

**И. И. Хафизов**

## ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОГО УПРОЧНЕНИЯ

*Ключевые слова:* комбинированное упрочнение, шероховатость, расчет, электрохимическая обработка.

*В рамках использования механического упрочнения изделий для достижения высоких эксплуатационных показателей деталей требуется получить низкую шероховатость поверхностного слоя. Применение способа комбинированного упрочнения позволяет поддерживать низкую высоту неровностей обработанного поверхностного слоя.*

*Keywords:* the combined hardening, roughness, calculation, electrochemical processing.

*Within use of mechanical hardening of products for achievement of high operational rates of details it is required to receive a low roughness of a blanket. Application of a way of the combined hardening allows to support the low height of roughnesses of the processed blanket.*

### Область использования

Механическое упрочнение нашло использование практически во всех отраслях машиностроения. При этом, наряду с целенаправленным изменением механических характеристик материала изделия, достигаются другие цели (формообразование листовых материалов, изменение шероховатости поверхностного слоя, легирование, и др.), которые отвечают различным технологическим задачам, однако все рассматриваемые приемы вносят изменения в свойства поверхностного слоя и находят использование в промышленности.

В технике нашли наибольшее применение технологические процессы вибрационной обработки на следующих операциях:

1. Для очистки деталей и заготовок от окалины и нагара. Основой вибрационной очистки является процесс механико-химического разрушения, растворения слоя окалины и удаления его с поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. Химические вещества оказывают разрыхляющее и расклинивающее действие на обрабатываемую поверхность, ослабляя в данном случае связь слоя окалины с основным металлом и облегчая разрушение её за счет механического воздействия частиц рабочей среды.

2. На операциях удаления заусенцев. Скругление и полирование происходит в результате микрорезания, сопровождаемого съемом мельчайших частиц металла и его окислов и тонким пластическим деформированием поверхностного слоя обрабатываемой заготовки.

3. Для удаления облоя. Обламывание облоя происходит под действием отдельных микроударов частицами рабочей среды, с последующей зачисткой в результате микрорезания и истирания указанных элементов обрабатываемой заготовки.

4. На операциях вибрационного шлифования. Формирование микрорельефа поверхностного слоя осуществляется благодаря нанесению на обрабатываемую поверхность множества микроударов частицами рабочей среды. Вследствие этого, на поверхностном слое детали появляется большое число следов обработки в виде кратерообразных углублений и царапин, расположенных под различными углами друг к другу.

5. Для полирования и глянцеваания деталей в среде металлических тел (например, в среде стальных полированных шариков различных размеров) - осуществляется за счет пластического деформирования элементарных участков обрабатываемого поверхностного слоя, что определяет возможность изменения микрорельефа. Интенсивность протекания процесса зависит от амплитуды, частоты колебаний, веса частиц рабочей среды, а также площади контакта частиц с элементами обрабатываемого поверхностного слоя.

6. На отделочно-упрочняющих операциях. Виброобработка применяется с целью изменения поверхностной микротвердости и остаточных напряжений. Основой процесса является динамический характер его протекания, сопровождаемый множеством микроударов частиц рабочей среды по поверхностному слою обрабатываемых заготовок и обеспечивающий пластическое деформирование поверхностного слоя. Это повышает микротвердость, способствует образованию сжимающих остаточных напряжений и уменьшает шероховатость поверхностного слоя [6].

Однако многолетний опыт использования вибрационного оборудования показал, что наклеп поверхностного слоя без учета изменения свойств контактных поверхностей не создает предельной возможной величины усталостной прочности и долговечности деталей и может существенно снизить уже достигнутый показатель чистоты поверхностного слоя, что также ухудшает эксплуатационные свойства изделий [1].

### Технологические схемы и возможности комбинированного упрочнения

Виброабразивная обработка зависит от характера применяемой обрабатываемой среды. Она представляет собой механический или механохимический процесс съема металла или его окислов с поверхностного слоя обрабатываемых деталей, а также сглаживания микронеровностей путем их пластического деформирования частицами обрабатываемой среды, совершающими в процессе обработки различные движения.

В процессе вибрационной обработки детали подвергаются различным видам воздействия. Однако преобладающим воздействием является механическое (от соударения деталей между собой и частицами абразива). Другие виды воздействия на детали (тепловое, электрическое, энергия магнитного поля и химических реакций) имеют вспомогательное значение, усиливая основной вид воздействия.

