на оптимальном уровне качества обработки успешно может быть решена методами АЭ.

Физические явления, сопровождающие ЛМО

Процесс ЛМО сопровождается рядом физических явлений: нагревом и охлаждением материала, структурными и фазовыми превращениями; пластической деформацией, разрушением, трением, генерацией волн напряжений, электронной эмиссией, образованием плазмы над поверхностью материала. Все эти явления взаимосвязаны и определяют как протекание процесса ЛМО, так и его результат – производительность и качество обработки.

На основании наших экспериментов и литературных данных можно выделить ряд явлений, оказывающих наибольшее влияние на процесс ЛМО различных материалов.

Температурное разупрочнение материала

Снижение прочностных характеристик обрабатываемого материала – одно из основных явлений, определяющих улучшение обрабатываемости материала, особенно высокопрочных, структурно-стабильных металлов (например, вольфрама, молибдена). Изменение прочности металлов и сплавов в зависимости от температуры характеризуется относительным временным сопротивлением $S = \sigma_b(\Theta) / \sigma_b$, где $\sigma_b(\Theta)$ и σ_b – соответственно временное сопротивление при температуре Θ и нормальной температуре.

Предлагается зависимость 4.2:

$$S = \exp \left[\tau_\phi - m_o \left(\frac{\Theta}{\Theta_{пл}} \right)^x \right], \quad (4.2)$$

где m_o , x – численные коэффициенты; $\Theta_{пл}$ – температура плавления.

Результаты расчетов с использованием выражения (4.2) для ЛМО вольфрама и молибдена показывают, что при мощности лазера 2,5 кВт ($A \approx 10\%$) наблюдается снижение S в 2 раза на глубине $z \approx 10^{-4}$ м, т. е. максимальный эффект можно получить на операциях чистовой и получистовой обработки. При чистовом точении вольфрама и молибдена достигалось снижение составляющей P_z силы резания на 45–56 %, повышение производительности обработки – соответственно в 6,4 и 3,6 раза.

Температурная зависимость напряжения сдвига τ_ϕ для сплава Inconel-718 носит отличный от зависимости (4.2) характер. До температуры 650 °С $\tau_\phi = \text{const}$; выше 650 °С – имеет место резкое снижение напряжения сдвига, что объясняется изменением взаимодействия между дислокациями. Лазерно-механическая обработка сплава Inconel-718 показала, что имеет место снижение P_z на 40%, повышение производительности точения на 33 %. Для жаропрочных деформируемых никелевых и титановых сплавов при некоторой температуре наблюдается так называемый «провал пластичности», характеризуемый резким снижением характеристик пластичности.

Установлено, что при ЛМО сплава ВТ-22 температура резания, соответствующая максимуму производительности точения, с точностью $\approx 2\%$ совпадает с температурой «провала пластичности». Снижение прочностных характеристик сплава дало возможность повысить производительность чернового и чистового точения в 4–6 раз за счет увеличения подачи.

Пластификация материала

При чистовой механической обработке таких материалов, как вольфрам, молибден, хром, гидрид циркония, чугун, процесс стружкообразования определяется явлениями хрупкого отрыва, обусловленными периодическим процессом развития опережающей трещины. На обработанной поверхности образуются вырывы и микротрещины. Предварительный нагрев срезаемого слоя выше температуры хрупко-пластического перехода позволяет изменить процесс стружкообразования. Разрушение материала происходит путем развития пластической деформации до некоторого критического уровня. При температуре подогрева выше $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ для молибдена и $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ для вольфрама образуется сливная стружка. На поверхности образуются ровные канавки точения без вырывов и сетки микротрещин. Шероховатость обработанной поверхности снижается с $R_z=20\text{--}40$ до $R_a=1,5\text{--}5,5$ мкм. Нагрев гидрида циркония выше $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ устраняет сколы материала при заходе резца в деталь и крупные вырывы на поверхности, снижает глубину и число микротрещин.

Термопластические деформации материала

Локальный лазерный нагрев вызывает накопление термопластических деформаций в поверхностном слое вязких с высоким деформационным упрочнением материалов. Микротвердость обработанных лазером образцов повышается на 55% на глубине $\approx 0,2$ мм, что соответствует увеличению пластической деформации (по диаграмме растяжения) на 15% . Расчет на примере никелевого сплава ХН70ВМТЮФ (ЭИ826) показал, что локальная пластическая деформация металла в зоне резания при внедрении режущей

кромки непосредственно под термоупрочненный слой приводит к снижению затрат на пластическое деформирование на 20% по сравнению с однородным упрочнением. В экспериментах наблюдалось снижение тангенциальной составляющей силы резания на 30% . Для уменьшения влияния температурного разупрочнения пятно нагрева располагалось на расстоянии $l=20$ мм от резца.

Структурные и фазовые изменения материала

Под действием лазерного излучения в ряде обрабатываемых материалов протекают структурные и фазовые изменения, влияющие на характеристики обрабатываемости. Так, на углеродистых сталях в зависимости от исходного состояния может осуществляться закалка или отжиг. Лазерная закалка стали 1090 в процессе ЛМО приводит к тому, что силы резания возрастают в 2 раза. Однако при этом значительно улучшается качество обработки, глубина канавок точения снижается с $8,6$ до $4,3$ мкм. Эксперименты демонстрируют особенности ЛМО стали, предварительно закаленной до 62HRC. Лазерный нагрев осуществлялся на расстояниях $l=3; 5; 8$ мм от режущей кромки. С ростом мощности нагрева до 1200 Вт и увеличением расстояния l наблюдалось снижение сил резания, образование непрерывной сливной стружки, улучшение качества обработки. Это объясняется превращением мартенсита в аустенит под действием лазерного излучения. При $l=3$ и 5 мм фазовые превращения, по-видимому, не успевают произойти и наблюдается незначительное снижение P_z с 200 до 150 Н. При $l=8$ мм P_z падает до 40 Н.

Предварительный лазерный отжиг керамических материалов, например Si_3N_4 , SiC , за счет изменения прочностных характеристик удаляемого слоя позволил повысить стойкость алмазного инструмента и производительность обработки. Наши эксперименты на ZrC , SiC показывают, что снижение прочностных характеристик связано с изменением структуры

поверхностного слоя. Наблюдалось повышение стойкости резцов из сверхтвердых материалов в 1,7 – 2,2 раза.

Лазерный переплав обрабатываемого материала как предварительно, так и в процессе ЛМО также может служить улучшению обрабатываемости. Многие материалы содержат твердые включения большого размера, которые интенсифицируют абразивный износ режущего инструмента. При плавлении такие примеси растворяются. Из-за большой скорости охлаждения при лазерном расплаве в процессе кристаллизации размер примесных включений значительно уменьшается, и их влияние на износ резца становится не столь большим. Результаты металлографических исследований зон переплава сплава Udimet-700 позволяет предположить, что этот фактор способствует повышению стойкости инструмента при точении указанного сплава с лазерным нагревом.

При точении алюминиевых сплавов, содержащих кремния больше 60 %, из-за высокой прочности и твердости зерна материала разрушение носит преимущественно хрупкий характер. На обработанной поверхности образуются крупные сколы и вырывы. Повышенное содержание кремния интенсифицирует износ вершины резца, и, как следствие, не удается выдержать форму обработанной поверхности: отклонение от прямолинейности поверхности превышает 0,5 мм на длине 100 мм. Лазерный нагрев срезаемого слоя до температуры выше температуры плавления эвтектики $T=577\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к плавлению эвтектики на границах зерен сплава. В результате сдвиг и отделение стружки происходит преимущественно по границам зерен; исключается вырыв объемов материала больше размера зерна; на 38 % снижаются силы резания, удельные контактные нагрузки на резец. Повышение стойкости резца дало возможность получить отклонение от прямолинейности обработанной поверхности 0,036–0,060 мм на длине 100 мм.

Создание дефектов сплошности

Снижение силовых характеристик процесса механической обработки возможно также за счет создания дефектов сплошности в срезаемом слое, например образования термотрещин, удаления путем испарения части срезаемого слоя.

В процессе ЛМО гидроксида циркония при мощности лазера $\sim 100\text{ Вт}$ образуются испаренный кратер и микротрещины на обрабатываемой поверхности. Силы резания снижаются на 70 – 75 %. Существует оптимальный диапазон мощностей излучения, обеспечивающий улучшение качества обработки. При $N < 50\text{ Вт}$ для глубины среза $\approx 0,2\text{ мм}$ прогрев материала недостаточен и процесс ЛМО практически не отличается от обычной обработки. При $N > 220\text{ Вт}$ трещины, вызванные лазерным нагревом, выходят за пределы срезаемого слоя.

Известны эксперименты, в которых Nd:YAG – лазер с частотой следования 400 импульсов / с использовали для предварительного создания отверстий в срезаемом слое. Энергия импульса 0,31 Дж позволяла выполнять в сплаве Ti-6Al-4V отверстия глубиной до 0,5 мм. При скорости резания $v = 0,32\text{ м/с}$ расстояние между отверстиями было 0,8 мм. При глубине резания $t = 0,5\text{ мм}$ наблюдалось снижение сил резания на 30 – 45 %, при $t = 1\text{ мм}$ – на 20 %.

Изменение механизма стружкообразования

Выполнение лазером отверстий, параллельных режущей кромке, в непосредственной близости от нее, или подплавление обрабатываемого материала в корне стружки со стороны задней поверхности инструмента изменяет механизм стружкообразования. В отличие от обычного резания в процессе стружкообразования происходит не последовательный сдвиг материала, а «отгибание», точнее отрывание его. В результате работа, необходимая для удаления материала, а следовательно, и силы резания снижаются приблизительно на порядок.

4.11. Лазерная технология обработки материалов

Лазерная обработка материалов подразумевает использование лазера в качестве инструмента воздействия на вещества и материалы с целью инициирования химических реакции, изменения свойств, локального разрушения и т. д. В общем виде ее можно разделить на лазерные макро- и микротехнологию. Лазерная обработка материалов (резка, сварка, термоупрочнение, перфорация, маркировка и т. д.) широко используется на предприятиях для решения практических производственных задач. Главное преимущество такой обработки связано с возможностью создания большой плотности энергии в малом пятне фокусировки излучения на поверхности образца. Это обеспечивает высокое качество технологического процесса при малой зоне термического влияния.

Учитывая высокую стоимость лазерного оборудования по сравнению с альтернативными видами техники, лазерные технологии необходимо применять там, где требуется повышенное качество обработки, а дополнительные затраты являются приемлемыми и оправданными. В настоящее время общее число лазеров для обработки материалов, работающих в мировой промышленности (мировой парк), оценивается на уровне более 30 тыс. единиц. В отечественной промышленности парк технологических СО₂-лазеров (мощность примерно 1 кВт) составляет 700 единиц; парк маломощных СО-лазеров и твердотельных лазеров, используемых в электронной, приборостроительной и оборонной промышленности, составляет около 2 тыс. единиц. Мировой парк технологических лазеров по видам обработки распределяется следующим образом: резка – 31 %; маркировка – 21; сварка – 19; скрайбирование и подгонка – 14; перфорация – 4; поверхностная обработка – 2; прочие виды обработки – 9 %. Предельная достигнутая толщина материала (сталь) при резке составляет около 80 мм и при сварке около 40 мм.

Технология лазерной резки более распространена среди других видов лазерной обработки: в зависимости от региона мира и отрасли промышленности ее доля составляет 40 – 80 %. Этот вид лазерной обработки опережает в своем развитии традиционные виды разделки, раскроя, прецизионной резки и т. п. в силу своей большой гибкости, адаптируемости, отсутствия механических усилий при обработке, высокой производительности и лучшего качества реза. Применение лазерной резки по группам промышленности следующее: машиностроение – 40 %, производство потребительских товаров (целлюлозно-бумажная и текстильная промышленности, полиграфия и пр.) – 31%; производство бытовых материалов (нефтедобывающая, горнодобывающая, химическая промышленности) – 18%; пищевая и фармацевтическая промышленности – 11 %. По некоторым отраслям применение лазерной резки распределяется следующим образом: автомобильная промышленность – 40 %; строительство – 5%; электромашиностроение – 9%; судостроение – 2%; аэрокосмическая промышленность – 2%; металлургия – 2%; точное машиностроение – 4%.

В настоящее время помимо сталей лазерная резка все чаще применяется для алюминиевых сплавов, пластиков, композитов, керамики, минералов. Наиболее часто лазерная резка используется при диапазоне толщин 0,5–10 мм, в том числе в автомобилестроении 0,5–3 мм, в электротехнике 0,5–6 мм. При обработке деталей сложной формы лазерная резка лидирует среди других технологий на предприятиях авиа-, судо- и автомобилестроения. Лазерная резка металлов широко используется на следующих предприятиях: ПО «Вымпел» (г. Рыбинск); Уралхиммаш; ПО «Кировский завод»; МСПО «Красный пролетарий»; Харьковский завод им. Малышева; ПО «АвтоЗИЛ». Лазерная резка неметаллов применяется на «Томскрезинобуви» «Иановской швейной фабрике» и др. Для реализации процесса лазерной резки требуются: большая память системы компьютерного управ-

ления (не менее 1,6 Мбайт), быстрая перенастройка оборудования на новый материал или другую форму детали, повышенная транспортабельность оборудования, надежность, малые эксплуатационные затраты.

Лазерная поверхностная термообработка изделий позволяет исключить последующий отпуск что невозможно при объемной закалке. Наиболее эффективной является лазерная обработка инструмента, повышающая его стойкость в 1,5 – 2 раза. Процесс закалки инструмента на импульсных лазерных установках успешно используется на предприятиях: АвтоЗИЛ, АЗЛК, ММЗ ПО «Салют». Лазерная закалка деталей машин осуществляется также на УралАЗе, МАЗе, КрАЗе, ГАЗе, БелАЗе, ПО «Кировский завод», Чебоксарском тракторном заводе и других предприятиях.

