

Научная статья

УДК 621.785.54

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-30-39

ПЛАЗМЕННОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПЛАЗМОТРОНОМ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Корсунов Константин Анатольевич¹,
Малюта Елизавета Руслановна²,
Эссельбах Роман Вадимович²

¹ Луганский государственный университет имени Владимира Даля

² Донбасский государственный технический университет

*для корреспонденции: diabazer@yandex.ru

Аннотация.

Упрочнение материалов плазмой является эффективным методом улучшения механических свойств, таких как прочность, твердость и износостойкость. Предлагаемый метод является актуальным, так как подходит для деталей сложной формы, позволяет обрабатывать труднодоступные поверхности или тонкие стенки, а также позволяет достаточно точно контролировать процесс упрочнения, что обеспечивает высокую повторяемость результатов.

Существующие методы поверхностной закалки энерго- и ресурсозатратны. Предложенная модель плазмотрона с жидким электродом позволяет сочетать простоту конструкции, относительную дешевизну изготовления установки, отсутствие требований к форме детали с высокими показателями упрочненной поверхности, достаточными для удовлетворения требований современных технологических процессов.

Авторами проведен сравнительный анализ характеристик плазменного нагрева и энергетических параметров нагрева металлических материалов. Указаны недостатки существующих методов. Представлены результаты воздействия электролитно-плазменной обработки на структурно-фазовые превращения в исследуемых образцах. Предложена электрическая схема плазменной установки. Показано, что применение жидкого электрода в плазмотроне способствует более эффективному энергетическому воздействию на обрабатываемую поверхность, что позволяет достигать больших глубин упрочнения по сравнению с традиционными методами плазменной обработки.

Экспериментальные исследования продемонстрировали повышение основного показателя плазменного упрочнения – твердости. Представленные данные показывают, что твердость поверхности после обработки в плазме может превышать значения твердости, полученные при любом другом способе обработки. Изучена микроструктура образцов до и после обработки. Выявлены преимущества рассмотренного метода обработки по сравнению с другими технологиями.



Информация о статье

Поступила:

02 июля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

29 сентября 2024 г.

Принята к публикации:

10 октября 2024 г.

Опубликована:

24 октября 2024 г.

Ключевые слова:

плазменная обработка,
микроструктура, закалка,
твердость, фазовый состав

Для цитирования: Корсунов К.А., Малюта Е.Р., Эссельбах Р.В. Плазменное поверхностное упрочнение плазмотроном с жидким электродом // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5 (165). С. 30-39. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-30-39, EDN: WZLYSG

Введение.

В современных условиях постоянно растут требования к прочности и долговечности материалов и деталей механизмов. Процессы упрочнения деталей сложной формы сталкиваются с рядом трудностей, вызванными различными факторами, такими как неравномерное распределение напряжений деформации, наличие углов и острых кромок и пр. Для решения этих проблем применяют различные методы упрочнения: термическая обработка, поверхностное упрочнение, нанесение специальных легированных материалов или изменение геометрии детали.

Наиболее актуальным и востребованным методом обработки деталей, особенно сложной формы, является плазменное упрочнение. Такой метод позволяет обрабатывать труднодоступные поверхности или тонкие стенки деталей. Кроме того, плазменное упрочнение позволяет достаточно точно контролировать процесс и обеспечивает высокую повторяемость результатов. Это повышает качество и надежность изделий, что особенно важно в таких отраслях, как авиационная и автомобильная промышленность, машиностроение, медицинская техника и другие.

Улучшение прочностных характеристик обусловлено механическим, химическим либо тепловым воздействием на материал [1]. Применяемые в настоящее время методы упрочнения материалов (Рис. 1) имеют как преимущества, так и недостатки.

