

6. Лемех ПЛЖ (Bellota) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://agrotrakshop.ru/catalog/plugi\\_obshchego\\_naznacheniya/lemekh\\_plzh\\_bellota/?ysclid=l95bhbi1lm795139529](https://agrotrakshop.ru/catalog/plugi_obshchego_naznacheniya/lemekh_plzh_bellota/?ysclid=l95bhbi1lm795139529). – Дата доступа: 12.09.2022.

УДК 621.791

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА**

*Хвисевич В. М.<sup>1</sup>, Сазонов М. И.<sup>1</sup>, Веремейчик А. И.<sup>1</sup>,  
Онысько С. Р.<sup>1</sup>, Есипчук С. М.<sup>2</sup>*

*1) Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь*

*2) Университет штата Сан-Паулу «Жулио Де Мескита Фильо» (UNESP),  
г. Сан-Паулу, Бразилия*

### **Введение**

В машиностроительной отрасли для изготовления деталей машин и механизмов различного назначения, как правило, используются дешевые низколегированные, легированные стали и чугун.

Эксплуатационный ресурс изделий из этих материалов не отвечает соответствующим требованиям производства, обусловленными затратами на их ремонт, содержание, запасные части и утилизацию.

Как известно, для увеличения срока службы изделий применяют соответствующие упрочняющие технологии, основными из которых являются механическая, химическая и термическая обработки.

На основе анализа литературных источников в этой области следует, что наибольшее практическое применение для решения такой проблемы получили термические методы упрочнения: объемная закалка, применение ТВЧ, лазерных и плазменных источников, электронно-лучевых и катодно-дуговых методов.

Как показала практика, для повышения эксплуатационных свойств быстро изнашивающихся изделий технология плазменного поверхностного упрочнения является наиболее доступной, рациональной, экономически и экологически эффективной по сравнению с другими технологиями упрочнения изделий концентрированными источниками нагрева: лазерными, электронно-лучевыми, катодно-дуговыми, где используется сложное и дорогостоящее оборудование, предъявляются высокие требования к техническому состоянию оборудования и упрочняемых деталей [1].

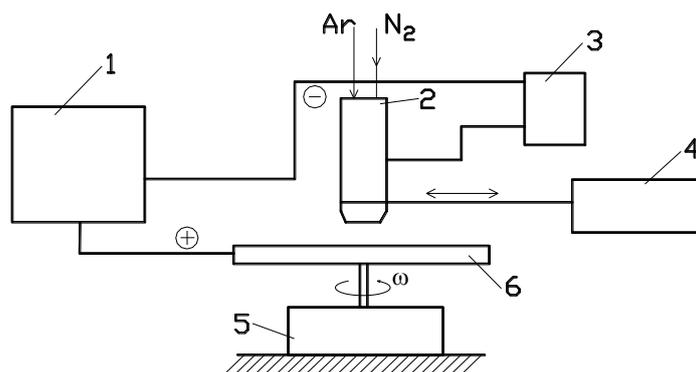
Информация о плазменном упрочнении появилась в 80-х годах XX века. Способы плазменного упрочнения, имея упомянутые достоинства, постоянно совершенствуются, что обусловлено необходимостью разработки новых методик для получения оптимальных характеристик генераторов плазмы и режимов технологических процессов упрочнения изделий из различных материалов.

В этой связи развитие и дальнейшее совершенствование этой технологии в настоящее время является актуальной задачей.

## Сущность технологического процесса

Процесс поверхностного упрочнения осуществляется перемещением генератора плазмы постоянного тока с расчётной скоростью относительно рабочей поверхности детали, который генерирует плазменную дугу, взаимодействующую с поверхностью упрочняемой детали.

Если дуга горит между электродом плазмотрона и деталью, то ее принято называть дугой прямого действия. Когда дуга возбуждается между электродом и соплом плазмотрона, ее называют дугой косвенного действия или плазменной струей.