Лазерная перфорация наиболее эффективна при получении отверстий малого диаметра (менее 1 мм), например, в часовых камнях из рубина, в фильтрах тонкой очистки. Лазерная сварка вместе с электронно-лучевой и плазменной составляет примерно 10 % объема сварных работ в промышленных западных странах. Этот процесс очень перспективен в серийном и крупносерийном производстве с использованием робототехники. Успешно применяются лазеры-роботы для сварки деталей кузова непосредственно после лазерного раскроя листов и последующей штамповки. Это позволяет сэкономить металл и, кроме того, резко повысить коррозионную стойкость и водонепроницаемость сварных швов в кузовах. Освоен экономически выгодный процесс лазерной сварки оцинкованного стального листа. Эффективно используется лазерная сварка тонкостенных изделий, деталей приборов, кинескопов, лезвий бритв, аэрозольных баллончиков, корпусов редукторов. В поточном производстве для сварки труб из коррозионно-стойкой стали (на трубных заводах Москвы и Днепропетровска) успешно применяется мощный технологический CO₂-лазер типа ТЛ-5М. Интенсивно развиваются программы разработки мощных (свыше 20 кВт) техноло-

гических CO₂-лазеров и технологической оснастки для сварки магистральных трубопроводов.

Лидером среди лазерных технологических операций является резка CO₂-лазерами (40 – 80 %), обладающая высокой конкурентоспособностью по сравнению с другими видами разделения материалов. Твердотельные лазеры используются преимущественно в области маркировки и сварки тонкостенных изделий. Наиболее крупными потребителями CO₂-лазеров в западных странах являются автомобилестроение, авиапромышленность, общее машиностроение, электротехническая промышленность. Основные тенденции в развитии и применении лазерных технологий в автомобилестроении следующие: устранение дефектов окраски поверхностей; ударное термоупрочнение; внедрение стереолитографии для получения объемных моделей; применение лазерных операций сварки, резки, пайки, подготовки номиналов для изготовления всех компонентов электронного оборудования; резка металлических листов и последующая их сварка с использованием присадочной проволоки; гибка и спрямление металлических заготовок; обработка деталей из алюминиевых сплавов.

Лазеры широко используются в составе автоматизированных лазерных комплексов (АЛТК) или лазерных автоматических линий. Так, в электронной промышленности выпускается установка «Квант-50».

Станкостроительная промышленность России освоила выпуск сверлильных станков с ЧПУ мод. 4Р222, конструкция которых предусматривает встраивание различных твердотельных лазеров. В НИЦТЛ РАМ созданы высококачественные оптико-механические системы внешнего тракта транспортировки луча и высокочастотная биоконтактная следящая система, контролирующая профиль металлического листа в процессе лазерной резки. Эти системы обеспечивают ширину реза 0,1–0,13 мм при обработке низкоуглеродистых сталей толщиной до 6 мм и предельные отклонения размеров вырезаемых деталей не более ±0,1 мм при отсутствии грат.

Задачи контроля в лазерных лабораториях состоят из определения качества непосредственно в процессе лазерной обработки и анализа структуры после нее. В обоих случаях целью является получение информации для формирования управляющего сигнала системы адаптивного управления процессом. В процессе лазерной обработки измеряются теплофизические параметры обрабатываемого материала и сопоставляются с требуемыми значениями. При отклонении свойств материала в зоне обработки или при наличии дефектов контрольная система должна формировать сигнал, корректирующий условия обработки. Диагностика процессов, протекающих в зоне лазерного воздействия, осуществляется методами оптической спектроскопии плазмы лазерного факела, акустической эмиссии, термографии, регистрации свечения плазмы. Для оперативного контроля свойств материала привлекаются лазерные методы и рентгеноструктурный анализ. Разрабатываются системы диагностики, встраиваемые в цепь оперативного управления ходом процесса лазерной обработки и конструктивно сопряженные с лазерной обрабатывающей головкой и столом или роботом. Можно указать также на следующие направления развития лазерных технологий: увеличение скорости процесса и повышение его производительности; увеличение толщины обрабатываемого материала; прецизионная обработка; обработка труднообрабатываемых материалов, включая слоистые и композиционные.

Для более широкого внедрения лазерных технологий в промышленное производство необходимо:

- создавать широкую сеть региональных и локальных учебных центров;
- всемерно снижать капитальные эксплуатационные затраты на всех стадиях применения лазера; переходить на методы проектирования новых моделей изготавливаемых изделий с участием лазерных технологий на всех этапах производства с целью создания новых ком-

плексных технологических систем, органически включающих лазерное оборудование;

- создавать широкую сеть сервисного обслуживания и ремонта.

При дальнейшем внедрении лазерной технологии в промышленное производство намечается интеграция традиционной и лазерной технологий в единую производственную систему, так называемую «лазерную мультипроцессорную систему». Такие системы могут состоять из гибких мультипроцессорных станций, совмещающих в едином цикле обработки лазерные и традиционные технологии; цикл изготовления деталей – от заготовки исходных материалов до финишных операций. Объединение этих станций представляет собой гибкую производственную ячейку. Время операций обработки на станциях и в ячейках должно определяться процессами лазерной технологии, хотя в цикл включаются и традиционные технологии, в том числе и роботы. Группы таких ячеек называются «островами», а «острова» в комбинации образуют полный автоматизированный завод будущего, в котором осуществляется неразрушающий контроль выпускаемой продукции, а все производство является компьютерно-интегрированным. Такая организация производства обеспечивает высокие производительность и качество. Создание лазерных мультипроцессорных систем обеспечивает такие преимущества, как высокая повторяемость технологического процесса в целом, его быстрая перенастройка с одного изделия на другое, высокая продуктивность и экономия производственной площади. Для обеспечения работы лазерных мультипроцессорных систем необходимы исследования, разработка и формирование новой комплексной инженерно-технологической специальности, интегрирующей знания и практический опыт в широких областях.

Современное машиностроение характеризуется непрерывно увеличивающейся долей продукции, выпускаемой небольшими сериями или в единичных экземплярах. Это обусловлено как непрерывным расширением об-

ластей деятельности человека, так и быстрым изменением спроса разных групп потребителей. Достижение высококачественного уровня новых разработок, обеспечение их конкурентоспособности и оперативное реагирование на спрос требуют быстрой смены номенклатуры выпускаемых изделий и, как следствие, максимального ускорения процесса конструирования новых изделий, изготовления экспериментальных и опытных образцов. Современные системы компьютерного проектирования, оснащенные мощной трехмерной графикой и экспертными системами, позволяют значительно сократить затраты времени и средств на разработку и конструирование новых изделий. Однако проблема изготовления первого физического образца, даже его детали сколько-нибудь сложной формы, остается узким местом, поскольку разработка технологии изготовления и соответствующей оснастки зачастую требует затрат, сопоставимых со стоимостью разработки самого изделия. Поэтому актуальной является задача разработки технологии и соответствующего оборудования для оперативного изготовления трехмерных объектов сложной формы.

С целью решения этой задачи в последние годы интенсивно развиваются технологии оперативного макетирования трехмерных объектов и изготовления деталей машин, приборов и оборудования по их компьютерным образцам, созданным с помощью компьютерных систем трехмерного поверхностного или твердотельного моделирования, т. е. путем постепенного (дискретного или непрерывного) наращивания материала. В настоящее время наибольшие успехи достигнуты в развитии технологии прямого формообразования, основанной на послойном наращивании материала. Развитие и доступность мощной вычислительной техники, способной оперировать трехмерными образами, а также успехи, достигнутые в разработке и освоении пучковых (в том числе и лазерных) технологий обработки материалов, позволили появиться технологиям послойного формирования, основанным на следующих способах: лазерном раскрое листовых материа-

лов; спекании и наплавке порошков металлов, керамики и полимеров лазерным излучением или электронным пучком; полимеризации, фотоинициированной лазерным излучением или излучением ртутных ламп.

Технология послойного изготовления деталей из жидких фотополимеризующихся композиций получила название «стереолитографии». Основой этой технологии является локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход жидкость – твердое тело) в результате фотоинициированной в заданном объеме полимеризации. Именно эта технология наиболее широко используется в разрабатываемых и серийно выпускаемых в настоящее время установках для оперативного макетирования. Технология включает в себя создание компьютерного образа детали, его разбиение на тонкие слои и последовательное воспроизведение соответствующих поперечных сечений с помощью излучения, инициирующего полимеризацию на поверхности жидкой фотополимеризующейся композиции (ФПК). Спектральные характеристики излучения и фоточувствительной среды таковы, что излучение практически полностью поглощается в тонком поверхностном слое. В облученной области образуется пленка твердого полимера. Последовательное формирование слоев (каждого последующего поверх предыдущего) позволяет послойно выращивать вещественную копию компьютерного образца.

В варианте стереолитографии, реализованном в установках SLA фирмы 3D Systems, для воспроизведения поперечных сечений используется движущийся по поверхности ФПК сфокусированный пучок лазерного УФ-излучения, который воспроизводит контур сечения. Движущийся по поверхности ФПК лазерный луч оставляет после себя след из отвержденного полимера. Переход от одного слоя к другому осуществляется путем погружения платформы, на которой выращивается деталь, в емкость с жидкой ФПК на глубину, равную толщине следующего слоя. Высокая квантовая эффективность фотоинициированной полимеризации и, как следствие,

малые удельные затраты энергии на отверждение, безотходность и экологическая чистота делают эту технологию наиболее привлекательной с точки зрения создания на ее основе установок для оперативного макетирования. Основными направлениями развития стереолитографии являются: повышение точности и воспроизводимости; увеличение производительности; расширение набора ФПК, пригодных для изготовления функциональных деталей и узлов машин, приборов и оборудования; изготовление микрообъектов (микростереолитография); изготовление копий реальных объектов по данным измерительных машин разных типов зондирования.

В настоящее время в лабораторных условиях достигнуты точность и воспроизводимость менее 25 мкм. Это в сочетании с ФПК, обеспечивающих высокие механические и физико-химические характеристики изготовленных из нее деталей, значительно расширяет область применения стереолитографии. Она все шире используется для изготовления оснастки (форм для разных видов литья, пресс-форм и штампов для производства деталей из термопластических материалов, электродов для гальванопластики и др.), а также деталей приборов, машин и оборудования. Стереолитография позволяет получать копии реальных трехмерных объектов по данным, например, рентгеновского компьютерного томографа, координатных измерительных машин и других типов зондирующего оборудования трехмерных объектов. В лабораторных условиях выполнены работы по послойному изготовлению деталей из порошков меди, бронзы, керамики и железа. Проводятся эксперименты по послойному изготовлению деталей из пористой керамики с последующей заливкой расплавленным металлом. Широкое применение получила технология послойного изготовления деталей из спекаемых лазерным излучением порошков полимерных материалов (поликарбонаты, нейлон и пр.) и литейного воска. В НИЦТЛ РАН, ФИАНе, Институте металлоорганической химии (г. Н. Новгород), Инсти-

туте точной механики и оптики (г. С.-Петербург) созданы различные установки для лазерной стереолитографии.

В последние годы отмечается прогресс в применении лазерного видимого излучения и излучения УФ-диапазона для создания базовых элементов устройств оптоволоконной связи, оптических компьютеров различных систем оптоэлектроники. Метод получения лазерно-плазменных тонких пленок впервые был продемонстрирован в 1977 г. в Институте прикладной физики АН СССР. Метод основан на явлении абляции твердых тел под действием мощного лазерного излучения. Технология следующая: в вакуумной камере располагаются мишень и подложка. На поверхности мишени фокусируется излучение мощного импульсного лазера. Под действием лазерного излучения происходит распыление мишени и образуется плазменный эрозионный факел, который расширяется в направлении, перпендикулярном к поверхности мишени. На пути факела установлена подложка. При взаимодействии частиц плазмы с поверхностью подложки происходят конденсация вещества и рост пленки. Метод лазерно-плазменного напыления обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами (магнетронное распыление, молекулярно-лучевая эпитаксия, резистивное распыление и др.). Он не требует оборудования для создания высокого вакуума, позволяет достаточно точно (до одного монослоя) контролировать толщину пленок в течение процесса. При использовании нескольких мишеней можно получить многослойные структуры.

В Институте прикладной физики РАН разработана технология напыления многослойных рентгеновских зеркал; с помощью лазерно-плазменного напыления удастся изготовить рентгеновские зеркала с коэффициентами отражения в десятки процентов. Там же освоено напыление пленок из высокотемпературных сверхпроводников. Ведутся работы по напылению биосовместимых покрытий на основе оксалоапатитов, синтезу сверхпрочных и высокотемпературных пленок на основе оксидов и нит-

ридов металлов, а также алмазоподобных пленок. В НИЦТЛ РАН создана и работает напылительная установка, которая позволяет напылять полупроводниковые пленки, многослойные структуры из различных материалов. В ИПФ РАН разработано несколько версий лазерных напылительных установок на базе импульсных твердотельных лазеров на ниодимовом стекле и иттрий - алюминиевом гранате.

4.12. Особенности лазерно-механической обработки инструментом, оснащенным твердым сплавом и синтетическими сверхтвердыми материалами

Промышленное применение комбинированных методов обработки резанием является одним из кардинальных направлений повышения, как производительности, так и качества обработки деталей. Кроме того, в ряде случаев освоение комбинированных способов обработки позволяет достигнуть новых технических эффектов, например, повысить прочность и износостойкость изготовленных деталей машин.