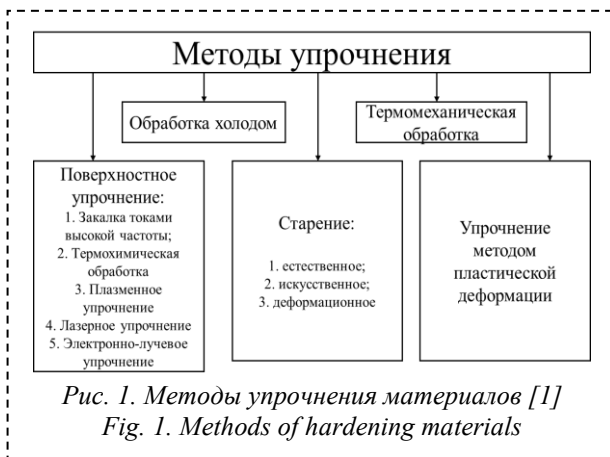


Рис. 1. Методы упрочнения материалов [1]
Fig. 1. Methods of hardening materials

Термомеханический вид обработки позволяет значительно увеличить прочность без значительных потерь в свойствах пластичности материала [2], применим для углеродистых, конструкционных, инструментальных, легированных и пружинных сталей [1,2].

Недостатками термомеханического метода обработки являются высокая стоимость, ограничения геометрии (осложнено упрочнение сложных или трехмерных поверхностей), механические напряжения (возникновение внутренних напряжений в обрабатываемом

материале может снизить прочность и долговечность), изменения в микроструктуре (влияет на механические свойства материала, такие как прочность, твердость и коррозионная стойкость), повреждение поверхности (трещины, прожоги или обесцвечивание), ограниченное проникновение (может быть недостаточным для обработки глубоких или толстых компонентов), низкая эффективность обработки (термомеханические методы могут быть медленными и неэффективными для обработки больших объемов деталей) [3].

Физико-химическое упрочнение приводит к значительному увеличению твердости поверхностных слоев деталей. Также при этом повышается сопротивление истиранию и предел выносливости материала [2].

Различие в видах физико-химического упрочнения определяется глубиной нагрева слоя материала. Наиболее распространены: закалка токами высокой частоты, термомеханическая обработка, лазерное и плазменное поверхностное упрочнение.

Использование закалки токами высокой частоты (ТВЧ) позволяет производить упрочнение на глубину до 2 мм [4]. Благодаря водному охлаждению медных трубок индуктора значительно увеличивается ресурс работы установки. Также за счет нагревания только участка обрабатываемой детали существенно повышается экономичность установки.

Достоинствами данного метода является высокая производительность и скорость нагрева детали, повышение предела выносливости в два-три раза по сравнению с механическими методами упрочнения, сокращение машинного времени термообработки, уменьшение коробления при закалке, возможность полной механизации и автоматизации процесса [5].

К недостаткам закалки ТВЧ можно отнести нецелесообразность использования установки в малых производствах из-за высокой стоимости индукторов, при этом индуктор выбирается в зависимости от типа и размера обрабатываемой детали; невысокую производительность при обработке крупногабаритных деталей; радиопомехи и отрицательное влияние на приборы; вредное влияние на здоровье обслуживающего персонала [6].

Процесс термомеханической обработки подразумевает в себе использование множества дополнительных жидкостей и примесей к ним, а также занимает большое количество времени, что в условиях производства будет тормозить процесс [7].

Для закалки крупных деталей, а также изделий, имеющих сложную форму поверхности, или для закалки прокатных валков применяется плазменное поверхностное упрочнение [1].

Этот метод основан на термических фазовых и структурных превращениях, происходящих при быстром концентрированном нагреве рабочей поверхности детали плазменной струей (дугой) и теплоотводе в материал детали. Наиболее используемыми видами плазменного упрочнения в производстве являются плазменное напыление и упрочнение с помощью разрядов в жидкости.

Плазменное поверхностное упрочнение позволяет производить закалку с твердостью 50 – 56 HRC. Поэтому оно находит широкое применение в условиях как мелкосерийного и единичного (в том числе ремонтного), так и крупносерийного и массового производства [8].

При обработке материалов с помощью метода плазменного поверхностного упрочнения достигаются высокие значения прочности, твердости и пластичности материала [2].

К основным недостаткам применения такого метода относится сложность регулирования глубины закаленного слоя, а также возможность перегрева обрабатываемой детали.

Лазерное поверхностное упрочнение позволяет осуществить быстрый нагрев поверхностного слоя обрабатываемого материала до температуры плавления и быстрое охлаждение за счет отвода тепла в объем материала, который остается практически холодным [2]. В этом случае, как и при плазменном поверхностном упрочнении, имеется возможность обработки только части детали, достижения необходимых свойств инструмента; сохраняются геометрические размеры детали, снижается длительность термического цикла закалки, повышается износостойкость и задиристость [5].