1 – силовой источник питания; 2 – модернизированный плазмотрон;  
3 – высокочастотный генератор; 4 – манипулятор; 5 – манипулятор;  
6 – упрочняемая деталь

**Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для поверхностного упрочнения**

В результате скоростного локального нагрева поверхности детали плазменной дугой до высоких расчетных температур и дальнейшего охлаждения изделия, которое достигается высокоскоростным отводом тепла во внутренние его слои в материале происходят структурные превращения. Так как объем нагреваемого под дугой металла мал, происходит быстрый отвод тепла в не нагретые слои, тела. Исследования скоростей охлаждения, проведенные в работах Н. Н. Рыкалина [2]. Расчёты показали, что скорости охлаждения для сталей и чугуна существенно не различаются.

При воздействии высококонцентрированного источника тепла в зоне влияния образуется мартенситно-аустенитная структура. Следует заметить, что структурные превращения при плазменном упрочнении происходят в основном так же, как и при объемной закалке, однако высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к увеличению плотности дислокаций и напряжений в кристаллической решетке, что существенно увеличивает твёрдость поверхностного слоя.

Так, например, твёрдость стали при объемной закалке 48 – 53 HRC, закалке ТВЧ 51 – 56 HRC, плазменной закалке 54 – 59 HRC.

Основное достоинство плазменной закалки в существенном увеличении твёрдости приповерхностного слоя изделия и сохранении исходных свойств металла в его внутренних слоях, что повышает сопротивление усталости и изнашиванию детали, что недостижимо при традиционных методах упрочнения.

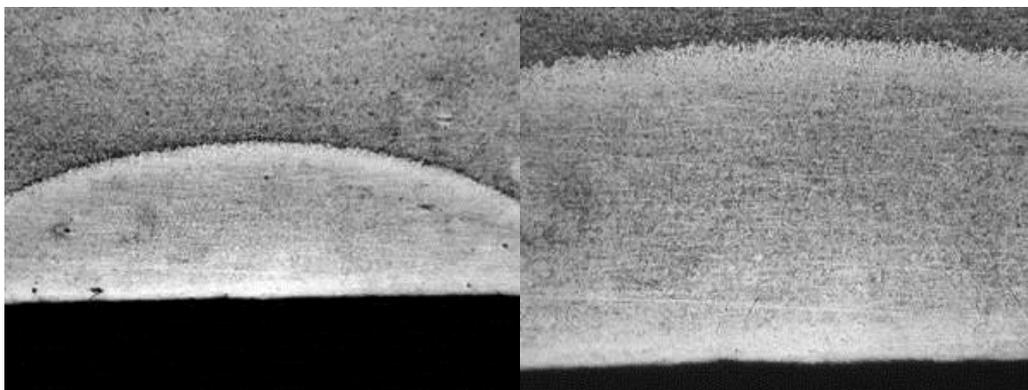
Отметим также, что глубина модифицированного слоя при воздействии плазменного источника нагрева варьируется от 0,5 до 2,5мм, ширина упрочняющей зоны от 5 до 15 мм [3].

Процесс плазменного упрочнения может осуществляться с оплавлением и без оплавления поверхности. Во втором случае упрочненная зона не требует финишной обработки.

### Результаты исследования процесса

Проведена термообработка плазменной дугой образцов из стали 45 легированными хромистыми сталями 40Х и 14Х17Н2, а также чугуна ВЧ-100.