К перспективным комбинированным методам относятся механическая обработка с концентрированным нагревом плазмой (плазменно-механическая обработка – ПМО) или лазерным излучением (лазерно-механическая обработка – ЛМО). Они входят в одну группу комбинированных методов обработки с нагревом (КМОН). Вопросам КМОН посвящено большое число работ, в то же время ЛМО находится на начальной стадии исследований. Поэтому представляется важным сопоставить ПМО и ЛМО по ряду факторов, выяснить особенности ЛМО, рациональные области ее промышленного применения.

Нагрев материала срезаемого слоя приводит к четырем основным явлениям: снижению прочности и твердости обрабатываемого материала; возникновению в материале заготовки системы структурных превращений

и термических напряжений, как временных (действующих в процессе обработки), так и остаточных в поверхностном слое изготовленной детали; расплавлению и испарению части материала, подлежащего удалению; изменению характера контактных явлений в зоне рабочей грани инструмента – обрабатываемый материал.

Эффект улучшения обрабатываемости материалов при ПМО и ЛМО связан прежде всего со снижением прочности и твердости материала при нагреве; при этом также возрастают вязкость и сопротивление хрупкому разрушению инструментального и обрабатываемого материалов.

По температурному закону сопротивления материала пластическому деформированию (4.3):

$$M_2 = M_1 \cdot e^{-\alpha_T \cdot (\theta_2 - \theta_1)}, \quad (4.3)$$

где M_1 , M_2 – механические характеристики обрабатываемого материала, определяющие его сопротивление пластическому деформированию соответственно при меньшей θ_1 , и большей θ_2 температурах; α_T – зависящий от механических и физико-химических свойств обрабатываемого материала, скорости и других параметров деформирования.

Нагрев во всех случаях ведет к снижению механических свойств, определяющих сопротивление материала пластическому деформированию; это положение широко используют при всех видах горячей обработки металлов давлением.

Температура θ_K контактных слоев инструментального и обрабатываемого материалов при резании с нагревом складывается из температуры θ_H предварительного нагрева и приращения температуры $\Delta\theta_p$, обусловленного тепловыделением в процессе резания (4.4):

$$\theta_K = \theta_H + \Delta\theta_p, \quad (4.4)$$

Оптимальную температуру контактных слоев можно получить и при обычном резании без подогрева путем рационального выбора режимов об-

работки ($\theta_n=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta\theta_p \approx \theta_k$). Однако стойкость инструмента в этом случае может быть значительно ниже. Это объясняется тем, что при оптимальных условиях предварительный подогрев материала срезаемого слоя обуславливает его значительно большее разупрочнение и на большую глубину. В результате уменьшаются силы резания и контактные силы трения, что ведет к снижению тепловыделения, обусловленного процессом резания, так как приращение температуры эквивалентно работе, совершенной инструментом. Таким образом, предварительный нагрев, с одной стороны, повышает температуру в зоне резания, а с другой, снижая интенсивность тепловыделения, уменьшает температуру резания. Поэтому температуры резания складываются из сумм этих противоположно направленных воздействий; причем температура резания может быть ниже, чем при обычном резании без подогрева.

Сущность ПМО и ЛМО заключается в использовании плазменной дуги или лазерного луча для создания высокой концентрации тепла, локализованного в зоне резания непосредственно перед режущей кромкой. При применении этого метода высокая эффективность обеспечивается строгим согласованием теплового и механического воздействий на материал срезаемого слоя. Таким образом, это единый процесс обработки, включающий в себя процесс предварительного локального нагрева и механического резания. Эти процессы осуществляются последовательно один за другим; однако интервал между ними бесконечно мал (несколько долей секунды), и поэтому разделить этот процесс на два самостоятельных, как это имеет место, например при резании с нагревом обрабатываемого материала индуктором токами высокой частоты, практически невозможно. Плазменная дуга плазмотрона или лазерный луч воздействуют на поверхность резания, образованную главной режущей кромкой инструмента; при этом режимы нагрева и резания должны быть подобраны таким образом, чтобы глубина зоны интенсивного нагрева соответствовала толщине срезаемого слоя;

температура материала, формирующего поверхностный слой изготавливаемой детали, оставалась существенно ниже температуры начала структурных превращений.

Плазмотрон (или лазерный луч) должен перемещаться относительно обрабатываемой заготовки таким образом, чтобы центр пятна нагрева находился постоянно в заданной точке A_1 (рис. 4.) поверхности резания. Существенное значение при КМОН имеет расстояние l между вершиной резца и точкой A_1 . При постоянном тепловом потоке величина запаздывания механического воздействия инструмента относительно теплового воздействия при $l = \text{const}$ определяется скоростью резания v . Если скорость резания мала, а l велико, то к моменту подхода нагретого слоя к режущему инструменту его температура значительно упадет.

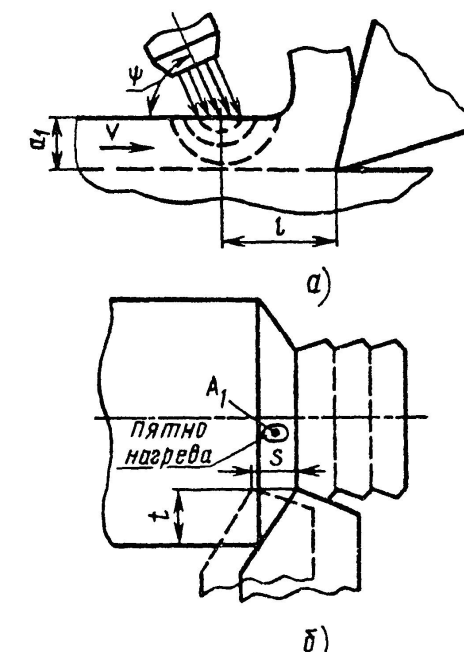


Рис. 4.4. Схема резания с плазменным или лазерным нагревом (а) и механизм формирования поверхности детали (б)

Напротив, если скорость резания большая, а l мало, то изотерма рациональной температуры нагрева материала срезаемого слоя не успеет углубиться на толщину a_1 срезаемого слоя. В обоих случаях условия КМОН

не являются оптимальными. Следует также отметить, что при КМОН имеет место предварительный нагрев на данном рабочем ходе i тепловой волной от подогрева на предыдущих оборотах заготовки, т. е. при $(i - 1)$, $(i - 2)$ ходах инструмента.

Одной из специфических особенностей процесса резания при ПМО и ЛМО является образование лунки на поверхности резания. В процессе ПМО металл из лунки потоком плазмообразующего газа выдувается в окружающую среду, в том числе на обработанную поверхность детали. Образование лунки увеличивает глубину интенсивного нагрева материала заготовки, а также облегчает процесс последующего механического резания; кроме того, с образованием лунки увеличивается площадь нагрева, на которую воздействует дуга. Учитывая последнее, факел дуги должен пересекаться с поверхностью резания под минимальным углом ψ ; в связи с этим конструкция корпуса плазмотрона должна допускать его размещение под возможно меньшим углом. Кроме того, угол ψ следует назначать таким, чтобы металл из лунки выбрасывался на обрабатываемую поверхность, а не на обработанную. При ЛМО лунка образуется вследствие испарения и выплеска жидкой фазы под действием давления отдачи паров.

Экспериментальная установка для точения с лазерным и плазменным нагревом обрабатываемого материала (рис. 4.5) допускает возможность как отдельного, так и совместного использования источников нагрева. Проведение экспериментов по ЛМО и ПМО в идентичных условиях позволило получить наглядную информацию для сопоставления обоих методов.

В экспериментах использовали CO_2 -лазер ЛТБ-1 мощностью $W = 1,2$ кВт, АИГ-лазер ЛТН-103 и плазмотрон на аргоне с номинальной мощностью дуги $W_d = 1,2$ кВт. Фокусирующая оптика лазеров обеспечивала диаметр пятна фокусировки $d = 0,2 - 0,5$ мм. (коэффициент сосредоточенности $K_0 = 1000 - 1600 \text{ см}^{-2}$).

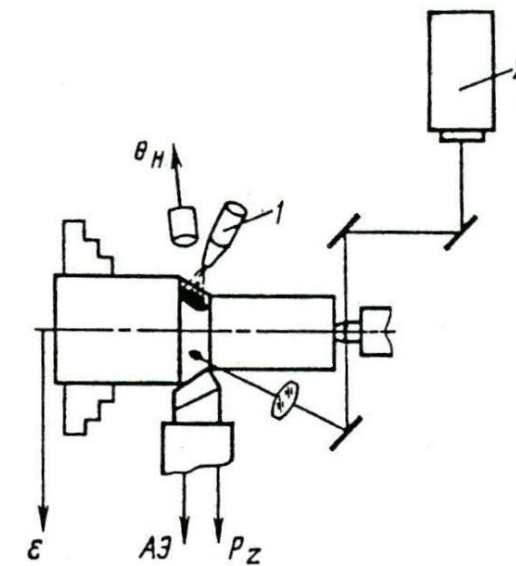


Рис. 4.5. Схема экспериментальной установки для точения с плазменным и лазерным нагревом: 1 – плазмотрон; 2 – лазер

При плазменном нагреве максимально достигнутое в экспериментах значение $K_0 = 200 \text{ см}^2$ на уровне мощности плазмотрона $W_d = 1,2$ кВт. Данное значение соответствует и даже несколько выше значений K_0 , известных из литературы по ПМО.

Транспортно-фокусирующую систему лазерного луча и манипулятор плазмотрона крепили на суппорте токарного станка мод. 1К62, что необходимо для регулирования и стабилизации в процессе обработки взаимного расположения пятен нагрева и режущего инструмента. Оптическая оснастка токарного станка универсальна и с несущественными изменениями в конструкции узлов крепления ее можно применять на других станках, например фрезерных.

В работе наряду с традиционными методами исследования процессов резания (см. рис. 4.5) (метод естественной термопары, тензометрическое определение сил резания P_z) применяли также методы оптической пирометрии – θ_n , ИК-термографии, акустической эмиссии (АЭ). Для регистрации температурных полей использовали инфракрасную термовизионную

систему AGEMA (Швеция), с основными характеристиками: диапазон измерения температур от -20 до 1600 °С; погрешность измерения температур $0,1$ °С; быстродействие 25 кадров /с. Модернизация оптической схемы прибора позволила повысить пространственное разрешение до $0,2$ мм. В области температур, превышающих 1600 °С, и при исследовании процессов, протекающих с высокими скоростями изменения температуры, использовали универсальный цветовой микропирометр с фотоэлектрической регистрацией. Рабочий диапазон температур пирометра $800 - 5000$ °С; пространственное разрешение $\sim 0,2$ мм; быстродействие $\tau < 10^{-6}$ с.

Методами акустической диагностики определялось состояние зоны обработки; сигнал акустической эмиссии ($f = 0,1 - 1$ МГц) из зоны резания регистрировался и обрабатывался на анализаторе спектра СК-4 и приборах ИАС-4, КС-1. Информация о параметрах сигнала АЭ служила для контроля износа и разрушения инструмента, наличия микротрещин на обрабатываемой поверхности, а также для выбора и оптимизации режимов механической обработки с нагревом.

Эксперименты проводили на W, Mo, сплаве WTa, титановом сплаве BT-22, высоколегированном хромоникелевом сплаве ХН67МВТЮ. Обработку осуществляли резцами с механическим креплением твердосплавных пластин ВК8 типа 03114-120408 по ГОСТ 19052–80. Геометрия пластин соответствовала ГОСТ 21151–75.

Одним из основных параметров ПМО и ЛМО является температурное поле, возникающее в обрабатываемом материале под действием концентрированного источника нагрева. Величина и распределение температур по сечению срезаемого слоя в момент подхода участка материала к режущему инструменту во многом определяют механику процесса резания, условия работы инструмента, состояние обработанной поверхности и ее структуру. Сопоставление температурных полей в обрабатываемом материале, движущемся со скоростью $v = (5-60)$ м/мин, при нагреве лазерным

излучением и плазмой показывает следующее. Для $W_{\text{л}} = W_{\text{д}}$, несмотря на более эффективную передачу энергии дуги в материал, максимально достижимые температуры при лазерном нагреве в $2 - 5$ раз превышают соответствующие при плазменном нагреве и составляют $\sim 1000 - 3000$ °С. Причиной этого служит более высокая концентрация энергии лазерного излучения. Даже при равенстве диаметра фокального пятна лазера и диаметра столба дуги размеры зоны, прогретой до определенной температуры, при плазменном нагреве в $2 - 2,5$ раза больше, чем при лазерном, что объясняется «уширением» столба дуги у поверхности материала. По этой же причине нельзя подвести дугу к режущему инструменту ближе, чем на $l = 8$ мм, так как поток нагретого до высоких температур газа попадает на инструмент.

Из-за большого расстояния между пятном нагрева и инструментом ($l = 8 - 15$ мм) температура нагрева в зоне стружкообразования составляет $\sim 300 - 600$ °С. В то же время, пятно лазерного нагрева может быть подведено непосредственно к инструменту на расстояние $l \approx 0,5$ мм, что позволяет реализовать температуру нагрева на поверхности ~ 2000 °С, т. е. лазерный нагрев позволяет в большей степени разупрочнить материал в зоне стружкообразования. С другой стороны, в случае плазменного нагрева из-за относительно больших диаметров пятен нагрева и расстояний l , глубина проникновения тепла в материал ($z \approx 1$ мм) приблизительно на порядок выше, чем при лазерном нагреве ($z \approx 0,1$ мм).

В режимах чистовой обработки плазма равномерно прогревает срезаемый слой, причем глубина прогрева до высокой температуры превышает его размеры. При лазерном нагреве распределение температур в срезаемом слое существенно неоднородно и на глубине $z > 0,3$ мм температура предварительного нагрева практически не превышает исходной ($\theta \approx 25^\circ\text{C}$). Реализуется ситуация, благоприятная для процесса резания, когда дополнительно внесенная теплота, снижая силы резания и тепловыделение за

счет деформации обрабатываемого материала, оказывает минимальное влияние на температуру контактной поверхности инструмент – деталь.