К недостаткам можно отнести высокую стоимость лазерных технологических комплексов, малую зону тепловой обработки; глубина упрочняемого слоя определяется линейным износом материала и обычно не превышает 1–1,5 мм.

Технология электронно-лучевого упрочнения основана на взаимодействии электронного луча с поверхностью упрочняемого материала. Концентрированный поток электронов передает свою энергию в очень тонкий поверхностный слой за короткое время импульса таким образом, что основные протекающие при этом процессы (плавление, испарение, затвердевание) повышают механические и физико-химические свойства упрочняемого материала [9].

Электронный луч способен упрочнить поверхностный слой деталей на глубину 0,2–5 мм с последующей обработкой поверхности шлифованием или обкаткой. За счет высоких прочностных свойств поверхности материала, упрочненного электронным лучом, данный метод наиболее применим к деталям,

работающим в различных условиях трения, с целью увеличения их износостойкости [5].

К недостаткам относятся высокая стоимость компонентов установки, необходимость в дополнительной защите от рентгеновского излучения (при напряжениях выше 20 кВ), невозможность обработки деталей, имеющих сложную форму поверхности [10–11].

Плазменное поверхностное упрочнение при помощи плазматрона с жидким электродом.

Применение плазменного поверхностного упрочнения создает на поверхности обрабатываемой детали твердый слой, повышая устойчивость к истиранию и абразивному износу.

Упрочненный слой может иметь твердость до 70 HRC или выше, в то время как толщина слоя может составлять всего несколько микрон, поэтому обеспечивается сочетание высокой твердости и гибкости [12, 13]. Обработанная плазмой поверхность имеет низкий коэффициент трения, что уменьшает износ и задиры при скольжении. Упрочненный слой также обладает низкой адгезией, что предотвращает налипание материалов к поверхности. Улучшается термостойкость детали к тепловому окислению и обезуглероживанию. Это делает обработанные детали более устойчивыми к высоким температурам и тепловым циклам [12–14].

Плазменное поверхностное упрочнение создает зоны сжимающих напряжений на поверхности, что повышает усталостную прочность. Упрочненный слой предотвращает образование трещин и распространение усталости [13].

К плазменным установкам для поверхностного упрочнения предъявляется ряд требований [15]:

- мощность (в зависимости от свойств упрочняемого материала, его геометрических размеров мощность плазматрона может меняться от 100 Вт до 10 кВт);

- стабильность параметров плазменного потока (уменьшение пульсаций плазменного потока обеспечивает равномерное распределение тепла в тонком поверхностном слое материала);

- высокая энергетическая эффективность (возможность эффективного преобразования электрической энергии в тепловую и получение максимального КПД технологического процесса);

- длительный ресурс непрерывной работы (плазматроны, имеющие ресурс работы электрода более 20 ч.);

- надежность конструкции (простота конструкции, надежность сборки и разборки, удобство монтажа и использование широко распространенных материалов);

Таблица 1. Сравнительный анализ плазменного нагрева

Table 1. Comparative analysis of plasma heating

Тип плазматрона	Электро- дуговой прямого действия	Электродуговой косвенного действия	С жидким катодом
Пределы силы тока, А	100...350	100...250	до 10– 15
Среднее значение силы тока, А	~170	~150	~9
Скорость перемещения плазматрона, см/с	3...4	0,3...0,5	3...5
Глубина закаленного слоя, мм	0,8...1,2	1,5...1,8	1...10
Эффективный КПД нагрева поверхности	0,6...0,75	0,1...0,5	0,7-0,85
Твердость поверхности закаленного слоя, HRC	55...60	45...50	65...67

– простота эксплуатации (крепление плазматрона в технологической зоне, сборке и разборке, легкость возбуждения электрического разряда);

– экологичность при работе установки (обеспечение минимальных выбросов переработанных газов в окружающую среду, либо обеспечение безотходного производства);

– возможность использования любых плазмообразующих газов (выбор типа катода, ресурс работы которого не уменьшается с введением агрессивных сред в качестве рабочего газа).

Создание плазматронов, соответствующих этим требованиям, обеспечивает высокую технико-экономическую эффективность поверхностного упрочнения.

Специфические требования к конструкции плазматрона для поверхностного упрочнения предъявляются в случае, когда надо получить минимальную или максимальную ширину упрочненной зоны, при импульсном режиме упрочнения, а также в случае упрочнения в режиме дуги (плазматроны прямого действия).