Сила взаимодействия частиц рабочей среды с обрабатываемой заготовкой зависит от многих условий (технологических режимов, механических свойств рабочей среды, конструктивных особенностей оборудования и т.д.).

Аналогичные схемы упрочнения известны по [2] для дробеструйной обработки потоком гранул, ротационной раскаткой и другими методами. Каждой из этих схем присущи определенные недостатки. К ним относятся нестабильные показатели наклепа, что заставляет проводить предельное упрочнение, создающее для различных участков детали нестабильные свойства и снижающие теоретически достижимый предел выносливости. За счет перенаклепа возрастает шероховатость поверхностного слоя, что негативно сказывается на выносливости изделия.

Виброабразивная электрохимическая обработка характеризуется наложением на рабочее пространство базовой схемы виброабразивной обработки электрохимического процесса (ВиЭХО) Соответственно обычная технологическая жидкость заменяется электролитом. Процесс сопровождается комплексным воздействием на обрабатываемую поверхность электрохимического растворения поверхностного слоя материала заготовки и механического разрушения с последующим удалением продуктов растворения и разрушения. При этом достигается повышение интенсивности съема металла (материала) и производительности процесса. Обработке могут подвергаться как закрепленные и ориентированные заготовки, так и свободно-загруженные.

Под действием электрического тока и электролита на поверхностном слое заготовок образуется пленка с высоким сопротивлением, прочность которой меньше прочности основного материала. В результате вибрационного воздействия частицы абразива разрушают оксидную пленку и удаляют часть металла на заготовке.

Механизм электрохимического съема металла при ВиАЭХО заключается в обработке большого количества заготовок - биполярных электродов, расположенных в пространстве между основными электродами и образующих электрохимические ячейки. В процессе электрохимического воздействия при большом межэлектродном расстоянии и малой плотности тока в электролитах из нейтральных солей анодное растворение происходит с образованием на поверхностном слое детали пассивной пленки, которая приводит к пассивации обрабатываемого поверхностного слоя. Растворение при этом происходит крайне медленно, и этой величиной за малый промежуток времени можно пренебречь. Тогда растворение может наступить лишь при удалении пленки со всего поверхностного слоя или ее части. Исходя из этого, съем металла за счет электрохимического растворения определя-

ют с локального поверхностного слоя, образованной в результате удара абразивной гранулы, приводящего к удалению пассивной пленки.

Формирование шероховатости поверхностного слоя зависит от механического режима обработки, но в значительной мере определяется и электрохимическими параметрами. В настоящее время при обработке углеродистых конструкционных сталей используется электролит на основе хлористого натрия.

Упрочнение позволяет изменить физико-технические характеристики поверхностного слоя, предел выносливости, шероховатость.

### **Моделирование процессов упрочнения**

Наиболее полно модель упрочнения и формирования поверхностного слоя изложена в монографии [2].

Исследования ударных процессов в условиях вибрационной обработки, проводимые при помощи скоростной киносъемки, тензометрических и пьезометрических устройств, подтверждают идентичность характера этих процессов единичному удару. Отсюда следует, что вибрационную обработку можно рассматривать как процесс, в основе которого лежит большое число элементарных соударений, а единичный удар является главным элементом при изучении механизма процесса обработки. Закономерности единичного удара в значительной мере определяют и раскрывают сущность процесса и его технологические характеристики.

Форма гранул обычно принимается сферической, так как какой бы она ни была первоначально, в процессе обработки острые углы гранулы округляются. В результате частицы абразива практически ударяются об обрабатываемую поверхность сферическим участком некоторого радиуса. Абразивная гранула рассматривается абсолютно жесткой.

### **Анодное растворение с абразивным удалением припуска**

При совместном использовании анодного растворения металла с воздействием абразива удаление припуска происходит под действием механического шлифования и одновременного растворения материала электрическим током. Благодаря перемещению абразивных зерен относительно поверхности заготовки происходит интенсивное удаление продуктов анодного растворения из зоны обработки, что способствует стабилизации процесса и повышению его технологических показателей. Такой метод называют электроабразивной обработкой. Различают несколько разновидностей его использования: а) абразивонесущим токопроводящим инструментом, б) электронейтральным инструментом и свободным абразивом. В первом случае инструмент имеет форму кругов, брусков, применяемых при механическом шлифовании или повторяющих форму обрабатываемых участков детали. Однако во всех случаях связка должна быть электропроводной. Различают

электроабразивную и электроалмазную обработки [3]

Комбинированные методы обработки направлены на интенсификацию процесса анодного растворения. Скорость съема металла и точность формообразования при ЭХО зависят от того, насколько быстро будет идти реакция перехода материала заготовки в шлам. Скорость анодного растворения ограничивается наличием пленки, пассивирующей поверхность, и толщиной диффузионного слоя, которые преодолевают удаляемые продукты обработки.