Известные методы нагрева, в том числе и плазменный, при характерных размерах удаляемого слоя менее 1 мм не в состоянии нагреть обрабатываемый материал в зоне стружкообразования выше 1000 °С, не перегревая и не выводя из строя инструмент. Недостаточная в режимах чистовой обработки локальность плазменного нагрева влечет за собой структурные и фазовые изменения, которые наблюдались на сплавах ВТ-22 и ХН67МВТЮ, а также накопление тепла в детали. При точении W диаметром прутка 20 мм, длиной 100 мм с нагревом $W_d = 0,42$ кВт, $s = 0,05$ мм/об, $t = 0,2$ мм наблюдалось постоянное повышение температуры как перед инструментом, так и всего образца в целом. Через 40 с после начала процесса температура нагрева возрастала соответственно от 25 до 500 °С и от 25 до 350 °С. Лазерный нагрев при температуре $\theta_n = 1300$ °С в центре пятна нагрева с диаметром $d = 0,5 - 0,2$ мм обеспечивает стабильное протекание процесса. Температура образца в конце процесса составляет 80 – 120 °С, увеличиваясь с ростом d .

Локальность и неоднородность нагрева концентрированными источниками энергии может приводить к ряду эффектов, которые наиболее ярко проявляются в случае лазерного нагрева. Если осуществлять, например точение с переменной скоростью резания и, то при неизменной мощности лазера температура $\theta_n = \frac{1}{\sqrt{v}}$. В случае, когда регулированием мощности

W_d поддерживается постоянной θ_n , изменяется глубина прогрева:

$$h \approx \sqrt{a \frac{d}{v}}, \text{ где } a - \text{температуропроводность обрабатываемого материала. С}$$

повышением скорости резания глубина прогрева снижается, но с уменьшением температуры нагрева на линии среза θ_{HA} , возрастает количество теплоты, выделяющейся от процессов деформации и трения в зоне струж-

кообразования. Если повышение температуры за счет контактных процессов $\Delta\theta_d$ с уменьшением θ_{HA} превышает $\Delta\theta_{HA}$, то температура резания будет возрастать. При обратном соотношении температуры резания с нагревом $\theta_{p.r.}$ с увеличением скорости резания будет снижаться.

Применение предварительного нагрева при резании ограничивается интенсификацией износа рабочих граней инструментов. Нагрев улучшает обрабатываемость в тех случаях резания, когда увеличение стойкости инструмента вследствие снижения удельной работы резания больше, чем отрицательное воздействие повышенных температур на увеличение интенсивности явлений охватывания и изнашивания инструмента. Стойкость инструмента при предварительном нагреве повышается в том случае, если при его использовании в процессе резания увеличивается разница твердости обрабатываемого материала и контактной твердости инструмента, т. е. разупрочнение обрабатываемого материала превалирует над разупрочнением рабочих поверхностей инструмента. При работе быстрорежущим инструментом эта разница обычно уменьшается, поэтому нагрев при резании в этом случае не применяют. При работе инструментом, оснащенным твердым сплавом, стойкость увеличивается, при этом степень увеличения для закаленных сталей больше, чем для отожженных. Этим объясняется рентабельность применения резания с предварительным нагревом для твердых закаленных сталей.

Оптимальные условия КМОН в значительной мере определяются соотношением «горячих» твердостей материалов инструмента и заготовки; он называется коэффициентом формоустойчивости k_{ϕ} . Наибольшим k_{ϕ} обладают твердые сплавы и синтетические сверхтвердые материалы. Условия эксплуатации инструмента, оснащенного этими материалами, зависят помимо рассмотренных выше температур от действующих сил резания. Зависимости сил P_z от температуры нагрева для W и Mo существенно отличаются. При ЛМО молибдена с ростом температуры нагрева P_z моно-

тонно снижается. Эксперименты показывают, что при достижении в центре пятна нагрева температуры $\theta_n = 1373$ К, мелкодробленая стружка, характерная для «холодного» чистового точения вольфрама, переходит в сливную. С ростом θ_n увеличиваются радиус кривизны стружки и площадь контакта резец – стружка, вследствие чего повышается тангенциальная составляющая силы резания. Характер зависимости $P_z(\theta_n)$ при точении вольфрама обусловлен двумя факторами: разупрочнением материала и увеличением площади контакта. На участке $\theta_n < 1373$ К основную роль играет первый фактор, на участке $\theta_n > 1473$ К – второй. Отметим, что несмотря на рост сил P_z , удельные контактные нагрузки на резец не возрастают, т.е. условия работы инструмента не ухудшаются.

Аналогичный характер зависимости был получен и для ПМО вольфрама. Однако в этом случае минимальное значение $P_z = 196$ Н, а для ЛМО $P_z = 75$ Н в идентичных режимах резания. Наблюдающееся при ЛМО значительное снижение сил резания (на 20 – 60 %) для различных материалов позволяет применять инструмент из синтетических сверхтвердых материалов, допускающих к тому же более высокие температуры нагрева. В экспериментах по ЛМО молибдена резцами из гексанита-Р было достигнуто четырехкратное повышение стойкости инструмента. Исключались сколы режущей кромки при врезании резца в деталь. С последним результатом тесно связана еще одна особенность ЛМО – высокая скорость нагрева, составляющая $\sim 10^5 - 10^7$ К/с. Вследствие размещения сфокусированного лазерного луча непосредственно перед резцом за короткое (~ 1 мс) время между началом нагрева и касанием инструмента детали (при врезании в деталь или прерывистом резании) материал успевает разупрочниться. Как следствие, снижаются ударные нагрузки, повышается стойкость инструмента. Кроме того, по сравнению с ПМО исключается возможность срыва дуги при прерывистом резании.

Простота управления пространственными и энергетическими характеристиками лазерного луча дает возможность изменять конфигурацию зоны нагрева и распределение температур в зоне нагрева. Рассмотрим некоторые примеры.

Исследовали процесс точения титановых сплавов ВТ-22, ПТ-7 по корке с неравномерным припуском. Сканирование сфокусированного луча по поверхности резания позволило осуществить точение с глубиной резания $t = 10$ мм и удалить припуск за один проход. При этом наблюдался равномерный характер износа режущей кромки, что, в конечном счете, обеспечивало повышение стойкости инструмента в 4,2 – 5,8 раз при заданной производительности обработки или соответствующее повышение производительности (вследствие увеличения подачи) при заданной стойкости инструмента.

Исследовали торцовое фрезерование молибдена. В данном случае возможны две схемы нагрева: перемещение пятна нагрева относительно материала одновременно с зубом фрезы со скоростью, равной скорости резания; сканирование пятна нагрева по дуге вдоль линии контакта фрезы с обрабатываемым материалом и перемещение в направлении и со скоростью подачи. Для первой схемы требуется лазер меньшей мощности, вторая схема более проста и обеспечивает большую глубину прогрева. Конструкция установки позволяла варьировать распределение температуры вдоль линии контакта фреза – деталь. Так, при попутном фрезеровании максимальную температуру задавали на входе зуба в материал, а потом монотонно снижали. Стойкость фрез с пластинами ВК8, как показывают результаты экспериментов, возросла в этом случае в 3,3 раза. Управление лучом, его транспортировку осуществляют с помощью отражающих элементов или световодов.

Если при ПМО есть ограничение на длину дуги, то лазерный луч может транспортироваться на большие расстояния и подводиться в трудно-

доступные места. Проведены отдельные эксперименты по сверлению и растачиванию отверстий в вольфраме. Использование технологических отверстий в инструменте, подаче излучения через полый шпиндель позволили подвести лазерный луч непосредственно в зону резания. Производительность обработки повышалась не менее чем в 2 раза. Более точного значения получить не удалось ввиду ограниченного числа экспериментов и большого разброса величин периода стойкости инструмента. Состав атмосферы в зоне обработки при ПМО определяется типом плазмообразующего газа. При ЛМО возможна обработка в различных средах. Эксперименты показали, что не исключается применение СОЖ. При точении с лазерным нагревом сфокусированный лазерный луч образует канал в слое СОЖ. При этом потери на испарение составляют ~10 Вт, расстояние между пятном нагрева и резцом – 1 мм, в результате температура нагрева обрабатываемого материала снижается незначительно. В то же время СОЖ охлаждает инструмент и улучшает условия его работы.

Основной недостаток ЛМО – низкая поглощательная способность металлов на длине волны лазерного излучения $\lambda = 10,6$ мкм. По этой причине при точении с подачей $S > 0,5$ мм/об необходимая для эффективного нагрева мощность лазера выше 5 кВт и применение ЛМО вместо ПМО может быть оправдано только в исключительных случаях.

Плазменно-лазерная механическая обработка является комбинированным методом обработки, совмещающим три вида воздействия на материал срезаемого слоя; она совмещает локальность лазерного нагрева с высокой эффективностью плазменного. Были проведены эксперименты по точению сплавов ХН67МВТЮ, ВТ-22 с совместным нагревом лазером ЛТН-103 (мощность 200 Вт) и плазмотроном. Плазменный нагрев и окисление поверхности металла повышали поглощательную способность с 10–15 до 25–50 %. С другой стороны, высокие температуры лазерного нагрева в центре пятна фокусировки (диаметром 0,2 мм) и испарение окислов с по-

верхности создают благоприятные условия для локализации привязки дуги в пятне лазерного нагрева.

Приведенные данные подтверждают известные рациональные области промышленного применения ПМО. Совмещение механического и теплового воздействия при этом методе резания обеспечивает коренное повышение производительности черновых операций, связанных со снятием больших объемов материала. Наиболее подходящими для внедрения ПМО являются крупногабаритные токарные и карусельные станки, в тех случаях, когда необходимо обрабатывать особо прочные и твердые материалы.

Основными особенностями лазерного нагрева, определяющими характер процессов механической обработки, являются высокие температура и скорость нагрева, локальность нагрева, а также простота управления пространственными и энергетическими характеристиками, возможность подведения лазерного луча в труднодоступные места. Поэтому наиболее полно преимущества ЛМО по сравнению с ПМО реализуются на операциях чистовой обработки. В заключение следует отметить безусловные достоинства ЛМО по сравнению с ПМО в части улучшения условий труда, техники безопасности и экологической чистоты производства.

4.13. Эффективность использования электронно-лучевых технологий при изготовлении и двигателей внутреннего сгорания

Практика эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС), особенно форсированных дизельных двигателей, показывает, что наиболее слабым местом поршней являются зоны кольцевых канавок под компрессионные кольца. Образование предельного зазора между компрессионным кольцом и кольцевой канавкой поршня в основном и определяет ресурс двигателя до переборки, расход топлива и масла, а также затраты на ремонт. Поэтому повышение моторесурса кольцевых канавок поршней явля-

ется основной задачей научных исследований в области двигателестроения как в России, так и за рубежом.

В межвузовской лаборатории электронно-лучевой технологии АлтГТУ им. И. И. Ползунова на основе более чем 20-летних исследований в области электронно-лучевых технологий разработана технология электронно-лучевого упрочнения наиболее технологически сложных поршневых алюминиевых заэвтектических сплавов типа АК21М2,5Н2,5. Технология упрочнения заключается в электронно-лучевом переплаве слоя металла в том месте поршня, где в последующем выполняется проточка кольцевой канавки необходимых геометрических размеров.

Упрочнение проводят на поршневых заготовках, полученных методом литья в кокиль. Предпочтительным является вариант применения технологии упрочнения как одной из технологических операций при производстве поршней. Перед упрочнением заготовку поршня очищают от грязи, пыли, масла, затем закрепляют в приспособлении для обеспечения вращения вокруг своей оси. После закрепления проводят герметизацию вакуумной камеры до необходимого остаточного давления (не более 0,01 Па) и выполняют упрочнение с легированием или без него.

Основными проблемами при электронно-лучевом переплаве в вакууме высококремнистого поршневого сплава являются растрескивание зоны переплава и высокий уровень остаточной пористости металла.

Для анализа причин их возникновения изучали технологии литья и дополнительной обработки алюминиево-кремниевых заготовок на специализированных предприятиях «Поршень» (Алма-Ата) и Новосибирском заводе им. В. П. Чкалова.

Решение этих проблем получено в результате анализа структурообразования поршневых заготовок в процессе их отливки и модификации, анализа теплового состояния поршня в процессе переплава зоны упрочнения и

рационального выбора траектории высокочастотного сканирования электронного луча.

Для принудительной дегазации жидкой металлической ванны и более равномерного распределения в ней легирующих элементов потребовалось оснащение электронно-лучевых установок приборами управления луча (ПУЛ), позволяющими осуществлять перемешивание расплава за счет сканирования электронного луча по заданной траектории с определенной амплитудно-частотной характеристикой. Для этого в течение 1,5 – 2,0 лет была разработана и изготовлена серия специализированных приборов управления электронным лучом, обладающих большим объемом памяти, широким диапазоном частот и траекторий перемещения электронного луча, независимым регулированием развертки по осям координат, плавным регулированием амплитуды и универсальных для применения в электронно-лучевых пушках различных типов.

В процессе отработки опытно-производственной технологии электронно-лучевого упрочнения поршней для дизелей ОАО «Барнаултрансмаш» был выявлен существенный резерв повышения износостойкости первой кольцевой канавки за счет упрочнения с легированием, что позволяет значительно расширить область применения данного способа упрочнения.

Для дополнительного легирования алюминиевого сплава с целью получения более высоких показателей износостойкости в качестве легирующего материала предлагается использовать нихромовую или медную проволоку.

При практической реализации разработанного способа упрочнения кольцевых канавок на заводе ОАО «Барнаултрансмаш» спроектировали и изготовили электронно-лучевую аппаратуру с 14-позиционным манипулятором под данный типоразмер поршней. С применением электронно-лучевой пушки с «холодным катодом» и манипулятором выполняли упрочнение поршней без легирования.