Для выбора типа плазматрона была проведена сравнительная оценка основных видов плазматронов. Результаты оценки приведены в Таблице 1 [15-19].

Параметры процесса нагрева для различных плазматронов приведены в Таблице 1.2 [15, 20–21].

Как видно из Таблицы 2, нагрев металла плазматроном с жидким катодом и плазматроном прямого действия имеет близкий КПД. Наибольший тепловой КПД отмечен у плазматрона с жидким катодом. Другие показатели (температурный градиент, размеры зон нагрева) у данного плазматрона имеют промежуточное значение.

Нагрев в электролите обеспечивает малую протяженность области нагрева (2 мм). За счет этого температура на таком промежутке меняется не так значительно, как у электродуговых плазматронов. Выгодным преимуществом плазматрона с жидким катодом являются меньшие затраты мощности (2 кВт).

Использование плазматрона с жидким электродом для упрочнения деталей имеет ряд преимуществ, среди которых следующие [15–18]:

– высокая эффективность и скорость обработки: Плазматрон с жидким электродом способен создавать высокотемпературный поток, который быстро и равномерно нагревает поверхность обрабатываемой детали. Это позволяет достичь высокой скорости обработки и повысить производительность.

– минимальное воздействие на основной материал: электрическая дуга обладает высокой тепловой концентрацией, что позволяет минимизировать тепловое воздействие на

Таблица 2. Энергетические характеристики нагрева металла

Table 2. Energy characteristics of metal heating

Тип плазматрона	Электро- дуговой прямого действия	Электродуговой косвенного действия	С жидким катодом
Полезная мощность, кВт	22,16	9,9	2
Тепловой КПД плазматрона	0,74	0,81	0,95
КПД теплопередачи	0,6	0,4	0,41
Эффективный КПД преобразования энергии	0,44	0,32	0,41
Горизонтальный температурный градиент, К/м	$5,77 \cdot 10^5$	$9,87 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$
Продольный размер зоны теплого воздействия, мм	5	10	2
Радиус зоны теплого действия (выше 300 К), мм	2,6	15,2	5,7

основной материал детали. Это важно для предотвращения деформации и сохранения размеров детали.

- улучшение механических свойств: плазматрон с жидким электродом способен значительно увеличить твердость, прочность и износостойкость поверхности детали за счет формирования упрочненного слоя.

- возможность обработки различных материалов: плазматрон с жидким электродом может быть использован для обработки широкого спектра металлов и композитов.

- экологическая безопасность: плазматрон с жидким электродом не требует применения химических реактивов или агрессивных сред, что делает его более экологически безопасным по сравнению с некоторыми другими методами упрочнения.

- гибкость и точность управления процессом: плазматрон с жидким электродом обеспечивает возможность точного контроля параметров обработки, таких как скорость подачи материала и температура плазмы, что позволяет достичь оптимальных результатов.

Таким образом, плазматрон с жидким электродом является эффективным и многофункциональным инструментом для поверхностного упрочнения деталей, обладающим рядом преимуществ перед другими методами обработки.

Для поверхностного упрочнения деталей предложена плазменная установка с жидким электродом. Принципиальная электрическая схема установки приведена на Рис. 2.

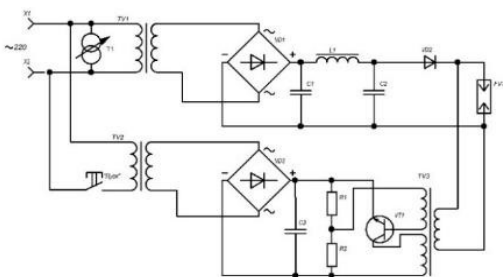


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема плазматрона с жидким электродом
Fig. 2. Circuit diagram of plasmatron with liquid electrode

Установка запитывается от электрической сети с переменным напряжением 220 В. Рабочее напряжение дуги регулируется автотрансформатором Т1. TV1 – повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации $k \approx 10$. Диодный мост VD1, фильтр C1, L1, C2 – двухполупериодный выпрямитель.

Нижняя часть схемы представляет собой пусковое устройство, которое обеспечивает

поджиг плазменной дуги. Пусковое устройство собрано на строчном трансформаторе TV3. VT1 – транзисторный ключ для раскачки строчного трансформатора.

