

## СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ И ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ

*Поболь И.Л., Поболь А.И., Леонович С.С.*

Физико-технический институт НАН Беларуси, Республика Беларусь

**Введение.** Активное использование электронно – лучевой (ЭЛ) обработки материалов началось в середине 1950-ых годов для выплавки особо чистых металлов и сплавов, получения соединений сваркой ответственных изделий, нанесения покрытий испарением материалов и их осаждением и т.п. Сегодня в промышленно развитых странах мира происходит совершенствование ЭЛ оборудования и разрабатываются технологии, постоянно появляются новые разработки для применения в различных сферах. Рынок использования ЭЛ технологий составляет многие сотни миллиардов долларов. Суть всех ЭЛ технологий – улучшение, иногда значительное, свойств обработанных материалов или изделий в результате воздействия на них потока электронов, изготовление узлов и конструкций, которые другими методами не могут быть получены.

Методы ЭЛ обработки обладают целым рядом технологических преимуществ перед вариантами плавки, сварки и поверхностного воздействия, использующих другие источники энергии: высокая пространственно-временная точность и воспроизводимость подачи энергии; отсутствие окисления и обезуглероживания материала изделия; высокая надежность электромагнитной системы перемещения луча, легкая возможность автоматизации управления процессом; высокий КПД нагрева (более 75%); экологическая чистота; возможность использования одного оборудования для проведения различных технологических процессов — сварки, поверхностной закалки, плавления.

**Исследования в ФТИ НАН Беларуси.** Изучаются варианты получения неразъемных соединений одно- и разнородных материалов с помощью ЭЛ воздействия, разрабатываются методы инженерии поверхности. Имеющееся в институте ЭЛ оборудование позволяет проводить обработку образцов и изделий с размерами от нескольких миллиметров до 2-3 метров и массой до нескольких тонн. Максимальная мощность электронного луча – 30 кВт. Подготовлен высококвалифицированный научно-технический персонал.

**Получение неразъемных соединений электронно-лучевой сваркой.** ЭЛС обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 мм до десятков и сотен миллиметров. Плотность энергии в луче (до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) превышает плотность энергии сварочной дуги на два–пять порядков. Такая концентрация энергии, достигаемая в сварочных электронных пушках, делает возможным сварку с недостижимым для электродуговых методов отношением глубины к ширине проплавления (до 50 : 1). Узкий шов, параллельность его границ и малая протяженность зоны термического влияния обуславливают незначительные линейные и угловые деформации свариваемых изделий.

В институте исследовано влияние основных параметров ЭЛ воздействия, изучены закономерности и оптимизированы условия формирования ванны расплава в сталях, сплавах меди и алюминия, чистого ниобия при воздействии в режимах сварки в широком диапазоне геометрических параметров - от листовых материалов толщиной порядка миллиметра до глубокого проплавления массивных изделий. Размеры, конфигурация и качество формирования швов при ЭЛС определяются устойчивостью, формой и размерами парового канала сварочной ванны, которые, в свою очередь, зависят от мощности, эффективного радиуса, угла сходимости луча, положения фокального пятна луча, пространственного положения стыка, теплофизических свойств металла и скорости сварки.



Применительно к характерным изделиям машиностроения Беларуси (шестерням и валам) решена задача получения сварного шва глубиной 5 - 35 мм (рис. 1). Установлено существенное влияние на глубину ванны положения активной зоны электронного луча относительно поверхности заготовки, для получения максимального проплавления положение плоскости фокального пятна должно соответствовать 0,5-0,75 этой глубины.

Рисунок 1 – Поперечное сечение шва глубиной 32 мм, выполненного ЭЛС сталями 25ХГТ и 40Х

Совместно с МТЗ, МАЗ, БелАЗ, МЗШ, Амкодор, БЗА, Станко-Гомель, БЭРН разрабатываются конструкции новых узлов, в том числе из разноименных и ограниченно сваривающихся материалов. Изготовление валов и шестерен станков, задних мостов, узлов коробок передач и т.д. из сталей по разработанным технологическим процессам снижает материалоемкость узлов до 50 %. Однако масштабы применения ЭЛС в стране должны быть более существенными.

**Получение неразъемных соединений ЭЛ пайкой.** Вместо шлифования высокотвердых материалов может успешно применяться качественная лезвийная обработка инструментом из сверхтвердых материалов (СТМ). Выполнен спектр исследований по проведению ЭЛ пайки СТМ к основе из сталей или твердых сплавов. Основным условием пайки кубического нитрида бора (КНБ) и поликристаллического алмаза (ПКА) является смачивание материалов сплавом, для чего в его состав должен быть введен адгезионно-активный элемент, например Ti.

При оптимизации пайки СТМ, исходя из получения требуемой прочности соединения и необходимых эксплуатационных характеристик инструмента, показана возможность реализации процесса за 1-2 мин при минимальном энергозатрате (10-20 кДж) в инструмент. Пайка с нагревом лучом небольшой интенсивности дает возможность применения адгезионно-активных припоев на основе Cu и Ag при содержании до 5 мас. % Ti, обеспечивающих смачивание соединяемых материалов, снижает опасность графитизации СТМ и обеспечивает его высокопрочное соединение с основой.