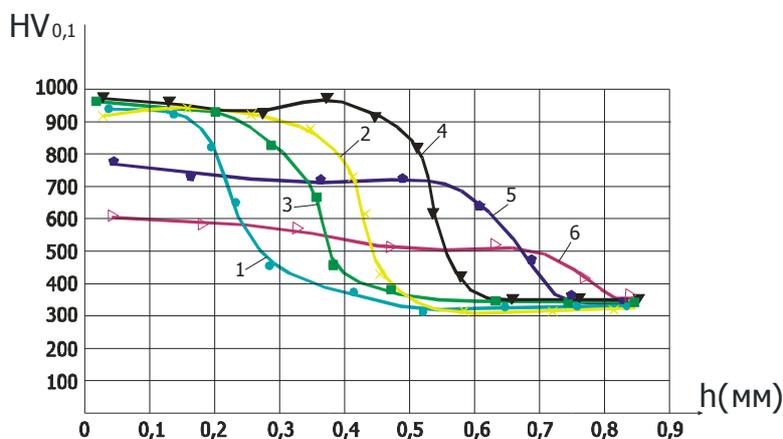
При термообработке образцов из стали 45 осуществляется высокоскоростной нагрев с быстрым охлаждением, что приводит к упрочнению зоны нагрева, т. е. в следствии оговоренных превращений создается слой с высокой степенью дискретности мартенсита. Рассматриваемая сталь содержит менее 0,5 % углерода и при фазовых превращениях его кристаллы имеют форму пластин.



а) зона влияния плазменной струи;  $\times 45$ ,  
б) микроструктура зоны нагрева;  $\times 180$

**Рисунок 2 – Микроструктура стали 45 при термообработке в среде аргона**

Ниже на рисунке 3 показано распределение микротвердости стали 45 по глубине упрочняемого слоя.



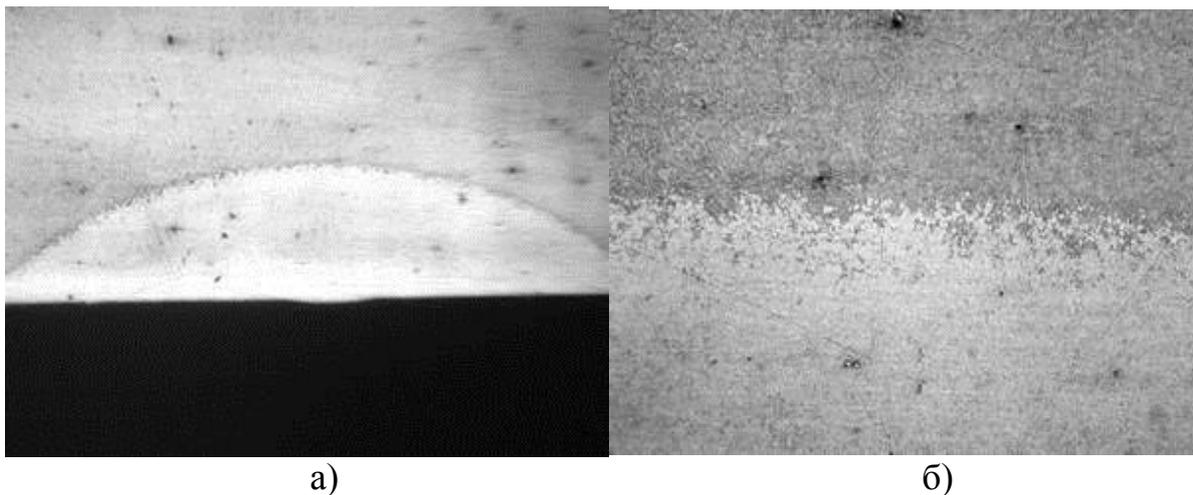
1 –  $V = 20$  мм/с; 2 –  $V = 16,7$  мм/с; 3 –  $V = 13,36$  мм/с;  
4 –  $V = 11,7$  мм/с; 5 –  $V = 10$  мм/с; 6 –  $V = 4,2$  мм/с

