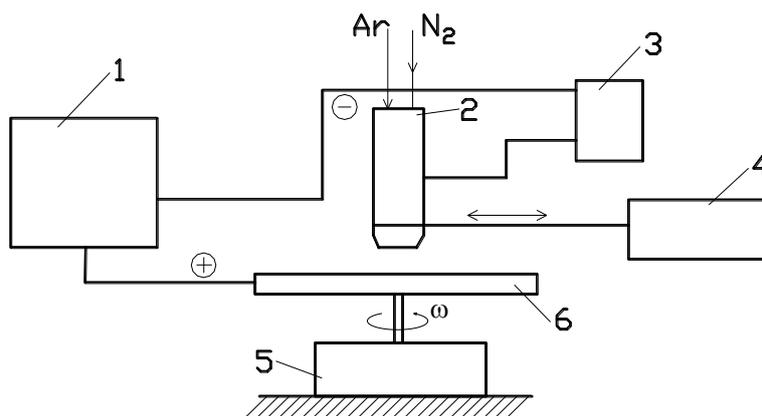


## ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ДОРОЖЕК ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В сегодняшних условиях производства широко используются низколегированные стали с высоким содержанием углерода и чугуны. Но эксплуатационные свойства и срок службы не отвечают постоянно растущим требованиям, предъявляемым к таким деталям. Это влечёт за собой частое обслуживание и замену отдельных узлов. Одним из вариантов решения таких задач является обработка концентрированным потоком энергии (лазерная, электроннолучевая, катодно-ионная и др.), но оборудование для такой обработки дорогое и сложное в освоении, требует использование вакуума, специальных помещений, что ограничивает габариты обрабатываемых деталей. Плазменная обработка лишена большинства этих недостатков [5].



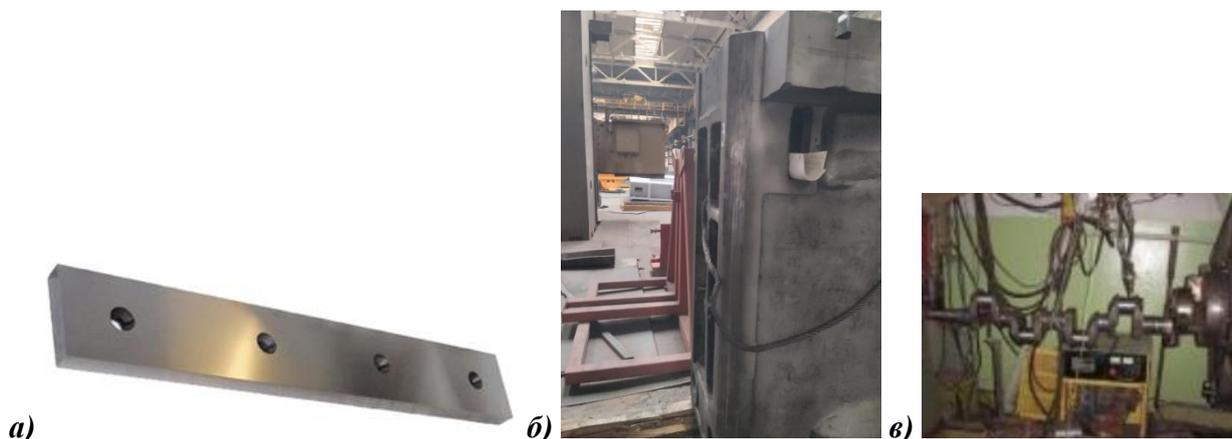
*1 – силовой источник питания; 2 – модернизированный плазматрон;  
3 – высокочастотный генератор; 4 – манипулятор;  
5 – манипулятор; 6 – упрочняемая деталь*

*Рисунок 1 – Принципиальная схема установки плазменной закалки*

В отличие от традиционных способов термообработки воздействие концентрированной плазменной струи включает одновременное тепловое, механическое и радиационное воздействие [4]. Суть поверхностного плазменного упрочнения состоит в быстром нагреве поверхностного слоя до аустенитного состояния и интенсивном охлаждении с целью получения высокой твердости, износостойкости и прочности приповерхностного слоя в сочетании с вязкой сердцевиной самого тела. Такое упрочнение реализуется путем локальной закалки с помощью быстро перемещающегося высокоинтенсивного концентрированного источника тепла – плазменной струи, генерируемой плазматроном постоянного тока мощностью до 1,4 кВт, и характеризуется рядом преимуществ:

- достаточно малой глубиной закалки до 0,7 мм и лишь в местах износа;
- твердость и износостойкость поверхностного слоя значительно выше, чем при объемной закалке;
- отсутствие термических деформаций благодаря локальности и кратковременности взаимодействия струи плазмы с поверхностью металла.

После распространения температурного поля в глубину детали на поверхности появляются сжимающие остаточные напряжения, которые могут достигать значительных величин. Величина и характер распределения этих термонапряжений изменяются в течение процесса нагрева и охлаждения. Основная причина возникновения термических напряжений – неравномерный нагрев или охлаждение различных объемов изделия. Временные (соответствующие определенному моменту времени) и остаточные (сохраняющиеся после полного выравнивания температур) структурные термические напряжения могут привести к образованию дефектов в подвергающихся термообработке изделиях. Скорость процесса охлаждения является фактором, существенно влияющим на результат термообработки, – ее увеличение способствует созданию более дисперсной мелкозернистой структуры материала и, соответственно, более мелких по размерам дефектов и более высоких показателей твердости и износостойкости.