Высоковольтный диод VD2 обеспечивает защиту схемы от высокого напряжения пускового устройства.

Обрабатываемая деталь является анодом и располагается в непосредственной близости от электролита, который выступает катодом. Внешний вид установки приведен на Рис. 3.

Для запуска установки подается напряжение на 20–25% ниже рабочего для обработки. Кратковременным нажатием кнопки «Пуск» поджигается дуга и при помощи автотрансформатора процесс выходит в рабочий режим. По завершении процесса отключается питание, и заготовка помещается в охлаждающую среду – электролит.



Рис. 3. Внешний вид установки и процесс обработки

Fig. 3. Appearance of the plant and the treatment process

В качестве обрабатываемого материала была выбрана Сталь 45 – это углеродистая сталь с содержанием углерода (C) примерно 0,45%. Она относится к группе конструкционных сталей, которые широко используются в машиностроении, производстве оборудования, автомобильной промышленности, строительстве и других отраслях народного хозяйства.

Перед проведением экспериментальных исследований образцы данной стали были подвержены отжигу. Отжиг стали 45 включает в себя нагрев выше точки A_{c3} [22 – 23], где сталь переходит в однофазное аустенитное состояние, на 30–50°C с последующим охлаждением в печи для акклиматизации стали. Этот относительно медленный процесс охлаждения приводит к тому, что микроструктура становится практически равновесной, а перлит занимает примерно 55% всей площади [22–23] поля зрения. Твердость стали после отжига по HRC составила 4–6 единиц. Структура стали после отжига приведена на Рис. 4.

Следующим этапом была проведена поверхностная обработка образцов в плазматроне с жидким электродом. Для закалки Стали 45 следует нагревать ее до температуры на

30–50°C выше точки A_{c3} (820–850°C), с последующим быстрым охлаждением в электролите [22–23].

После закалки произошло изменение структуры стали (Рис. 5). Теперь структура представляет собой игольчатый мартенсит. Твердость обрабатываемой поверхности образца по HRC составила 52–55 единиц и плавно падает от 55 до 6 единиц в плоскости, перпендикулярной плоскости обработки.

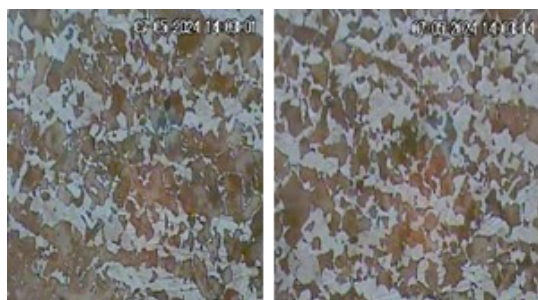


Рис. 4. Структура стали после отжига
Fig. 4. Steel structure after annealing

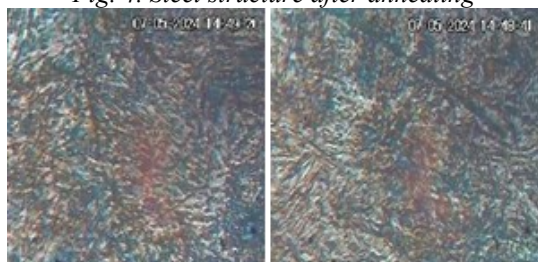


Рис. 5. Структура стали после обработки
Fig. 5. Steel structure after treatment

На Рис. 6 показана граница между сформировавшимся закаленным слоем и равновесной структурой стали.



Рис. 6. Граница между образовавшейся мартенситной (область 1) и равновесной (область 2) структурой
Fig. 6. Boundary between the formed martensitic (area 1) and equilibrium (area 2) structure

Толщина закаленного слоя зависит от многих факторов: концентрация электролита,

напряжение на дуге, расстояние между электродами и т. д. Одним из главных факторов является время обработки при прочих равных параметрах одного рабочего цикла. Зависимость твердости упрочненного слоя от глубины (расстояние от торца) при различном времени обработки показана на Рис. 7. Измерения проводились в плоскости, перпендикулярной плоскости обработки.