**Рисунок 3 – Зависимости распределения микротвердости стали 45 по глубине поверхностного слоя**

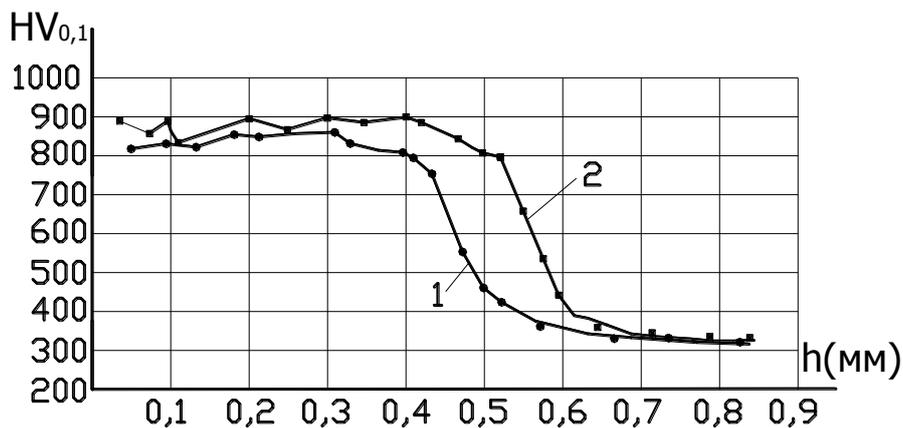
Проведена термообработка образцов из легированных сталей 40X и 14X17H2 в среде азота.

Сталь 40X

Металлографический анализ показал, что структура стали изменена по сравнению с исходной и состоит из характерных зон. В упрочненном слое наблюдается высокодисперсный мартенсит, далее нерегулярный мартенсит с остаточным аустенитом, а затем зона с фрагментами карбидов. По сравнению со сталью 45 для стали 40X скорость процесса превращения замедляется, что объясняется устойчивостью аустенита к распаду в таких сталях и наличием легирующих элементов хрома и вольфрама.



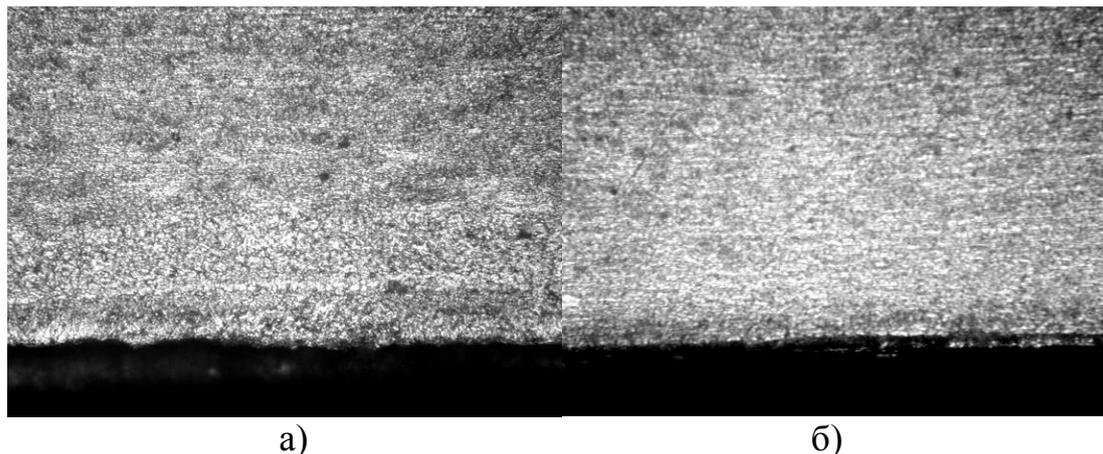
а) увеличение x36; б) увеличение x180  
Рисунок 4 – Микроструктура стали 40X



1 – с оплавлением; 2 – без оплавления  
Рисунок 5 – Характер распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя стали 40X (защитный газ азот)

Здесь глубина упрочненного слоя составляет 0,6 мм. Наибольшее значение микротвердости упрочненного слоя превышает ее значение для исходного материала более чем в два раза.

