

## СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

И.Л. Поболь

Физико-технический институт НАН Беларуси, ул. Купревича, 10, 220141 Минск  
Тел. (375 17) 287 07 39, e-mail: [e-phvs@tut.by](mailto:e-phvs@tut.by)

На основании теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности влияния параметров электронно-лучевого (ЭЛ) воздействия на характер температурного поля в материале и реализуемые при этом технологические процессы. Создана концепция управления ими формированием требуемого температурного поля в заготовке путем варьирования параметрами потока электронов с использованием модернизированного серийного оборудования. Показано, что обработка металлов и сплавов в режимах оплавления, закалки, наплавки, нагрева изделий с предварительно нанесенными покрытиями приводит к рафинированию, формированию новых структурно-фазовых состояний, упрочнению материалов и обеспечивает придание деталям из сталей и сплавов титана таких сочетаний свойств, которые сложно получить иными методами объемного и поверхностного упрочнения. ЭЛ нагрев позволяет изготавливать высокопрочные неразъемные соединения однородных («металл-металл») и разнородных («СТМ-металл») материалов.

### Введение

Процессы модифицирования свойств поверхности металлических изделий, а также получения неразъемных соединений являются приоритетными направлениями создания перспективных технологий. Принципиально новые возможности открывает использование концентрированных потоков энергии, в том числе электронно-лучевого (ЭЛ) воздействия. За последние годы в значительной степени раскрыты особенности ЭЛ переплава, сварки, испарения металлов с осаждением покрытий. Изучаются методы поверхностной закалки сплавов. Однако их промышленное применение требует теоретического и экспериментального изучения процессов взаимодействия луча с материалами, особенностей структурно-фазовых превращений.

В последние годы проводятся исследования, направленные на разработку комбинированных вариантов упрочнения с применением концентрированных потоков энергии. Однако перспективы использования ЭЛ нагрева для создания таких методов в литературе практически не изучены, отсутствуют модели формирования поверхностных и переходных слоев при нанесении покрытий на основу. Возможности получения соединений сверхтвердых материалов (СТМ) с основой ЭЛ нагревом не исследованы, модели получения таких соединений отсутствуют.

### Направления исследований

При реализации методов ЭЛ модифицирования материалов, в зависимости от условий эксплуатации изделий, может проводиться поверхностное упрочнение без изменения химического состава материала основы (стали, титанового сплава и др.), а также с одновременным или предварительным нанесением на основу слоя с отличным от основы химическим составом.

При получении неразъемных соединений могут быть получены такие детали, которые, будучи изготовленными из однородных (например, из одной марки стали) или разнородных материалов (детали из разных марок стали или узлы «керамика – металл»), способны противостоять интенсивным внешним воздействиям [1-2].

Применяемое для проведения этих процессов оборудование, с одной стороны, - дорогостоящее, а с другой - универсальное. Основными параметрами обработки, которые в совокупности формируют температурное поле в заготовке и определяют характер реализуемого процесса, являются ускоряющее напряжение  $U$ , ток луча  $I$ , удельная мощность  $q$  в месте воздействия луча на материал, длительность нагрева  $t$  или скорость перемещения луча  $V$ . При этом для реализации конкретного метода обработки затрачивается некоторое количество энергии, передаваемой заготовке лучом, что определяется энергозатратами  $Q$ . В таблице представлены и расположены в порядке возрастания характерных значений  $Q$  для обработки одного изделия основные направления выполняемых в ФТИ НАН Беларуси исследований.

### Методы инженерии поверхности

К инженерии поверхности первого поколения относятся исследования по применению ЭЛ нагрева для рафинирующего оплавления металлов, упрочнения в режимах закалки при скоростном нагреве поверхностного слоя без и с оплавлением поверхности. При реализации этих методов не происходит изменения химического состава модифицируемого материала. Использование комбинации двух или большего количества разнородных вариантов упрочнения свидетельствует о становлении в настоящее время инженерии поверхности второго поколения.

### Рафинирующее оплавление

Разработаны методы расчета оптимальных режимов ЭЛ поверхностного нагрева и оплавления металлических заготовок, исследовано влияние технологических параметров на характер температурного поля в обрабатываемом изделии, разработаны технологические процессы оплавления и поверхностного упрочнения.

Оплавление инструментальных сталей горячего деформирования снижает суммарное количество неметаллических включений. После гомогенизирующего и вторичного отжига и ЭЛ закалки с самоотпуском достигнуто измельчение зерна и выравнивание концентрации элементов в материале. Твердость на HRC 2-3 больше по сравнению

нию с максимальной твердостью этих сталей после объемной закалки. Теплопроводность после рафинирования повышена на 13-49%, что улучшает их эксплуатационные свойства.

Разработаны методы изготовления новых и регенерации изношенных мишеней из чистых Ti, Zr, Mo, сплавов Ti с Cr, Al и Zr для магнетронных и дуговых систем вакуумного распыления. Суммарная загрязненность материала примесями после рафинирования снижена в 70 раз, обеспечена очистка от газов и элементов с высоким давлением пара.