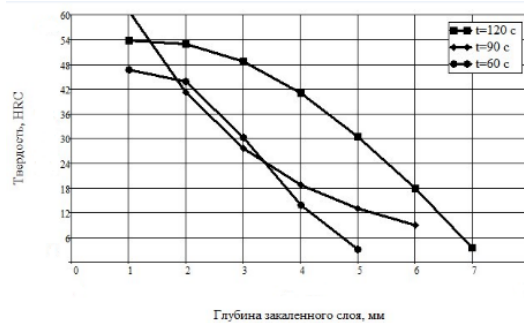


Рис. 7. Зависимость твердости от глубины закаленного слоя
Fig. 7. Hardness dependence on the depth of the hardened layer

Выводы. В работе показано, что применение плазмотрона с жидким электродом для упрочнения поверхностного слоя конструкционной стали позволяет повысить твердость с 4–6 единиц HRC до 52–55 единиц HRC. Кроме того, данный метод поверхностного упрочнения имеет ряд очевидных преимуществ перед остальными методами.

Во-первых, это относительная простота установки для упрочнения, которая не требует дорогостоящего оборудования. Анодом в такой установке выступает сама обрабатываемая деталь, а жидкий катод дополнительно выполняет функцию охлаждающей среды с возможностью регулирования температуры для требуемой скорости охлаждения детали. Возможна автоматизация процесса обработки.

Во-вторых, это возможность обрабатывать детали сложной геометрической формы или прокатных валков, причем есть возможность управления толщиной закаленного слоя.

Однако остается открытым вопрос определения экономической эффективности применения плазмотрона с жидким электродом для упрочнения поверхностного слоя деталей машин и механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колеров В. С., Колеров О. К., Уварова В. С., Дроздов И. А., Бунова Г. З. Термическая обработка сталей: метод. Указания. - Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2008. 68 с.
2. Гончаров В. С. Методы упрочнения конструкционных материалов. Функциональные покрытия: электронное учебное пособие. -

Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017. 205 с.

3. Картонова Л. В., Кечин В. А. Теория и технология термической обработки : учеб. пособие. Владим. гос.ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. - Владимир : Изд-во ВлГУ, 2020. 128 с.

4. Шепеляковский К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. - М. : «Машиностроение», 1972. 288 с.

5. Торянников А. Ю., Барышников А. А. Сравнительный анализ высокоэнергетических методов поверхностного упрочнения стали // Молодой ученый. 2021. № 19 (361). С. 45–49.

6. Крукович М. Г., Максимова Н. В., Тонэ Э. Р. Материаловедение: Методические указания. Ч. 2. - М. : МИИТ, 2012. 54 с.

7. Шматов А. А. Научные и технологические основы термохимических и термоциклических методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов : специальность «05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.16.01 – материаловедение и термическая обработка металлов и сплавов»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Шматов Александр Анатольевич; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2020. 47 с.

8. Самохвалов В. Н. Высокоэнергетические методы размерной и упрочняющей обработки. Самара : Изд-во Самарского университета, 2019. 73 с.

9. Hao S. [et al.] Surface modification of steels and magnesium alloy by high current pulsed electron beam // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2005. Т. 240. № 3. С. 646–652.

10. Matlák J., Dlouhý I. Properties of electron beam hardened layers made by different beam deflection // Manufacturing Technology. 2018. Т. 18. С. 279–284.

11. Григорьев С. Н. [и др.] Влияние высококонцентрированных энергетических обработок на структуру и свойства среднеуглеродистой стали // Металлы. 2020. Т. 10. № 12. С. 1669.

12. Суминов И. В., Белкин П. Н., Эпенфельд А. В. [и др.] Плазменно-

электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / Под общ. ред. Суминова И. В. В 2-х томах. Том I. М. : Техносфера, 2011. 464 с.

13. Коротков В. А. Поверхностная плазменная закалка. - Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2012. 64 с.

14. Бычкова Е. В. Поверхностное упрочнение деталей из стали и чугуна плазменной закалкой. - Нижний Тагил : Коммерческое предложение, 2012.

15. Балановский А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.

16. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М. : Наука, 1972. 721 с.

17. Степанова Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин : учебное пособие. Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т., 2009. 64 с.

18. Радько С. И., Урбах Э. К. Устройство электродугового плазмотрона и моделирование его энергетических характеристик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. № 1 (25). С. 212–215.

19. Мурга В. В., Антропов И. И., Гамазин Д. К., Алкиб А. Изменения микроструктуры стали при обработке в плазмотроне с жидким катодом // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2014. № 1(42). С. 152–156.