## Сталь 14X17H2

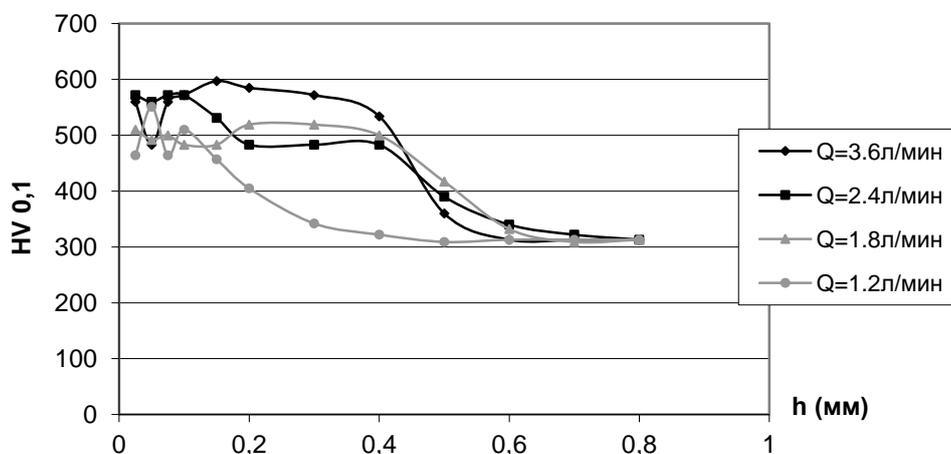


а)  $Q_{N_2} = 1,8$  л/мин; б)  $Q_{N_2} = 1,2$  л/мин

**Рисунок 6 – Микроструктура стали 14X17H2 (защитный газ азот)**

Анализ результатов рентгеноструктурных исследований показал, что с применением среды азота в фазовом составе образовался нитрид железа  $Fe_3N$ , что объясняется диффузионным насыщением азотом исходного материала.

На рисунке 7 приведено распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя.



1 – Q = 3.6 л/мин; 2 – Q = 2.4 л/мин; 3 – Q = 1.8 л/мин; 4 – Q = 1.2 л/мин

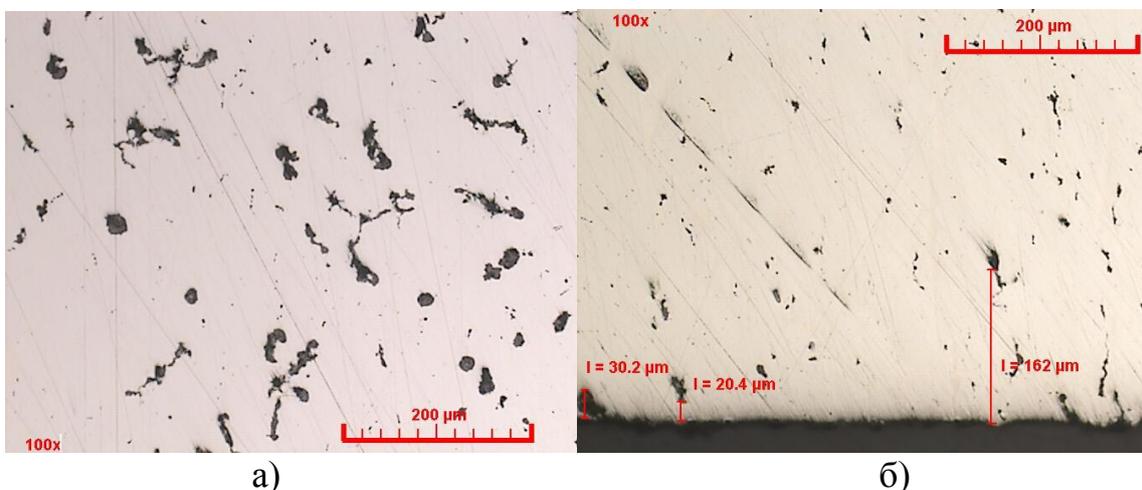
**Рисунок 7 – Характер распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя при различных расходах защитного газа азота**

Исследования показали, что глубина упрочненного слоя достигает ~0,55 мм, микротвердость выше почти в два раза микротвердости стали в исходном состоянии.