Результаты производственных испытаний упрочненных поршней при работе на форсированных дизелях показали повышение их моторесурса в 3 раза.

Технология электронно-лучевой сварки алюминиевых поршней ДВС. Одной из проблем, возникающих при эксплуатации поршней, является растрескивание днища поршня вследствие термоусталостных напряжений. Существует ряд способов снижения термоусталостных напряжений, в том числе за счет изменения конструкции поршней, в частности создания в зоне первой поршневой канавки дополнительной полости, по которой циркулирует моторное масло.

В такой конструкции поршня благодаря более интенсивному охлаждению за счет циркуляции моторного масла от днища поршня происходит более равномерный отвод теплоты, что приводит к снижению термоусталостных напряжений и предотвращению растрескивания алюминиевого сплава вблизи днища поршня.

Разработанная технология производства сварного поршня имеет определенные преимущества перед аналогичными технологиями, применяемыми для образования полости охлаждения в днище поршня, например методом заливки соляных стержней. Применение электронно-лучевой сварки в вакууме обеспечивает кинжальное проплавление, что предотвращает возникновение напряжений и последующих деформаций.

Такого рода принципиальные конструкторские и технологические работы были известны ранее, в частности, исследования германских (фирма «Мале») и российских ученых-конструкторов, в том числе сотрудников ЦКБ ОАО «Барнаултрансмаш».

Технологии электронно-лучевой сварки, упрочнения и наплавки других деталей ДВС. В связи с относительно высокой стоимостью оборудования использование высококонцентрированного источника нагрева – электронного луча в вакууме – для сварки и нанесения

упрочняющих и защитных покрытий целесообразно в тех случаях, когда обеспечивает получение качественно новых результатов, свойств сварных, упрочненных и наплавленных изделий, а также при невозможности применения других методов поверхностного нагрева. В частности, для предприятия ОАО «Барнаултрансмаш» был выполнен комплекс технологических работ по электронно-лучевой сварке тела гильзы цилиндра с посадочным буртом. Экономия дорогостоящей легированной стали 38Х2МЮА при этом составила до 40 % за счет резкого уменьшения толщины стенки заготовки и устранения операции токарной обработки.

Разработанный метод наплавки электронными пучками низких энергий (до 5 кэВ) благодаря сочетанию преимуществ порошковых материалов и вакуумной защиты металла позволяет получать уникальные по эксплуатационным свойствам упрочняющие слои на поверхностях различных деталей дизелей.

Весьма эффективным является получение с помощью упрочнения и наплавки электронным лучом защитных слоев на поверхности деталей с высоким уровнем функциональных свойств (твердости, износо- и коррозионной стойкости) на деталях или заготовках из относительно дешевых низкоуглеродистых сталей. Благодаря подаче энергии точной дозировки при наплавке электронным лучом (ЭЛН) формируются равномерные по толщине слои с минимальным проплавлением основы, исключаются деформации нежестких деталей. Прочность сцепления с основой наплавленных методом ЭЛН покрытий находится на уровне металлической связи. Поэтому в отличие от напыленных они не растрескиваются и не отслаиваются в результате воздействия интенсивных многоцикловых контактных нагрузок. Возможна многократная наплавка после перешлифовки наплавленных деталей. Как показывает практический опыт, стоимость ремонта деталей составляет порядка 30 % стоимости новых при существенно более высоких функциональных показателях свойств поверхности.

Например, упрочнение с оплавлением рабочих кромок матриц для горячего деформирования распылителей дизельного топлива позволило в ОАО «Алтайдизель» повысить разгаростойкость поверхности в 2 раза.

Особенно актуальным является практическое применение электронно-лучевой наплавки высоколегированных порошковых сплавов на основе системы Ni-Cr-B-Si для ремонта и восстановления изношенных поверхностей тяжело нагруженных деталей: коленчатых и распределительных валов ДВС, крестовин, шаровых опор, толкателей распределительного валика, ступиц шкивов клиноременных передач, ходовых винтов и др.

Использование высококонцентрированных электронных пучков для сварки, упрочнения с оплавлением и прямой порошковой наплавки является перспективной областью, в которой накоплен достаточно большой практический конструкторско-технологический опыт.

Перспективным является производство тяжело-нагруженных деталей дизелей с наплавленными композиционными покрытиями, когда каждая из фаз – пластичная матрица и твердые упрочняющие частицы карбидов, боридов, силицидов тугоплавких элементов – выполняет определенные функции, образуя в комплексе материалы с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Разработанные технологии могут быть рекомендованы к внедрению на предприятиях, специализирующихся в области двигателестроения при производстве новых или восстановлении и ремонте изношенных деталей и комплектующих для ДВС.

Хорошая воспроизводимость результатов упрочнения и наплавки в автоматизированном режиме, возможность полной автоматизации технологического процесса с компьютерным управлением, существенного улучшения свойств поверхностного слоя изделий, экологическая чистота процесса в сочетании с выпускаемым в России и странах ближнего зарубежья надежным, апробированным в течение 30 – 35 лет оборудованием

значительно расширяют диапазон технологических операций обработки деталей дизелей с использованием электронных пучков в вакууме.

4.14. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности

При эксплуатации различной техники значительные потери связаны с преждевременным выходом из строя деталей машин и инструментов в результате циклических нагрузок. Важнейшим фактором, определяющим долговечность деталей, является качество их поверхностного слоя. Качество контактирующих поверхностей деталей оказывает большое влияние на параметры трения и изнашивания, долговечность, уровень шума, КПД машин и механизмов, в состав которых они входят. В настоящее время наиболее перспективным методом улучшения качества поверхностей деталей является импульсная упрочняющая ультразвуковая обработка (УЗО).

УЗО основана на использовании энергии механических колебаний индентора с частотой 20 кГц (ультразвук) и амплитудой 0,5–50 мкм. Энергия в зону обработки передается посредством статического усилия, действующего со стороны инструмента на поверхность обрабатываемой детали. В состав оборудования для УЗО входят: источник питания, орган управления процессом обработки, механическая колебательная система, привод давления.

Для обработки крупногабаритных изделий сложной формы из конструкционных и инструментальных сталей стандартное оборудование для УЗО дополнили системой охлаждения поверхности детали, обеспечивающей термическую стабильность формируемых в процессе обработки нанокристаллических структур с зернами 5–10 нм, что привело к существенному повышению твердости и прочности поверхностных слоев обрабатываемых деталей.

Новая технология на основе УЗО отработана на реальных деталях различной конфигурации: цилиндрических, сферических, винтовых и более сложных (авиационные турбинные лопатки, штампы и др.). Кроме того, экспериментально исследовали крупногабаритные детали. Так, например, был успешно обработан вал прокатного стана массой 5200 кг диаметром 800 мм с рабочей частью диаметром 1500 мм из закаленной стали 4X5MΦ1C.

Разработанная технология позволяет выполнять не только поверхностное упрочнение, но и финишную обработку, после которой параметры микрорельефа поверхности измеряются в сотых долях микрометра. При этом важно то, что данный метод позволяет получать поверхности с заданными шероховатостью и маслостойкостью, определяемыми размерами, формой и плотностью масляных карманов, путем изменения соответствующих технологических параметров процесса УЗО.

С увеличением амплитуды возрастает энергия удара, которая при некотором критическом значении вызывает перенапряжение материала (контактную усталость), в результате чего в тонком поверхностном слое возникают микротрещины, происходит так называемое шелушение.

Изменение статического усилия также влияет на микрорельеф поверхности – изменяются степень и глубина наклепа, напряжения, возникающие в поверхностном слое, а также физико-механические свойства материала. Это обусловлено характером образования поверхностного слоя при пластическом деформировании. Величина статического усилия определяет производительность обработки, подачу и частоту вращения детали, число проходов. Таким образом, статическое усилие является определяющим параметром технологического режима УЗО, посредством которого можно управлять процессом упрочнения поверхностного слоя детали. Недостаточное статическое усилие не обеспечивает нужную деформацию поверхностного слоя. Увеличивая параметр $P_{ст}$ можно улучшать параметры

микрорельефа обрабатываемой поверхности, но до определенного предела. Чрезмерное увеличение статического усилия приводит не только к ухудшению шероховатости, но и к разрушению поверхностного слоя – перенаклепу.

Сложность определения оптимальной величины статического усилия обусловлена тем, что этот параметр зависит от ряда взаимосвязанных факторов: механических свойств обрабатываемого материала, исходной и требуемой шероховатостей поверхности, размера детали, диаметра индентора, подачи и частоты вращения детали, амплитуды колебаний инструмента и т. д.

Статическое усилие должно быть тем больше, чем меньше пластичность материала детали, выше исходная шероховатость, больше диаметры упрочняемой детали и индентора (это ведет к увеличению пятна контакта и снижению напряжений в деформируемой зоне), больше подача и частота вращения детали и чем меньше амплитуда колебаний индентора.

При малых значениях $P_{ст}$ передается недостаточное количество энергии. С увеличением $P_{ст}$ передаваемая энергия увеличивается и повышается степень деформации, происходит сглаживание микронеровностей. При дальнейшем увеличении $P_{ст}$ в поверхностном слое возникают напряжения, превышающие предел прочности материала, что приводит к перенаклепу, шелушению и ухудшению параметров шероховатости.

При упрочнении деталей из мягких сталей типа армко-железа шероховатость поверхности в значительной степени ухудшается из-за образования явно выраженного «валка» выдавленного материала.

Исследованиями установлено, что увеличение числа ударов на единицу упрочняемой поверхности посредством повторных ходов мало влияет на микрорельеф обрабатываемой поверхности при оптимальном режиме упрочнения, который обуславливают статическое усилие, амплитуда колебаний индентора, подача и частота вращения образца, диаметр индентора.

Если при первом ходе исходные микронеровности не были полностью деформированы, то повторные ходы улучшают шероховатость поверхности. При оптимальных режимах упрочнения или переупрочнения повторные ходы ухудшают шероховатость поверхности.

При выборе подачи ультразвукового инструмента необходимо учитывать, что диаметр отпечатка индентора должен быть таким, чтобы площади единичных ударов полностью перекрывались, так как в противном случае на поверхности останутся необработанные участки.

4.15. Особенности ультразвукового алмазного выравнивания

Увеличение скоростей перемещения рабочих органов машин и механизмов в современном машиностроении обуславливает повышение требований к обеспечению заданных эксплуатационных характеристик деталей уже в процессе их механической обработки, в особенности, на заключительных операциях. В этой связи все более широкие перспективы применения приобретает обработка ультразвуковым (УЗ) алмазным выравниванием (АВ), обеспечивающая благоприятное с позиции эксплуатационных свойств детали сочетание геометрических и физико-механических показателей качества поверхностного слоя.

Однако широкому внедрению алмазного выравнивания в промышленность препятствуют сравнительно невысокая его производительность из-за низкой теплостойкости алмазного инструмента и, как следствие, увеличение себестоимости деталей. Как правило, поверхностный слой формируется в условиях повышенного контактного давления в очаге деформации. С одной стороны, это способствует усилению смазочного действия смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) и облегчению процесса деформирования поверхности благодаря интенсивному образованию в ней капилляров. С другой – повышенное контактное давление мо-

жет стать причиной разрушения защитных пленок, образующихся в результате взаимодействия с молекулами СОТС на контактных поверхностях заготовки и инструмента и препятствующих адгезионному взаимодействию между ними. Кроме того, активная защитная роль пленок в большой степени определяется контактной температурой. При невысоких значениях температуры толщина пленки определяется по логарифмическому закону, при высоких – рост пленки осуществляется по линейному закону из-за высокой диффузионной способности главного ее компонента – кислорода. Следствием перечисленных факторов, сопровождающих процесс алмазного выравнивания, являются увеличение адгезионной составляющей коэффициента трения и интенсификация изнашивания рабочей части алмаза, что, в конечном счете, снижает производительность обработки и ее качество.

Как установлено в процессе исследования, эффективным резервом повышения смазочных и диспергирующих свойств СОТС при алмазном выравнивании являются экологически чистые электронно-ионные технологии подачи СОТС. Суть методов заключается в использовании энергии ионизированного и озонированного воздуха как в качестве самостоятельного СОТС, так и в комбинации с традиционными смазочно-охлаждающими жидкостями (масло «Индустриальное 20», веретенное масло, олеиновая кислота, сульфолфрезол и др.).

Физико-химический механизм действия ионизированного воздуха обусловлен изменением условий взаимодействия контактных поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом, что проявляется в снижении изнашивания его рабочих поверхностей. Активация воздуха электрическим разрядом приводит к его ионизации и насыщению озоном, что, в свою очередь, содействует активизации окислительных процессов и положительно влияет на химическую кинетику реакций в зоне обработки. Кроме того, ионизированный воздух имеет большую проникающую способность по сравнению с СОЖ, что экспериментально доказано при лез-

вийной обработке. Однако технологическая эффективность ионизированного воздуха как самостоятельного СОТС по сравнению с СОЖ при алмазном выглаживании может быть ограничена его недостаточными пластифицирующими свойствами. Компенсировать этот недостаток позволяет комбинированная подача ионизированного воздуха вместе с традиционными СОЖ. Такое комбинирование возможно по двум схемам.

Первая заключается в использовании традиционного охлаждения и дополнительного введения в зону обработки струи ионизированного воздуха. Это способствует увеличению толщины защитной пленки за счет активизации окислительных процессов и не сопровождается ростом контактной температуры вследствие интенсивного дополнительного охлаждения струей воздуха.