Разработаны новые конструкции инструмента с повышенной прочностью удержания СТМ, что существенно улучшает производительность и качество обработки деталей. Инструмент с КНБ наиболее эффективен для обработки сталей и чугунов с твердостью до 60 - 70 HRC, инструмент с ПКА - сплавов цветных металлов (в частности Al - 12-22 % Si), а также керамик. По сравнению с твердосплавным инструментом стойкость инструмента из СТМ больше до 50 раз (при точении сплава AL25). Изделия после лезвийной обработки инструментом, оснащенным СТМ, имеют шероховатость поверхности до 0,05 - 0,63 мкм, сравнимую с поверхностью после шлифовки. Инструмент с элементами из ПКА использован для расточки отверстий под пальцы в поршнях из сплавов Al-Si, для обработки точением деталей пар трения (из силицированных графитов СГ-Т и СГ-П и карбида кремния SiC) насосов для перекачивания агрессивных жидкостей.

**Поверхностное упрочнение в режиме закалки.** Выполнено теоретическое и экспериментальное моделирование процессов скоростного ЭЛ нагрева поверхности изделий из инструментальных сталей, чугунов и титановых сплавов. Особенностью ЭЛ закалки является применение плотности энергии  $10^2-10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, что обеспечивает высокие скорости нагрева ( $10^3-10^5$  °C/с) и самоохлаждения материала. Такая обработка в режиме закалки из твердого состояния приводит к дифференцированному упрочнению материала на глубину 0,1-2 мм, формированию в поверхностном слое новых структурных состояний. Структура и свойства, глубина закалки, качество поверхности изделия зависят от технологических параметров нагрева и исходного структурного состояния материала. 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, микротвердость - 10 - 11 ГПа.

**Комбинированные и совмещенные методы инженерии поверхности** связаны с изменением химического состава материала – наплавкой на основу износостойкого или антифрикционного материала, нанесением покрытий, позволяющих значительно повысить эксплуатационные характеристики деталей. Применение комбинированного ЭЛ воздействия обеспечивает получение комплекса характеристик упрочненного изделия, которые невозможно получить с применением традиционных методов упрочнения. Проведены приоритетные исследования по теоретическому и экспериментальному моделированию методов нанесения многофункциональных слоев на основу из сталей и ти-

тановых сплавов, изучению структурно-фазовых превращений в них. Используются различные методы предварительного осаждения покрытий (электродуговых, ХТО, газотермических, электролитических, детонационных и др.), в исходном состоянии им присущи высокая пористость, малая прочность самого слоя, его адгезия к основе и износостойкость. ЭЛ обработка таких покрытий 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, повышению прочности сцепления и плотности покрытий, износостойкости и других характеристик.

**Перспективные исследования по применению ЭЛ обработки.** Современные ЭЛ технологии используются в самых разнообразных областях, начиная от ЭЛ нанолитографии (с разрешением порядка 10 нм) и формирования нанокристаллических материалов (одно- и многофазных, одно- и многослойных покрытий, пористых в форме тонких, порядка  $\cdot 10^{-2}$  мм, и толстых, до 10 мм, полуфабрикатов в виде фольги, ленты, листа, порошка) до радиационной обработки огромных объемов твердых и жидких материалов.

Опыт по формированию деталей путем последовательного ЭЛ нагрева и расплавления добавляемых материалов является основой для создания новых методов передового производства (аддитивных технологий), активно изучаемых во всем мире. В Беларуси этому направлению уделяется определенное внимание.

Интенсивно распространяется применение потока электронов в медицинской практике для стерилизации медицинских изделий, в карантинных службах для борьбы с опасными инфекционными болезнями, сельскохозяйственной и природоохранной практике для очистки сточных вод, навозохранилищ, обеззараживания загрязненных территорий, выбросных газов предприятий, уничтожения патогенных паразитов и микроорганизмов в свежем и замороженном мясе.

**Заключение.** В Республике Беларусь заложены научно-технологические основы промышленного применения электронно-лучевых технологий. Разрабатываются методы, относящиеся к 5-му и 6-му технологическим укладам.

В ФТИ НАН Беларуси на основании теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности влияния параметров ЭЛ воздействия на характер температурного поля в материале и осуществляемые при этом технологические процессы. Управление процессами реализуется благодаря формированию требуемого температурного поля в заготовке путем варьирования параметрами потока электронов.

ЭЛ технологии в Беларуси можно использовать с большой эффективностью практически на всех предприятиях машиностроительного профиля, в медицинской, сельскохозяйственной и природоохранной практике, карантинных службах. Широкое внедрение является важным фактором повышения конкурентоспособности продукции на внешних рынках. Однако этим направлениям уделяется недостаточно внимания.