### Закалка поверхности

Скоростной ЭЛ нагрев поверхностей изделий из сталей, титановых сплавов и чугунов в режимах закалки без оплавления и с оплавлением поверхности приводит к дифференцированному упрочнению материала (что связано с распределением температуры от поверхности в глубь детали), к формированию в поверхностном слое новых структурных состояний. Особенностью закалки является применение высоких скоростей нагрева ( $10^3$ - $10^5$  °C/c), что обеспечивает высокие скорости самоохладения материала. Это требует использования плотности энергии  $10^2$ - $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, однако энергозатраты при этом невелики [1].

Толщина упрочненного слоя при закалке из твердого состояния изделий с сечением 5-50 мм в зависимости от энергетических и временных параметров составляет 0,1-2 мм, при длительном (10 – 30 с) нагреве достигается повышенная глубина слоя (до 3,5 - 5 мм с твердостью, превышающей HRC 45). На структуру, глубину закалки, качество поверхности и свойства изделия большое влияние оказывают исходное структурное состояние материала и технологические параметры нагрева. Степень упрочнения составляет 3,6-3,7 для исходно отожженных сталей и 1,5-1,7 для предварительно объемно закаленных. Твердость конструкционных, инструментальных и подшипниковых сталей достигает HRC 65-68. В результате скоростного нагрева и охлаждения зерна измельчаются, карбидная неоднородность сталей снижается от 5-6 до 2-3 баллов. На порядок возрастает плотность дислокаций по сравнению с объемной закалкой. Разработан инженерный метод выбора оптимальных параметров непрерывно-последовательной закалки.

Закалка высокопрочных чугунов с оплавлением приводит к формированию мелкодисперсной квазиледебуритной структуры с цементитным слоем высокой дисперсности и сниженным содержанием несвязанного графита. Толщину упрочненного слоя можно варьировать в пределах 0,5-5 мм и выше. Высокая микротвердость (16 - 17 ГПа) вблизи поверхности связана с изменением фазового состава, увеличением мелкодисперсной цементитной составляющей, более равномерным распределением легирующих элементов в аустените. Износостойкость чугунов в условиях трения о жестко закрепленные абразивные частицы возрастает в 3,5-10 раз по сравнению с износостойкостью в литом и закаленном (путем объемной закалки) состояниях.

### Методы инженерии поверхности второго поколения

Эти методы связаны с изменением химического состава материала – наплавкой на основу износостойкого, коррозионностойкого или антифрикционного материала, осаждением покрытий, позволяющих повысить одну или несколько эксплуатационных характеристик изделия. Применение комбинации ЭЛ воздействия обеспечивает получение комплекса характеристик упрочненного изделия, которые невозможно получить с применением традиционных методов упрочнения. В этом направлении в ФТИ НАН Беларуси проведены и продолжаются исследования по теоретическому и экспериментальному моделированию методов нанесения многофункциональных слоев на основу из сталей и титановых сплавов, изучению структурно-фазовых превращений в них.

Предложены модели ЭЛ наплавки покрытия заданного состава на детали в форме пластины и диска конечных размеров с учетом усадки порошкового слоя на основу из стали, а также формирования покрытия в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в процессе термической обработки материала движущимся источником энергии. Решена задача о расчете температурного поля в двухслойной пластине, обрабатываемой движущимся источником с энергией, распределенной по заданному закону. Путем наплавки решены проблемы нанесения на стали и титановые сплавы износостойких и антифрикционных материалов.

ЭЛ обработка предварительно нанесенных покрытий (электродуговых, плазменных, ХТО, электролитических и др.) приводит к благоприятным структурным и фазовым превращениям в покрытии и в основе, изменениям в свойствах осажденных слоев, релаксационным процессам в дефектном материале покрытия, формированию переходной диффузионной зоны. При оплавлении покрытия пленки расплава перекристаллизуются, устраняются поры, залечиваются дефекты структуры, уменьшается равновесная шероховатость, происходит "скругление" выступающих микронеровностей. В результате обработки повышаются прочность сцепления и плотность покрытий, что обуславливает увеличение износостойкости и других характеристик детали.

### Получение неразъемных соединений

Получение неразъемных соединений узлов из однородных (например, сталей) и разнородных материалов (СТМ с основой) связано с предыдущими направлениями. При реализации режима сварки в легированных сталях происходят процессы закалки из жидкого состояния путем отвода тепла в окружающий холодный металл с формированием закалочных структур.

ЭЛ сварка (ЭЛС) однородных материалов применяется при изготовлении деталей в большинстве отраслей промышленности (тракторной, автомобильной, приборостроения, авиационной, космической, химической, медицинской, инструментальной промышленности, металлургии, легком машиностроении, точной механике, электротехнике, электронике и др. отраслях), но исследу-

дования по оптимизации режимов ЭЛС продолжают. Однако в Беларуси, несмотря на наличие перечисленных производств, оборудование и технологии ЭЛС используются незначительно.