Вторая схема основана на применении мелкодисперсной аэрозоли СОЖ, подготовленной с использованием высокочастотного ультразвукового генератора типа «Вулкан-1» (частота ультразвуковых колебаний 2,64 МГц) и подаваемой в зону обработки на основе ионизированного воздуха. Мелкодисперсные частицы СОЖ очень малы (диаметр 4 – 8 мкм) и, попадая на разогретую поверхность обрабатываемого материала и инструмента, легко испаряются, интенсивно поглощая дополнительное количество теплоты. Электризация мелкодисперсных частиц аэрозоли СОЖ при взаимодействии с ионизированным воздухом приводит к увеличению приращения их поверхностной энергии и, следовательно, еще большему их охлаждению.

В процессе исследований установлено, что наименьшие значения P_z и Ra и наибольшее значение параметра H_{100} зафиксированы при использовании предварительно нанесенного на поверхность заготовки перед обработкой индустриального масла И-20А с подачей в контактную зону ионизированного воздуха в процессе АВ. При этом использование в качестве дополнительного СОТС ионизированного воздуха уменьшает P_z при обра-

ботке покрытых пленкой масла И-20А заготовок из стали 95Х18ШТ на 7,5 %, стали 40Х – на 2 %, титанового сплава ВТЗ-1 – на 9,2 % по сравнению с обработкой с использованием в качестве СОТС только индустриального масла. Одновременно уменьшилось среднее арифметическое отклонение профиля Ra при ультразвуковом выглаживании образцов из стали 95Х18ШТ на 8,5 %, стали 40Х – на 4,5 %, титанового сплава ВТЗ-1 – на 1,5 %. Микротвердость поверхности заготовки при обработке сталей 95Х18ШТ и 40Х практически не изменилась. Эти явления могут быть объяснены возникновением на поверхности заготовки устойчивых к действию теплосиловых факторов оксидных пленок, которые уменьшают интенсивность адгезионных процессов, что проявляется в уменьшении силы выглаживания и высотных параметров шероховатости поверхности обработанных заготовок. Большая эффективность дополнительной подачи ионизированного при УЗ-выглаживании образцов из стали 95Х18ШТ и сплава ВТЗ-1 по сравнению с обработкой образцов из стали 40Х объясняется, вероятно, склонностью данных материалов к адгезионному взаимодействию с алмазом. Дополнительное введение ионизированного воздуха в зону обработки незначительно влияет на увеличение микротвердости поверхности обработанной заготовки. Вероятно, молекулы кислорода не проникают вглубь поверхностного слоя заготовки во время обработки, а создают оксиды в очень тонком поверхностном слое. Можно предположить, что вследствие этого число дефектов кристаллической решетки металла в поверхностном слое не увеличивается, а поэтому и не увеличивается микротвердость поверхности обработанной заготовки.

Обработка заготовок с использованием в качестве СОТС только ионизированного воздуха без предварительного нанесения индустриального масла, как и ожидалось, показала худшие результаты. Отмечено увеличение параметра шероховатости Ra , касательной составляющей силы выглаживания P_z , уменьшение микротвердости поверхности H_{100} . Это подтвер-

дило недостаточные смазочные и диспергирующие свойства ионизированного воздуха, необходимые для эффективной обработки, поскольку при использовании в качестве СОТС индустриального масла дополнительное упрочнение поверхностного слоя происходит, вероятно, вследствие эффекта Ребиндера. При этом некоторое количество жидкости, попадая в поры и микротрещины поверхностного слоя, оказывает на материал заготовки расклинивающее действие, облегчая тем самым процесс пластической деформации, а также уменьшая адгезионную составляющую коэффициента трения. Этот эффект усиливается при воздействии УЗК на процесс обработки. УЗ-выглаживание с подачей СОТС в виде аэрозоли характеризуется некоторым увеличением параметров шероховатости Ra и касательной составляющей силы выглаживания P_z , а также уменьшением микротвердости поверхности H_{100} . Это можно объяснить тем, что при обработке поверхностным пластическим деформированием поверхность контакта заготовки с выглаживателем сильно пластифицирована, что отражается на уменьшающихся размерах капилляров, по которым проникает распыленная СОЖ в зону обработки. В свою очередь, это снижает проникающую способность частиц аэрозолей СОТС. Другое преимущество аэрозоли – небольшой расход – не может быть в полной мере реализовано в этом случае при алмазном выглаживании. Традиционный способ выглаживания с использованием в качестве СОТС индустриального масла, нанесенного на поверхность заготовки перед обработкой, отличается также небольшим расходом СОТС (вследствие высокой вязкости индустриальное масло почти не разбрызгивается с поверхности заготовки при малых окружных скоростях заготовки). При обработке АВ с высокими окружными скоростями эффективность применения аэрозоля, вероятно, увеличится. Однако в этом случае могут проявиться недостаточные охлаждающие свойства аэрозоля. Применение активированной аэрозоли за счет контактного взаимодействия с ионизированным воздухом несколько повышает ее проникающую способность.

Вследствие этого показатели качества поверхностного слоя обработанной заготовки немного увеличиваются, однако все же оказываются несколько худшими, чем с применением индустриального масла. Большая эффективность этого способа, вероятно, будет проявляться в том случае, когда частицы СОЖ удастся диспергировать до размеров капилляров, образуемых в результате активной пластической деформации при алмазном выглаживании. Однако это неизбежно повлечет удорожание необходимого оборудования в связи с увеличением энергетических затрат на диспергирование вязкой жидкости.

Таким образом, в результате исследований установлено, что использование ионизированного и озонированного коронным разрядом воздуха для активации, применяемой в процессе алмазного выглаживания СОЖ, позволяет улучшить условия работы алмазного инструмента, повысить его стойкость, а также производительность обработки в целом.

4.16. Перспективы применения ионно-плазменных технологий в машиностроении

Работоспособность изделий из конструкционных материалов во многом определяется структурным состоянием и комплексом физико-химических и технологических свойств поверхностного слоя. Одним из перспективных способов повышения эксплуатационной надежности деталей из конструкционных материалов является изменение свойств поверхности за счет модифицирования структуры поверхности и нанесения покрытий, в том числе, с наноструктурой. Однако при реализации любых технологий модифицирования или нанесения покрытий возникают значительные затруднения, связанные с наличием на поверхности оксидов, слабо связанных с основой и влияющих на качество формируемого покрытия и модифицированного слоя. В связи с этим качество формирования покры-

тий и модифицированного поверхностного слоя часто определяется эффективностью способа подготовки исходной поверхности.

В настоящее время наряду с традиционными гальваническими процессами создания покрытий на деталях из конструкционных материалов все чаще применяют экологически чистые методы вакуумной ионно-плазменной обработки (ВИПО). Задача обеспечения качества формируемого модифицированного слоя или покрытия при ВИПО носит комплексный характер. Пути ее решения зависят от структурного состояния исходного материала, способа и вида финишной обработки поверхности. Детали, технологических возможностей применяемого оборудования и эффективности воздействия плазмы на поверхность детали на всех технологических этапах обработки. Кроме того, качество обработки поверхности зависит от методов контроля технологических этапов и их приборного обеспечения.

Применение ВИПО характеризуется большими технологическими возможностями по изменению физико-химических и механических свойств поверхности за счет получения оптимальной структуры, фазового состава и степени легирования фаз. Прежде всего изменение поверхностной структуры и свойств достигается при диффузионном модифицировании газовой и металлической плазмой (рис. 4.6).

При этом могут формироваться структуры различных видов согласно диаграммам состояния материал подложки – диффузионно-насыщающая газовая или металлическая плазма: как градиентные структуры, состоящие как из твердых растворов и химических соединений, так и интерметаллидные соединения. Наилучшее сочетание свойств при диффузионном модифицировании наблюдается в том случае, когда формирование структуры поверхностного слоя начинается с образования твердых растворов, плавно переходящих в химические соединения. Так, при ионном азотировании титанового сплава ВТ6 наилучшее сочетание поверхностной твердости с глубиной диффузионного слоя и триботехническими свойствами наблюда-

ется при формировании фазового состава модифицированного слоя в соответствии с диаграммой состояния $Ti - N$: вначале происходит образование твердого раствора внедрения азота в α - и β -фазах титана, затем протекает инициированное азотом $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение с образованием в конечном итоге на поверхности слоя нитридов состава от Ti_2N до TiN . (рис 4.7)

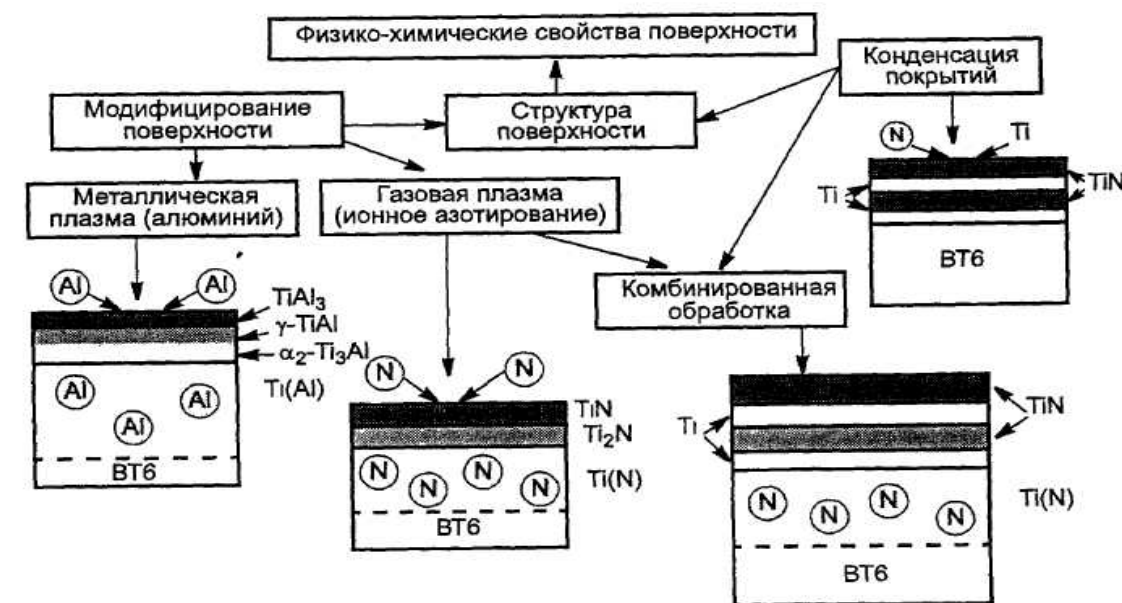


Рис. 4.6. Схема формирования структуры и комплекса свойств поверхности конструкционных материалов при ВИПО (на примере деталей из титанового сплава Ti-6Al-4V)

Изменение свойств поверхности при ВИПО может быть достигнуто за счет нанесения покрытия из чистого металла и его нитридных, карбидных и оксидных соединений. При этом могут формироваться как монослойные покрытия, так и многослойные многокомпонентные с нанометрической структурой в промежуточных и основных слоях. Сочетание диффузионного модифицирования и конденсации покрытия в едином технологическом цикле позволяет осуществить комбинированную обработку поверхности с реализацией нового комплекса эксплуатационных свойств.

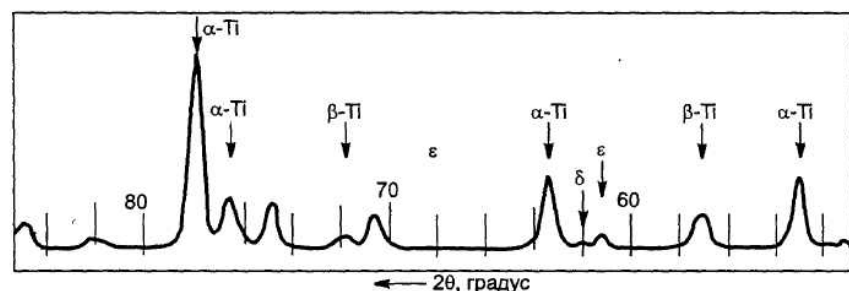


Рис. 4.7. Участок дифрактограммы поверхности сплава ВТ6 после ионного азотирования ($T = 500 - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ мин}$)

Внедрение вакуумных ионно-плазменных технологий (ВИПТ) началось с разработки коррозионно-износостойких многослойных покрытий системы $\text{Ti-Ti}_2\text{N-TiN}$ для стандартизованной арматуры соединений трубопроводов из стали ЭИ 961. Результаты испытаний разработанной композиции показали ее высокую работоспособность в ниппельных соединениях трубопроводов. При этом установлено, что уровень реализуемых свойств покрытия в значительной степени зависит от технологии ее формирования. Выявленные в ходе исследований закономерности изменения фазового состава и структуры покрытий от энергетических параметров плазменного потока позволили оптимизировать технологический процесс формирования многослойного покрытия, особенно на этапе очистки и активации поверхности и нанесения демпфирующего (промежуточного) и твердого (основного) слоев. Установленное соотношение этих слоев (1–2) обусловило уменьшение количества микропор до 5 пор на 1 см^2 , что позволило обеспечить его высокую коррозионную стойкость. Результатом технологических исследований процесса ВИПО являются разработанные технологические рекомендации ТР 1.4.1580–86, ТР 1.8.508.87.228–88, которые явились базовыми при разработке директивных технологических процессов. В частности, разработаны процессы нанесения многослойных покрытий на основе композиции нитрида титана, комбинированное поверхностное упроч-

нение, процесс низкотемпературного формирования покрытия, а также процесс удаления и восстановления покрытий. Для применения этих документов разработаны также методы контроля качества формирующихся покрытий, особенно состояния поверхности на финишном этапе формообразующих технологических процессов. Так, для анализа состояния поверхности на этапе очистки и ее активации предложен метод оценки энергетического состояния поверхности. По изменению значения поверхностного потенциала, измеренного методом контактной разности потенциалов, удалось количественно оценить степень загрязнения и очистки поверхности. Разработан и изготовлен прибор, а также методики измерения поверхностного потенциала при формировании ионно-вакуумных покрытий и диффузионных модифицированных слоев. На базе рентгеновского бездифракционного флуоресцентного анализатора разработан метод контроля толщины покрытий, позволяющий быстро и с точностью до $\pm 0,4\text{ мкм}$ измерять толщину покрытий на деталях ниппельных соединений, а также метод измерения остаточных макронапряжений.