20. Мурга В. В., Грищенко Е. А. Сравнительный анализ энергетической эффективности плазмотронов различных типов // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». 2017. № 6(49). С. 66–73.

21. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 406 с.

22. Тешлухин Г. Н., Гропянов А. В. Металловедение и термическая обработка: учеб. пособие. СПб. : СПбГТУ РП, 2011. 169 с.

23. Козловский А. Э., Колобов М. Ю. Термическая обработка углеродистых сталей: учеб. пособие. Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2017. 144 с.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Корсунов Константин Анатольевич, заведующий кафедрой физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» (291034, Луганская Народная Республика, г.о. Луганский, г. Луганск, кв-л Молодежный, д. 20А), доктор технических наук, профессор, korsunof@mail.ru

Малюта Елизавета Руслановна, аспирант кафедры электроники и радиофизики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донбасский

государственный технический университет» (294204, Луганская Народная Республика, г.о. Алчевский, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16), elizaveta.malyuta@list.ru

Эссельбах Роман Вадимович, ассистент кафедры электроники и радиофизики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донбасский государственный технический университет» (294204, Луганская Народная Республика, г.о. Алчевский, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16), diabazer@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Корсунов Константин Анатольевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.

Малюта Елизавета Руслановна – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Эссельбах Роман Вадимович – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

PLASMA SURFACE HARDENING WITH LIQUID ELECTRODE PLASMA GENERATOR

Konstantin A. Korsunov ¹, Elizaveta R. Maluta ², Roman V. Esselbakh^{2*}

¹ Lugansk Vladimir Dahl State University

² Donbass State Technical University

*for correspondence: diabazer@yandex.ru



Article info

Received:

02 July 2024

Accepted for publication:

29 September 2024

Accepted:

10 October 2024

Published:

24 October 2024

Keywords: plasma treatment, microstructure, hardening, hardness, phase structure.

Abstract.

Plasma strengthening of materials is an effective method for improving mechanical properties such as strength, hardness and wear resistance. The proposed method is relevant, as it is suitable for parts of complex shape, allows to treat hard-to-reach surfaces or thin walls, also allows to control the hardening process accurately enough, which provides high repeatability of results.

Existing methods of surface hardening are energy and resource intensive. The proposed model of plasmatron with liquid electrode allows combining simplicity of construction, relative cheapness of the unit manufacturing, lack of requirements to the shape of the part with high performance of the hardened surface, sufficient to meet the requirements of modern technological processes.

The authors have carried out a comparative analysis of the characteristics of plasma heating and energy parameters of heating of metallic materials. The disadvantages of the existing methods are indicated. The results of the effect of electrolyte-plasma treatment on the structural-phase transformations in the studied samples are presented. The electrical scheme of the plasma installation is proposed. It is shown that the use of liquid electrode in the plasmatron promotes more effective energy influence on the treated surface, which allows to reach greater hardening depths in comparison with traditional methods of plasma treatment.

Experimental studies have demonstrated an increase in the main indicator of plasma hardening - hardness. The presented data show that the surface hardness after plasma treatment can exceed the hardness values obtained by any other treatment method. The microstructure of samples before and after treatment has been studied. Advantages of the considered method of treatment in comparison with other technologies are revealed.

For citation: Korsunov K.A., Maluta E.R., Esselbakh R.V. Plasma surface hardening with liquid electrode plasma generator. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 5(165):30-39. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-30-39, EDN: WZLYSG