При электроабразивном шлифовании твердые частицы (абразивные зерна или наполнитель) удаляют пленку, активируя тем самым процесс ЭХО. Размеры абразивных зерен, определяющие межэлектродный зазор, как правило, не превышают десятых долей миллиметра. При таких малых зазорах плотность тока будет значительно больше, чем в случае размерной электрохимической обработки. Резко возрастает скорость съема металла в зоне действия абразивных зерен инструмента. Кроме того, часть припуска удаляется механическим шлифованием. В отличие от обычного шлифования при анодно-абразивной обработке на поверхности заготовки не образуется более прочный наклепанный слой, а производительность шлифования повышается. Следовательно, интенсивность съема металла при анодном растворении возрастает вследствие механического удаления пассивирующей пленки и ускорения процесса выноса продуктов обработки из промежутка, а электрохимическое растворение части металла, в свою очередь, способствует повышению скорости механического шлифования. Кроме указанных составляющих съема при малых зазорах может иметь место электроэрозионный процесс. Таким образом, при малых размерах зазора часть металла заготовки удаляется за счет электрической эрозии [4].

### **Производительность**

Все комбинированные методы ускоряют процесс съема металла. При черновых режимах электроабразивной обработки съем металла происходит в основном за счет эрозии. Процесс близок к электроэрозионному.

Черновая обработка выполняется при повышенных напряжениях. При чистовых режимах съем металла абразивными зернами и эрозией снижается, но возрастает доля анодного растворения.

Если электроабразивное или электроалмазное разделение выполняется периферией круга, то скорость съема металла находят через силу тока  $I$  и напряжение  $U$  на электродах.

При использовании электронейтрального инструмента скорость съема возрастает из-за анодного растворения и, главное, из-за интенсификации процесса резания абразивным инструментом. Поэтому расчет производительности выполняют, как при шлифовании, а влияние тока учитывают коэффициентом, который может изменяться в широких пределах и зависит от свойств обрабатываемого материала.

Производительность процесса электроабразивной обработки с применением свободного абразива или наполнителя в несколько раз выше, чем при аналогичных операциях механической обработки. При использовании свободного абразива в схеме шлифова-

ния скорость съема металла находят по зависимостям обработки электронейтральным инструментом. Если обрабатывают удаленные от электрода с твердым токоведущим наполнителем участки поверхности, то производительность возрастает в десятки раз по сравнению с анодным растворением без наполнителя [3].

### **Варианты снижения расходов при их разделении комбинированными методами**

1. Применение анодной составляющей в комбинированном процессе значительно снижает силы резания от механического воздействия при разделении материалов, что позволит ускорить процесс без нарушения точности и качества поверхностного слоя.

2. Управление комбинированным процессом разделения материала возможно за счет изменения анодной составляющей в широких пределах, что даст снижение сил резания и исключит дефекты (сколы, заусенцы) на выходе из зоны резания инструмента для любых материалов.

3. Управление комбинированным процессом возможно независимым изменением параметров химической и механической составляющей с ограничениями их предельных значений. Целью управления может стать оптимизация техно-логических режимов, объединяющая все составляющие комбинированного процесса.

4. Управление процессом возможно при использовании адаптивных систем, работающих по известному механизму взаимодействия элементов технологической системы с ограничениями по предельной погрешности поверхности разделения материала и допустимой микрошероховатости.

5. Адаптивные системы оборудования позволяют осуществлять обратные связи и выполнять оперативную корректировку режимов по выбранным воздействиям в зависимости от свойств разделяемого материала и требований к изделию.

6. Управление точностью разделения возможно через поддержание требуемого положения режущей кромки нежесткого инструмента внешними воздействиями, управляемыми автоматически [5].

Опыт использования механического упрочнения изделий однозначно показал, что для достижения высоких эксплуатационных показателей деталей требуется получить стабильный расчетный наклеп и низкую шероховатость поверхностного слоя. Однако с повышением интенсивности воздействия гранул на обрабатываемый поверхностный слой возрастает шероховатость, что снижает усталостную прочность материала детали. Продукты обработки периодически осаждаются на гранулы и изменяют контактные силы при упрочнении, следовательно, нарушают стабильность наклепа. Все известные способы механического упрочнения не позволяют стабилизировать в оптимальном (достаточно узком) диапазоне степень наклепа и поддерживать низкую высоту неровностей обработанного поверхностного слоя. Решение этих вопросов требует использования комбинированных видов воздействия, где наряду с механическим упрочнением гра-

нулами со стабильными свойствами поверхностного слоя накладывают электрическое поле, обеспечивающее протекание анодного растворения микронеровностей на поверхностном слое заготовки и активную очистку гранул от продуктов обработки.