Дальнейшие работы по развитию ВИПТ привели к созданию комплексной системы обеспечения воспроизводимости и качества поверхностных структур и свойств конструкционных материалов методом ВИПО (рис. 4.8.)

Основой этой системы является вакуумное оборудование с встраиваемыми блоками ионного травления, активирующего нагрева, источниками активной металлической плазмы и источником импульсного опорного напряжения, которое позволяет производить поверхностную обработку всех конструкционных материалов, применяемых в машиностроении. При этом реализуется больше технологических возможностей, связанных с получением диффузионных модифицированных слоев, формированием многокомпонентных, многослойных покрытий с градиентной и нанометрической структурой, а также осуществлением комбинированной обра-

ботки в едином технологическом цикле. Комплексная система предусматривает также моделирование технологических процессов, разработку методов и приборов контроля качества, а также осуществление аттестации рабочего объема вакуумной камеры и сертификации технологических процессов. Основным технологическим этапом, обеспечивающим качество формирования модифицированных слоев и покрытий, является ионное травление исходной поверхности деталей ускоренной квазинейтральной газовой плазмой. При этом достигается полное удаление с поверхности загрязнений и оксидов и ее активация. В качестве источника ускоренной газовой плазмы применяют модуль «Плагус», образующий ионный газовый поток энергии 200 эВ.



Рис. 4.8. Комплексная система получения заданных свойств поверхности титановых сплавов при ВИПО

Об эффективности ионного травления можно судить по изменению величины поверхностного потенциала ϕ (мВ). Так, у титанового сплава ВТ6 в результате ионного травления почти полностью восстанавливается поверхностный потенциал после вакуумного отжига. Таким образом, кри-

терием активности обрабатываемой поверхности может являться энергетическая характеристика поверхностного потенциала, которая в результате ионного травления изменяется от минусового значения до плюсового.

Результаты исследований показали, что качество и воспроизводимость технологических операций при ВИПО достигаются, когда вакуумная установка имеет модуль ионного травления и активации поверхности, источники активной металлической и газовой плазмы. Существующие серийные установки, как правило, имеют один или несколько источников активной плазмы металла, используемой на всех этапах технологического процесса, включая очистку и активацию поверхности. Такой подход к формированию покрытий оправдан при их нанесении на инструмент средних и крупных размеров. Для деталей машиностроения, особенно сложных геометрических форм, и деталей с высокой твердостью (низкая температура отпуска) более целесообразно применять газовые источники плазмы, обеспечивающие очистку и активацию поверхности при низких температурах (200–250 °С) без дефектации исходной поверхности. Отсутствие на серийных установках дополнительных блоков газовой плазмы приводит к снижению качества покрытия. Однако в случае установки всего комплекса дополнительного оборудования технологические возможности установки резко снижаются: ограничивается возможность формирования многокомпонентных покрытий; возникают трудности в обеспечении сплошности и структурной однородности обрабатываемых поверхностей.

В связи с этим появилась техническая необходимость создания общего технологического модуля, включающего блоки ионного травления, нагрева и активации поверхности и два источника активной металлической плазмы. Особенностью данных установок «Радуга» является наличие боковых технологических модулей, позволяющих изменять конфигурацию плазменных потоков в рабочем объеме камеры. Конструкция камеры и технологические модули позволяют обрабатывать детали из металличе-

ских материалов и неметаллов, включая детали основного производства, штамповую оснастку и инструмент.

4.17. Эффективность использования режущего инструмента с ионно-плазменным покрытием

Эффективным средством повышения работоспособности режущего инструмента (РИ) является нанесение износостойких покрытий, получаемых методом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ). Важной задачей в технологии КИБ, от которой существенно зависит эффективность РИ с покрытиями, является поиск путей, позволяющих направленно изменять свойства покрытий. Одним из них является структурное упрочнение материала покрытия, которое может протекать по различным механизмам в зависимости от условий его конденсации.

Согласно структурной теории конструктивной прочности, при получении высокопрочных массивных материалов из всех механизмов упрочнения полностью удовлетворяют условиям повышения прочности только два. Это субструктурное упрочнение, реализуемое созданием полигонально-ячеистых дислокационных построений, и упрочнение измельчением зерен. Учитывая, что для карбидов и нитридов металлов IV–VI групп периодической системы с гранецентрированной кубической структурой, используемых в качестве износостойких покрытий, справедливы основные закономерности протекания процессов деформации ГЦК металлов, можно предположить, что для них должны быть справедливы и принципы упрочнения массивных металлов. В случае упрочнения материала износостойкого покрытия максимальными прочностными свойствами будут обладать покрытия, кристаллическая решетка которых искажена различного рода дефектами – дислокациями, вакансиями, дефектами упаковки и т. п.

В технологии КИБ упрочнение материала за счет создания каких-либо

специальных полигонально-ячеистых дислокационных построений практически невозможно. Единственная возможность субструктурного упрочнения заключается в создании конденсата с малыми размерами областей когерентного рассеивания, что наблюдается при низких температуре и скорости формирования покрытия. Наиболее вероятными механизмами получения высокопрочного состояния пленочных материалов особенно с ковалентной связью, к которым относят карбиды и нитриды, является твердорастворное упрочнение (упрочнение примесными атомами), что приводит, в частности, к повышению степени дефектности покрытия. Кроме того, примесные атомы снижают подвижность дислокаций и повышают стабильность дислокационной структуры, т. е. замедляют протекание процессов возврата и рекристаллизации. Следовательно, легирование примесными атомами может обеспечить стабильность структуры покрытия – предотвращать или замедлять процессы старения. В случае конденсированных пленок примесные атомы могут попадать в покрытие вследствие наличия остаточных газов вакуума в камере установки, а также за счет специального легирования. Основным технологическим параметром технологии КИБ, от которого зависит степень упрочнения покрытия за счет остаточных газов вакуума, является температура конденсации. Снижение данного параметра приводит к увеличению дефектности материала покрытия и повышению его механических свойств. Следовательно, существенного повышения твердости и износостойкости материала покрытия следует ожидать при пониженных температурах конденсации.

При специальном легировании материала покрытия все легирующие элементы можно разделить на две группы: элементы, образующие нитриды с неограниченной растворимостью в нитриде титана, и элементы, образующие нитриды ограниченно растворимые в нитриде титана или не взаимодействующие с ним. К элементам первой группы можно отнести Zr, Mo, Cr, Ta, Nb, Hf.

Они так же, как и титан, образуют нитриды с решеткой ГЦК, обладают высокой износостойкостью. В силу их взаимной растворимости друг в друге можно регулировать состав покрытия в широких пределах, подбирая необходимые свойства композиции покрытия - инструментальная основа. Среди нитридообразующих элементов второй группы можно выделить Al, Si, Fe. Образующие ими нитриды имеют высокие твердость и износостойкость. Ограниченная взаимная растворимость данных нитридов позволяет предположить, что в покрытиях нитрида титана, легированного элементами второй группы, кроме твердорастворного механизма может действовать механизм дисперсионного упрочнения частицами. Это может существенно повысить механические свойства покрытий. Известно, что нанесение покрытий КИБ осуществляется при подаче в вакуумную камеру установки реакционного газа: азота, метана, ацетилена. Состав газовой среды влияет на свойства покрытий, в частности на микротвердость. Изменение микротвердости покрытий при этом может быть связано с электронной структурой материала покрытия. В то же время наблюдаемое уменьшение зерна промежуточных составов покрытия по сравнению с исходным твердым раствором позволяет сделать предположение, что изменение газовой среды, например добавление углеродсодержащего газа – ацетилена, при конденсации покрытий на основе карбонитридов аналогично действию легирующих элементов и вызывает твердорастворное упрочнение материала покрытия. Вторым вероятным механизмом упрочнения материала покрытия в технологии КИБ может быть упрочнение микроструктурами барьерами за счет создания слоистости его структуры. Упрочнение микроструктурными барьерами для движения дислокаций (границы зерен, раздел двух фаз, прослойки второй фазы) является перспективным методом получения высокопрочного состояния материала износостойкого покрытия. Известно, что резервом значительного повышения прочности пленочных материалов является уменьшение их толщины.

Это позволяет создавать пленочные композиции микроскопических размеров, состоящих из тонких пленок с прочностью, не достижимой для массивных материалов. Слоистость структуры покрытия при конденсации их методом КИБ может быть обеспечена за счет вращения РИ в камере установки и прохождения его мимо различных катодов.

Анализ механизмов получения высокопрочного состояния материала износостойкого покрытия позволил разработать и реализовать методологию направленного управления параметрами структуры, механическими свойствами покрытий и работоспособностью РИ за счет изменения температурного режима, легирования материала покрытия и изменения состава газовой среды при его конденсации. На основе предложенной методологии разработаны технологические процессы нанесения однослойных и многослойных покрытий сложного состава на основе нитридов и карбонитридов титана. Рассмотрим некоторые из них.

Технология нанесения покрытий в комбинированном температурном режиме основана на закономерностях изменения параметров структуры и механических свойств покрытия от температуры конденсации. Снижение температуры повышает период кристаллической решетки a , полуширину рентгеновской линии β_{111} , что свидетельствует о микродеформации кристаллической решетки и ведет к увеличению микротвердости H_{μ} покрытия. С другой стороны, уменьшение температуры конденсации снижает прочность сцепления покрытия с инструментальной основой K_0 и его трещиностойкость, вызывает рост сжимающих остаточных напряжений σ_0 .

Для получения высокой микротвердости и износостойкости покрытия при низкой температуре конденсации и высокой прочности сцепления с инструментальной основой при высокой температуре покрытие наносится в два этапа за один технологический цикл. Первый слой, непосредственно примыкающий к инструментальной основе, осаждается при высокой тем-

пературе конденсации, что обеспечивает высокую прочность сцепления с инструментальной основой; верхний слой – при возможно меньшей температуре, что позволяет получить высокие твердость и износостойкость покрытия. Данная технология позволяет повысить работоспособность РИ с покрытием в 2–3 раза, может быть использована для покрытия любого состава и не требует дополнительных затрат, так как реализуется только за счет изменения температурного режима конденсации покрытия.

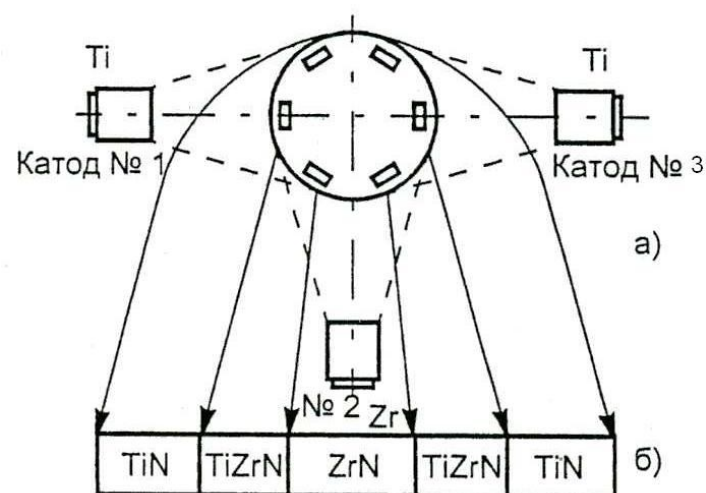


Рис. 4.9. Схемы осаждения покрытия сложного состава (а) и строения слоя покрытия, получаемого за один оборот стола установки (б) (стрелки указывают на соответствующие зоны пучков ионов и границы микрослоев в покрытии)

Технология нанесения износостойких покрытий многоэлементного типа. Изменение состава покрытия существенно влияет на его структурные параметры и механические свойства. В свою очередь химический состав многоэлементного покрытия определяется компоновочной схемой установки: числом катодов-испарителей, их взаимным расположением относительно друг друга, расстоянием от катодов-испарителей до РИ. На рис. 4.9 приведены схемы осаждения и строения слоя покрытия (Ti, Zr)N за один оборот стола установки при нанесении покрытия из отдельных катодов. Видно, что при нанесении покрытия из отдельных катодов имеет место

слоистая структура с чередованием микрослоев отдельных фаз покрытия TiN и ZrN, разделенных друг от друга переходными микрослоями переменного состава $(Ti_x, Zr_{1-x})N$.

Изменяя компоновочную схему установки, можно получить различное сочетание микрослоев TiN, ZrN и $(Ti_x, Zr_{1-x})N$ и их толщин и тем самым влиять на такие свойства покрытия, как микротвердость, прочность сцепления с инструментальной основой и др. Поэтому многоэлементные покрытия одной и той же системы (например Ti–Zr), полученные при различных компоновочных схемах установки, будут иметь разные механические свойства и, соответственно, работоспособность РИ будет различна. Механические свойства покрытий зависят также от технологии их нанесения. Сравнение данных показывает, что структурные параметры и механические свойства покрытий одной системы, например Ti–Zr, нанесенных из отдельных и составных катодов, различны, что объясняется действием различных механизмов упрочнения материала покрытий при конденсации их по указанным технологиям. Такое различие свойств покрытий отражается на работоспособности РИ, которая ниже для РИ с покрытиями, полученными из составных катодов. На основе выявленного механизма изменения свойств материала покрытия при его легировании разработаны составы многоэлементных покрытий, в том числе легированных железом, алюминием, кремнием (покрытия $(Ti, Fe)N$, $(Ti, Al)N$, $(Ti, Si)N$). Данные покрытия позволяют увеличить период стойкости РИ при обработке заготовок из конструкционных материалов в 2–3 раза по сравнению с покрытиями на основе нитрида титана.