### Высокопрочный чугуун ВЧ-100

Высокопрочный чугуун ВЧ-100 по форме включения содержит шаровидный графит в сочетании с пластинчатым в виде мелких включений (рисунок 8а).

После термообработки микроструктура чугуна изменилась (рисунок 8б). Произошло растворение шаровидного графита, а пластинчатый принял вид мелких включений, т. е. произошел так называемый «белый излом» с образованием отбеленных слоев, характеризующихся низкой вязкостью.



**Рисунок 8 – Микроструктура высокопрочного чугуна ВЧ 100**

Микротвердость упрочненных образцов увеличилась почти в 1,3 раза по сравнению с исходным состоянием.

### **Заключение**

По результатам плазменного поверхностного упрочнения сталей и чугуна следует заключить:

- в процессе термообработки высококонцентрированным источником энергии за счёт высоких скоростей нагрева и охлаждения в упрочняемых деталях как стальных, так и чугунных, формируется поверхностный слой структуры, свойства которого недостижимы для традиционных способов упрочнения (объемная закалка, ТВЧ и др.);
- достигается высокая производительность процесса;
- при упрочнении без оплавления не требуется финишной обработки рабочей поверхности детали;
- появление в упрочнённом слое сжимающих напряжений и остаточного аустенита исключает процесс трещинообразования деталей;
- минимальные деформации деталей при термообработке позволяют повысить точность их изготовления;
- достигается высокий КПД нагрева даже при сравнении с лазерной закалкой;
- плазменная установка является мобильной, отличается простотой эксплуатации и обслуживания;
- ресурс работы упрочнённых деталей повышается в 1,5–2 раза.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Поверхностное упрочнение сталей плазменной закалкой / В. А. Линник [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1983. – № 4. – С. 2–4.
2. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.] – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

3. Коротков, В. А. Исследование влияния скорости охлаждения на качество поверхностного слоя при плазменной закалке / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, А. В. Шакуров // Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 23–27.

УДК 536.2

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЫХОДНОГО СЕЧЕНИЯ СОПЛА ИСТОЧНИКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУИ НА УРОВНИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*Веремейчик А. И., Холодарь Б. Г.*

*Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь*

Воздействие на элементы машин и механизмов подвижным тепловым потоком высокой интенсивности используется для модификации свойств материалов в приповерхностной зоне. Задачей воздействия является целенаправленное изменение фазового состава материала и его микроструктуры, что в свою очередь ведет к требуемому улучшению механических свойств материала. При этом основным вопросом является подбор оптимального режима теплового нагружения, который зависит прежде всего от уровня и скорости нагрева и следующего за ним охлаждения тела. В связи с этим расчеты температурных полей в соответствующих зонах материала имеют первостепенное значение.

Известно, что значительная трансформация материала в зоне термического воздействия происходит на небольших глубинах, составляющих в большинстве случаев доли миллиметра. Поэтому в качестве объекта теплового нагружения рассматривается обычно полупространство, что сводит к минимуму число граничных условий задачи и позволяет использовать для решения метод приложения мгновенных точечных источников тепла (метод Грина). Для такого источника энергии, расположенного в точке с координатами  $x_0, y_0, z_0$ , температура в любой точке тела и в любой момент времени описывается выражением:

$$T(r,t) = \frac{Q}{8(\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \quad (1)$$

где  $Q$  – выделение тепла в точке в единицу времени,  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$  – коэффициент

температуропроводности,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность материала,  $t$  – время,  $r^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2$  – расстояние до рассматриваемой точки. Здесь  $T$  – приращение температуры над исходным уровнем температуры тела в данной точке (для удобства далее принимаем одинаковым во всех точках).

Поскольку для реальных источников тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности (объему) тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (1) в пределах этой поверхности (объема):