REFERENCES

1. Kolerov V.S., Uvarova V.S., Drozdov I.A., Bunova G.Z. Thermal treatment of steels: methodical instructions. Samara: Samara State Aerospace University; 2008. 68 p.
2. Goncharov V.S. Methods of hardening of structural materials. Functional coatings: electronic textbook. Tolyatti: Publishing house of Tolyatti State University; 2017. 205 p.
3. Kartonova L.V., Kechin V.A. Theory and technology of heat treatment: textbook. Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs. Vladimir: Publishing house of Vladimir State University; 2020. 128 p.
4. Shepelyakovskiy K.Z. Hardening of machine parts by surface hardening under induction heating. M.: "Mechanical Engineering"; 1972. 288 p.
5. Toryannikov A.Yu., Baryshnikov A.A. Comparative analysis of high-energy methods of surface hardening of steel. *Young scientist*. 2021; 19(361):45–49.
6. Krukovich M.G., Maksimova N.V., Tone E.R. Materials science: Methodological guidelines. Part 2. M.: MIIT; 2012. 54 p.
7. Shmatov A.A. Scientific and technological foundations of thermochemical and thermocyclic methods of strengthening processing of metalworking tools : specialty "05.02.07 – technology and equipment of mechanical and physico-technical processing, 05.16.01 – metallurgy and heat treatment of metals and alloys": abstract of the dissertation for the degree of Doctor of technical sciences / Shmatov Alexander Anatolyevich; Belarusian National Technical University. Minsk, 2020. 47 p.
8. Samokhvalov V.N. High-energy methods of dimensional and hardening processing. Samara: Publishing House of Samara University; 2019. 73 p.
9. Hao S. [et al.] Surface modification of steels and magnesium alloy by high current pulsed electron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2005; 240(3):646–652.
10. Matlák J., Dlouhý I. Properties of electron beam hardened layers made by different beam deflection. *Manufacturing Technology*. 2018; 18:279–284.
11. Grigoriev S.N. [et al.] The influence of highly concentrated energy treatments on the structure and properties of medium-carbon steel. *Metals*. 2020; 10(12):1669.
12. Suminov I.V., Belkin P.N., Epenfeld A.V. [et al.] Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys. Under the general editorship of Suminov I.V. In 2 volumes. Volume I. M.: Technosphere; 2011. 464 p.
13. Korotkov V.A. Surface plasma hardening. Nizhny Tagil: NTI (branch) UrFU; 2012. 64 p.
14. Bychkova E.V. Surface hardening of steel and cast iron parts by plasma hardening. Nizhny Tagil: Commercial offer; 2012.
15. Balanovsky A.E. Plasma surface hardening of metals. Irkutsk: Publishing house of IrSTU; 2006. 180 p.
16. Vargaftik N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. M.: Nauka; 1972. 721 p.
17. Stepanova T.Yu. Technologies of surface hardening of machine parts : a textbook. Ivanovo: Ivan. gos. chem.-technol. un-t; 2009. 64 p.
18. Radko S.I., Urbach E.K. Device of an electric arc plasma torch and modeling of its energy characteristics. *Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2021; 1(25):212–215.
19. Murga V.V., Antropov I.I., Gamazin D.K., Alkib A. Changes in the microstructure of steel during processing in a plasma torch with a liquid cathode. *Collection of scientific papers of DonGTU*. Alchevsk: DonGTU, 2014; 1(42):152–156.
20. Murga V.V., Grishchenko E.A. Comparative analysis of the energy efficiency of plasma torches of various types. *Collection of scientific papers of the State Educational Institution of the LPR "DonGTU"*. Alchevsk: State Educational Institution of the LPR "DonGTU"; 2017; 6(49):66–73.
21. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyansky P.A. Plasma technologies. Handbook for engineers. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University; 2013. 406 p.
22. Teplukhin G.N., Gropyanov A.V. Metallurgy and heat treatment: textbook manual. St. Petersburg: SPbGTU RP; 2011. 169 p.
23. Kozlovskiy A.E., Kolobov M.Y. Thermal treatment of carbon steels: a textbook. Ivanovo: Ivan. gos. chem.-technol. un-t; 2017. 144 p.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Konstantin A. Korsunov, Head of the Department of Physics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk Vladimir Dahl State University» (291034, Lugansk Republic, Lugansk city district, Lugansk, Molodezhny Quarter, 20A) Doctor of Technical Sciences, Professor, korsunof@mail.ru

Elizaveta R. Maluta, PhD student of the Department of Electronics and Radiophysics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Donbass State Technical University» (294204, Lugansk Republic, Alchevsk city district, Alchevsk, Lenin Avenue, 16), elizaveta.malyuta@list.ru

Roman V. Esselbakh, Assistant of the Department of Electronics and Radiophysics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Donbass State Technical University» (294204, Lugansk Republic, Alchevsk city district, Alchevsk, Lenin Avenue, 16), diabazer@yandex.ru

Contribution of the authors:

Konstantin A. Korsunov – setting a research task, scientific management.

Elizaveta R. Maluta – literary review, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, text writing.

Roman V. Esselbakh – literary review, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, text writing.

All authors have read and approved the final manuscript.