Еще большие возможности открываются при изменении состава покрытий на основе нитридов бинарных систем путем их легирования. Механизм влияния легирующих элементов на нитриды одно- и двухэлементных систем одинаков, однако получаемые нитриды трехэлементных систем типа $(Ti, Me_1, Me_2)N$ (где Me_1, Me_2 – Al, Zr, Si, Mo, Cr, Fe) имеют

более высокие механические свойства.

С увеличением содержания второго легирующего элемента изменяются структурные параметры и механические свойства покрытий бинарных систем, при этом влияние различных элементов на них различно.

Выявленные закономерности изменения свойств покрытий на основе нитридов бинарных систем (Ti, Al)N, (Ti, Zr)N, (Ti, Si)N при их легировании позволили разработать гамму покрытий на основе нитридов тройных систем – (Ti, Al, Zr)N, (Ti, Si, Cr)N, (Ti, Si, Al)N, (Ti, Zr, Si)N и др.

Применение разработанных покрытий позволяет повысить период стойкости РИ при обработке заготовок из сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т в 1,5–2 раза в зависимости от режимов резания.

Изменения свойств износостойкого покрытия можно добиться путем варьирования состава газовой среды при их конденсации. Например, осаждение в азоте и ацетилене позволяет получать карбонитридные покрытия. Изменение содержания ацетилена в составе газовой смеси отражается на структурных параметрах и механических свойствах покрытия. Изменяя это соотношение, можно направленно влиять на свойства покрытия.

На данной основе разработаны составы многоэлементных покрытий ((Ti, Zr)CN, (Ti, Al)CN, (Ti, Si)CN, (Ti, Mo)CN и др.), позволяющих дополнительно повысить период стойкости РИ в 1,5–2 раза по сравнению с покрытиями на основе нитридов аналогичного состава.

Технология комбинированной упрочняющей обработки заключается в импульсной лазерной обработке износостойких покрытий, нанесенных на твердосплавную или быстрорежущую основу. Применение импульсной лазерной обработки позволяет существенно изменить структурные параметры и механические свойства покрытия – уменьшить остаточные напряжения, повысить микротвердость и прочность сцепления покрытия с инструментальной основой. Работоспособность РИ с износостойкими покрытиями после импульсной лазерной обработки по-

вышается, например, при токарной обработке заготовок из сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т в 1,5–2,5 раза в зависимости от состава покрытия и условий резания.

Технология нанесения покрытий с переходными адгезионными слоями заключается в нанесении между основным слоем покрытия и инструментальной основой переходного адгезионного слоя (ПАС), в состав которого входят элементы материалов покрытия и инструментальной основы. Применительно к быстрорежущему РИ используют ПАС, в состав которых входят титан (как элемент материала покрытия) и железо, никель и хром (как элементы материала инструментальной основы).

Переходные слои, содержащие элементы покрытия с инструментальной основой, обеспечивают снижение остаточных напряжений, повышение прочности сцепления покрытий с инструментальной основой и в конечном итоге уменьшение интенсивности изнашивания РИ. По данной технологии разработаны двух- и трехслойные покрытия на основе TiN, (Ti, Zr)N, (Ti, Mo)N и (Ti, Al)N (рис. 4.10), применение которых по сравнению с однослойными покрытиями, нанесенными по традиционной технологии, позволяет повысить период стойкости РИ в 1,6–4,2 раза в зависимости от состава переходного слоя, конструкции покрытия и условий обработки резанием.

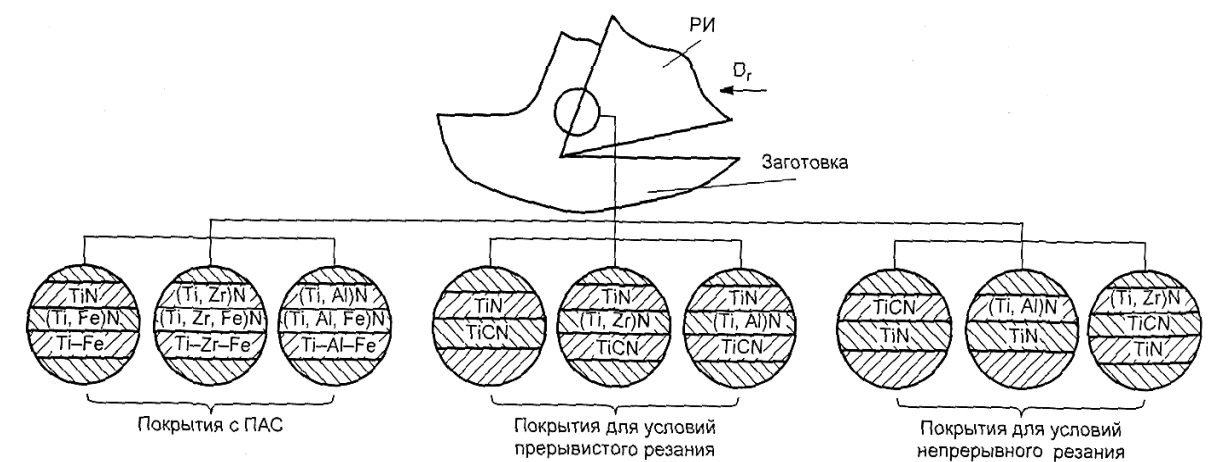


Рис. 4.10. Схемы конструкций многослойных покрытий

В двухслойных покрытиях в качестве ПАС используются нитриды, в состав которых входят элементы покрытия и железо (например, (Ti, Fe)N или (Ti, Zr, Fe)N), в трехслойных – имеются два ПАС: на основе сложного нитрида (например (Ti, Zr, Fe)N), расположенного под верхним слоем покрытия, и на основе чистых металлов (например Ti–Zr–Fe), примыкающего к инструментальной основе.

Технология нанесения многослойных покрытий. Конструкция многослойного покрытия определяется условиями резания, в которых находятся контактные площадки РИ. Рассмотрим технологию нанесения многослойных покрытий для РИ, работающих в условиях прерывистого и непрерывного резания. При прерывистом резании (например при торцевом фрезеровании) разрушение покрытия происходит путем образования и роста трещин в результате колебания тепловых и силовых нагрузок на контактных площадках РИ. Для сдерживания процессов образования и роста трещин необходимо использовать покрытия, обеспечивающие минимальную амплитуду колебания температуры за время рабочего и холостого ходов РИ. С другой стороны, для сдерживания процессов трещинообразования покрытия должны иметь высокий уровень сжимающих остаточных напряжений. Наибольшее снижение температур и наименьшую амплитуду их колебания обеспечивают одно- и многоэлементные покрытия на основе нитридов по сравнению с соответствующими типами покрытий на основе карбонитридов (например, TiN и TiCN или (Ti, Zr)N и (Ti, Zr)CN), а также одноэлементные покрытия на основе нитридов по сравнению с многоэлементными покрытиями на основе нитридов и карбонитридов (например, TiN и (Ti, Zr)N или TiN и (Ti, Zr)CN). Наибольшие сжимающие напряжения в материале покрытий в процессе резания и во время холостого хода характерны для одноэлементных и многоэлементных покрытий на основе карбонитридов по сравнению с покрытиями аналогичного типа на основе нитридов (например, TiCN и TiN или (Ti, Zr)CN и (Ti,

Zr)N), а также для многоэлементных покрытий на основе нитридов и карбонитридов по сравнению с одноэлементными покрытиями аналогичного типа (например, Ti, Zr)N и TiN или (Ti, Zr)CN и TiCN). Следовательно, многослойное покрытие для условий прерывистого резания должно иметь минимум два слоя: верхний слой, непосредственно контактирующий со стружкой, должен отвечать за тепловое состояние режущего клина РИ и обеспечивать максимальное снижение контактных температур и минимальную амплитуду их колебаний за время рабочего и холостого ходов. Это позволит снизить напряжения в режущем клине инструмента и амплитуду их колебания и увеличить время работы РИ до начала образования трещин как в покрытии, так и режущем клине РИ. Нижний слой, прилегающий к инструментальной основе, должен сдерживать процессы распространения трещин как на границе покрытие–инструментальная основа, так и в самом покрытии и иметь высокий уровень сжимающих остаточных напряжений для формирования в покрытиях в процессе резания больших сжимающих напряжений.

Разработанные по данной технологии двухслойные покрытия из нитридов и карбонитридов титана позволили повысить период стойкости твердосплавных пластин при фрезеровании заготовок из сталей 5ХНМ и 12Х18Н10Т в 1,5–3 раза .

Повышение трещиностойкости многослойного покрытия можно обеспечить путем нанесения промежуточного слоя, в качестве которого используют многоэлементные покрытия сложного состава, полученные из отдельных катодов и имеющие слоистую структуру, состоящую из отдельных фаз покрытия и слоев сложного состава. Повышению трещиностойкости многослойного покрытия в целом будут способствовать появление дополнительных границ между отдельными его слоями и высокий уровень сжимающих остаточных напряжений, характерный для многоэлементных покрытий. Оценка механических свойств однослойных покрытий

с позиций теории разрушения хрупких материалов позволила предложить конструкции трехслойных покрытий, у которых в качестве промежуточного слоя используют сложные нитриды (например, $(\text{Ti}, \text{Zr})\text{N}$, $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$ и др.). Для разработанных трехслойных покрытий характерны более высокие трещиностойкость, микротвердость и прочность сцепления с инструментальной основой. Число циклов до образования трещин и разрушения таких покрытий увеличивается в 1,5 раза по сравнению с двухслойным покрытием, а период стойкости РИ – в 1,6 раза по сравнению с двухслойным и в 3 раза – по сравнению с покрытием TiN .

Разрушение покрытий при непрерывном резании, например при токарной обработке, также происходит в результате образования трещин, но причина их возникновения другая, чем при прерывистом резании, – это склонность режущего клина РИ к упругопластическим прогибам и потеря его формоустойчивости. Повышение формоустойчивости режущего клина РИ могут обеспечить покрытия, нанесение которых способствует снижению в режущем клине эквивалентных напряжений и имеющие высокий уровень сжимающих остаточных напряжений. Максимальное снижение эквивалентных напряжений и высокий уровень сжимающих остаточных напряжений обеспечивают многоэлементные покрытия на основе нитридов и карбонитридов по сравнению с одноэлементными покрытиями аналогичного типа (например, $(\text{Ti}, \text{Zr})\text{N}$ и TiN или $(\text{Ti}, \text{Zr})\text{CN}$ и TiCN), а также многоэлементные карбонитридные по отношению к одноэлементным нитридным и карбонитридным, а также одноэлементные карбонитридные к нитридным (например, $(\text{Ti}, \text{Zr})\text{CN}$ и TiCN или $(\text{Ti}, \text{Zr})\text{CN}$ и TiN или TiCN и TiN). В то же время наибольшую прочность сцепления с инструментальной основой имеют нитридные покрытия по сравнению с карбонитридными аналогичного состава (например, TiN и TiCN или $(\text{Ti}, \text{Zr})\text{N}$ и $(\text{Ti}, \text{Zr})\text{CN}$). Следовательно, преимущества различных покрытий могут быть реализованы только в многослойном покрытии, которое по аналогии с

многослойным покрытием, работающим в условиях прерывистого резания, также должно иметь минимум два слоя. Верхний слой покрытия должен обеспечить максимальное снижение эквивалентных напряжений в режущем клине РИ для повышения его формоустойчивости за счет благоприятного распределения контактных нагрузок. Это позволит увеличить время работы РИ до начала образования трещин и иметь высокий уровень остаточных сжимающих напряжений для обеспечения в покрытии в процессе резания высоких нормальных сжимающих напряжений, снижающих интенсивность процессов трещинообразования. Нижний слой, непосредственно контактирующий с инструментальной основой, должен обеспечить необходимую прочность адгезионной связи покрытия с РИ. На основе данного подхода разработана технология нанесения двухслойных покрытий с внешним слоем из нитридов сложного состава $(\text{Ti}, \text{Zr})\text{N}$, $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$ и TiCN и нижним слоем из TiN , а также трехслойные – с промежуточным слоем TiCN и нижним слоем TiN . Применение разработанных многослойных покрытий повышает работоспособность твердосплавного РИ в 1,5 и 2,5 раза по сравнению с пластинами, имеющими покрытие TiCN и TiN соответственно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов, Б. А., Волков, Ю. С., Дрожалова, В. И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов.: учебное пособ. /под ред. В. П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983.
2. Бирюков, Б. Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков. – М.: Машиностроение, 1981.
3. Мороз, И. И. Электрохимическая обработка металлов / И. И. Мороз. – М.: Машиностроение, 1969.
4. Попилов, Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов / Л. Я. Попилов. Справочник. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982.
5. Волосатов, В. А. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки/В. А. Волосатов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988.
6. Немилов, Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов /Е. Ф. Немилов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 164 с:
7. Немилов, Е. Ф. Электроэрозионная обработка материалов :учебник для ПТУ/Е. Ф. Немилов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 160 с. ил.
8. Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки . – М. Машиностроение. – 2005. – 511 с.
9. Фотеев, Н. К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с. ил. – (Б-ка технолога)

Учебное издание

Юрий Николаевич **Полянчиков**
Александр Георгиевич **Схиртладзе**
Алла Николаевна **Воронцова**
Мария Юрьевна **Полянчикова**
Марина Александровна **Тибиркова**
Юрий Иванович **Сидякин**
Алла Александровна **Кожевникова**

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

Редактор *А. К. Саютина*
Темплан 2015 г. Поз. № 202
Подписано в печать 29.06.2015 Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times.
Усл. печ. л. 13,95 Уч.-изд. л. 11,72 Тираж 100 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет
400005, Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 1

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400005, Волгоград, просп. В.И. Ленина, 28, корп. 1