Несмотря на большой объем исследований, выполненных в области изучения ЭЛС, недоступна конкретная информация по изучению методов получения неразъемных соединений из разнотолщинных заготовок, разнородных, разнородных и ограниченных свариваемых сталей. Именно такие варианты изготовления узлов представляют наибольший интерес как для исследования материаловедческих следствий процесса сварки, так и для нужд производства.

Исследовано влияние основных параметров, изучены закономерности и оптимизированы условия формирования ванны расплава в стали при воздействии в режиме глубокого проплавления с соотношением глубины к ширине, превышающим 1. Применительно к шестерням и валам решена задача получения сварного шва от 5 до 50 мм. Установлено существенное влияние положения активной зоны электронного луча относительно поверхности заготовки, для получения максимального проплавления положение плоскости фокального пятна должно соответствовать 0,5-0,75 этой глубины.

Возможность получения высокотвердых износостойких слоев связана с необходимостью их механической обработки. Для лезвийной обработки высокотвердых материалов разрабатываются СТМ (КНБ и ПКА), однако не решена проблема их надежного закрепления к основе.

Пайка с ЭЛ нагревом обеспечивает высокопрочное соединение СТМ с основой. Это дает возможность применения адгезионно-активных припоев и снижения интенсивности теплового воздействия на соединяемые материалы.

Исследованы процессы, происходящие на границах разделов СТМ /припой/ основа под воздействием потока электронов и разработаны методы получения неразъемных соединений СТМ с основой. Предложены математические модели, в которых рассмотрены смачиваемость поверхности расплавом, диффузия элементов, развитие трещины вблизи границы раздела, рассчитана энергия активации атома Ti. Аналитически решена задача выбора оптимальных параметров процесса ЭЛ пайки. Проведены экспериментальные исследования по изучению смачивания различными сплавами СТМ и материалов основы, условий формирования соединений, протекания диффузионных процессов; анализу свойств соединений; исследованию распределения остаточных напряжений в СТМ и определению прочности паяных соединений; выбору оптимальных условий проведения технологического процесса. Исследования доведены до стадии изготовления лезвийного инструмента, оснащенного СТМ [2].

### Заключение

Большие экономические преимущества могут быть обеспечены при использовании модернизированных серийных ЭЛ установок для осуществления широкой гаммы методов обработки материалов путем варьирования основными параметрами источника воздействия.

### Список литературы

1. Шипко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева - Минск: Наука і тэхніка, 1995. – 280 с.
2. Алехнович В.Н., Алифанов А.В., Гордиенко А.И., Поболь И.Л. Электронно-лучевая обработка материалов - Минск: Белорусская наука, 2006. – 319 с.

Таблица - Исследуемые технологические процессы

Направления исследований	Параметры ЭЛ воздействия	Области применения
Закалка поверхности	$U = 10-60$ кВ; $q \sim 200-3000$ Вт/см <sup>2</sup> ; $t \sim 1-10$ с; $Q \sim 1 - 10$ кДж	Машиностроение, инструментальное производство
Пайка СТМ	$U = 10-60$ кВ; $q \sim 100 - 200$ Вт/см <sup>2</sup> ; $t \sim 10-120$ с; $Q \sim 10 - 20$ кДж	Инструментальное производство
Сварка	$U = 60$ кВ; $q \sim 10^4 - 5 \cdot 10^5$ Вт/см <sup>2</sup> ; $V \sim 1 - 100$ мм/с; $Q \sim 20 - 500$ кДж	Машиностроение
Наплавка, нанесение покрытий	$U = 10-60$ кВ; $q \sim 10^3 - 5 \cdot 10^4$ Вт/см <sup>2</sup> ; $t \sim 1-10$ с; $Q \sim 50 - 500$ кДж	Формирование износостойких и коррозионностойких слоев
Оплавление, переплав	$U = 10-60$ кВ; $q \sim 200-2500$ Вт/см <sup>2</sup> ; $t \sim 10-1000$ с; $Q \sim 50 - 3000$ кДж	Рафинирование металлов, получение сплавов

## STATE OF THE ART OF ELECTRON BEAM TREATMENT OF MATERIALS

Igor Pobol

Physical-Technical Institute, National Academy of Sciences, 10 Kuprevich St., 220141 Minsk  
phone (+375 17) 287 07 39, e-mail: [e-phys@tut.by](mailto:e-phys@tut.by)

Based on theoretical and experimental modeling of electron beam processes the concept of their realization has been worked out using generation of the required temperature field in a workpiece by varying the electron beam parameters. The work aim is elaboration of scientific and technological basics for electron beam processing of materials and thereby obtaining items with new properties, establishment of major mechanisms responsible for surface hardening of steels and titanium alloys, formation of one-piece steel-to-steel joints and those of super-hard materials with steels and development of new methods and high-performance technological processes.