При упрочнении деталей единая задача повышения качества поверхностного слоя для достижения предельной выносливости материалов изделий машиностроения решается раздельно путем получения предельного наклепа поверхностного слоя или снижения высоты неровностей в то время как для каждой марки и состояния материала необходимо получить вполне определенное значение степени наклепа и минимальную величину шероховатости.

Регулированием съема металла с поверхностного слоя заготовки можно получить в металле оптимальную стабильную степень наклепа, обеспечивающую предел выносливости изделия, близкий к теоретически достижимому. При этом снимаются ограничения по рассеиванию результатов за счет технологической наследственности, что дает наибольший положительный эффект при упрочнении высоконагруженных деталей.

При комбинированном упрочнении удается управлять технологической наследственностью и достичь стабильного знака и величины остаточных напряжений.

В общем случае расчет технологических режимов выполняется в следующей последовательности:

1) Анализируют технологические требования со стороны заказчика и выбирают параметры процесса, определяющие достижение требуемых показателей.

2) Проводят отработку технологичности заготовки с учетом эффективного использования комбинированного процесса упрочнения.

3) Подбирают по рекомендациям, приведенным в работе, фазы рабочей среды (состав, содержание, условия применения).

4) Рассчитывают время обработки и напряжение на электродах для получения либо оптимального наклепа, либо минимальной шероховатости. Если требуется выровнять припуск, то рассчитывают режимы обработки для каждого этапа процесса.

5) Рассчитывают или принимают по рекомендациям главы 4 режимы для очистки рабочей среды (период подачи жидкости, напряжение на электродах в период очистки и др.) [6].

Управление комбинированным процессом упрочнения возможно по единому алгоритму, объединяющему режимы механического перемещения рабочей среды и электрические параметры процесса.

### Выводы

При упрочнении деталей единая задача повышения качества поверхностного слоя для

достижения предельной выносливости материалов изделий машиностроения решается раздельно путем снижения высоты неровностей, в то время как для каждой марки и состояния материала необходимо получить минимальную величину шероховатости. Решение этой проблемы возможно при условии стабилизации свойств контактных пар "рабочая среда – заготовка" и создании путей управления технологическими режимами упрочнения с обратной связью, осуществляемой при наложении электрического поля. Выполненные ранее исследования комбинированного упрочнения с подачей тока преследовали цель, в основном, повысить скорость съема материала с заготовки, но не решить главную задачу процесса – повышение выносливости конструктивных элементов машин до предельного значения. Последнее открывает возможность повысить удельные нагрузки на конструкцию, снизить массу, применять недефицитные, доступные материалы.

Для товаров народного потребления необходимы изделия с поверхностью, имеющей высокую чистоту, что при традиционных методах механического упрочнения не всегда достижимо и требует дополнительных затрат на последующие операции. Наложение электрического поля ускоряет выравнивание поверхностного слоя, при этом наклеп поверхностного слоя при упрочнении способствует повышению чистоты заготовки.

### Литература

1. Смоленцев В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей. М: Машиностроение, 1978. 176 с.
2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов на Дону: ДГТУ, 1999. 624 с.
3. Хафизов И.И. Инновационная модель и способы комбинированного малоотходного разделения токопроводящих материалов/ И.И. Хафизов// Вестн. Казан. технол. ун-та – 2013. – Т16. № 1. – С. 212-216.
4. Хафизов И.И. Технологические приемы с наложением электрического поля при малоотходном разделении материалов/ И.И. Хафизов// Вестн. Казан. технол. ун-та – 2012. – Т15. № 18. – С.31-36.
5. Хафизов И.И. Пути снижения расхода материалов при их разделении комбинированными методами/ И.И. Хафизов// Вестн. Казан. технол. ун-та – 2013. – Т16. № 1. – С. 208-211.
6. Газизуллин Р.М. Разработка процесса и оборудования для стабилизации свойств поверхностного слоя при упрочнении с наложением тока.: дисс. канд. техн.наук: 05.03.01/ Газизуллин Рустем Мирбатович. Казань, 2004 – 130 с.