*а) нож гильотины; б) ползун; в) коленвал  
Рисунок 2 – Обрабатываемые детали*

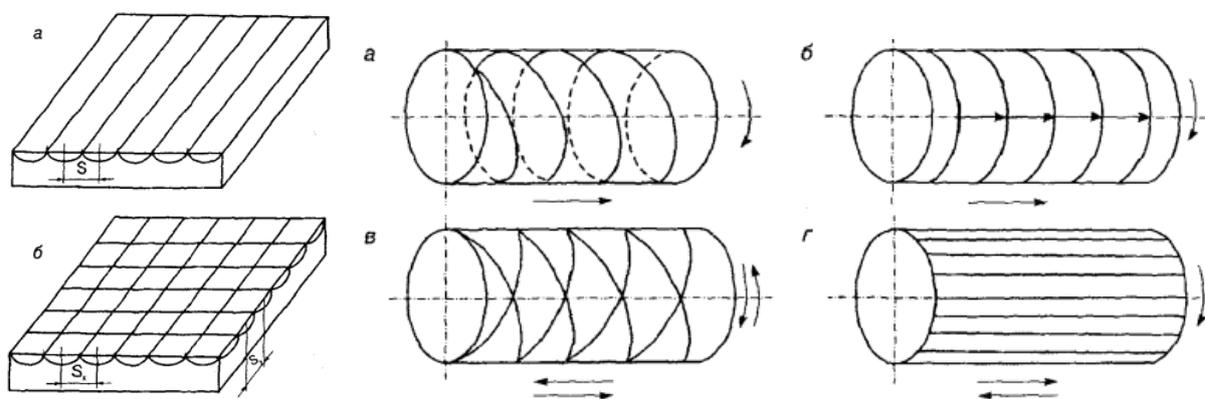
При плазменной закалке больших поверхностей возникает проблема перекрытия соседних закаленных областей. Наиболее широко встречаются два случая последовательного упрочнения полос: обработка плоских поверхностей и обработка цилиндрических поверхностей. При этом важной характеристикой является коэффициент перекрытия

$$K_p = S/L_{з.з} , \quad (1)$$

где  $S$  – шаг между закаленными зонами,  $L_{з.з}$  – ширина закаленной зоны.

Полосы могут быть выполнены с перекрытием (при  $K_p < 1$ ) и без перекрытия (при  $K_p \geq 1$ ). Под действием теплового поля, возникающего при формировании очередной полосы, происходит частичный отпуск соседних закаленных зон. При этом распределение твердости по ширине заготовки будет представ-

леть собой чередование участков с ее высокими и низкими значениями. Во многих случаях расположение упрочненных полос на некотором расстоянии друг от друга так, чтобы обработанная плазменной дугой площадь составляла 20-50 % общей площади, приводит к наибольшей износостойкости. Обработку плоских поверхностей ведут по двум схемам выполнения полос (рисунок 2): линейной (а) и клетчатой (б). Цилиндрические поверхности обрабатывают преимущественно по четырем схемам (рисунок 3): а – полосу выполняют по одной винтовой линии, б – полосу выполняют по двум винтовым линиям навстречу друг другу с постоянной осевой подачей  $S$ , в – кольцевые полосы, г – полосы выполняют вдоль оси по образующей с периодическим вращением детали для смещения на шаг  $S$ .



**Рисунок 3 – Схемы выполнения упрочняющих полос на плоской и цилиндрической поверхностях**

Уравнение для расчета температуры  $T$  в точке тела от действия перемещающегося с постоянной скоростью  $V$  вдоль оси  $x$  нормально-кругового источника теплоты в подвижной системе координат для одной полосы упрочнения имеет вид [1]:

$$T(x, y, z, t) = \left[ 2P_0 \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right) (c\gamma(4\pi a)^{3/2}) \right] \times \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi}(t_0 + \xi)} \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \xi)} - \frac{V^2(t_0 + \xi)}{4a}\right] d\xi, \quad (2)$$

где  $t$  – время,  $z$  – координата вдоль оси воздействия,  $P_0 = q_0 \frac{\pi}{k}$  – эффективная

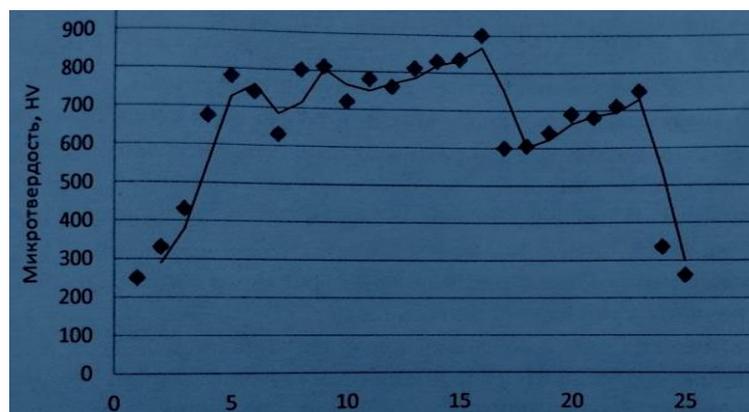
мощность источника тепла,  $k = \frac{1}{(r_f)^2}$  – коэффициент сосредоточенности потока;

$q_0$  – плотность теплового потока;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $a = \lambda/c\rho$ ,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность материала;  $r$  – текущий радиус;  $t_0 = \frac{1}{4ak}$  – постоянная времени.

Важным параметром в процессе плазменного упрочнения металлоизделий больших габаритов является оптимальное расположение закалочных полос. Для

решения этой проблемы целесообразно рассмотреть случай, когда плазменные «дорожки» перекрываются в процессе упрочнения.

Проведены эксперименты по упрочнению заготовки из стали 45 с целью определения микротвердости в закаленных зонах. В качестве образца использовали пластину толщиной 10 мм. На этом образце закалили последовательно одну за другой две полосы с частичным перекрытием. Измерение микротвердости проводили в поперечном сечении образца на расстоянии около 0,1 мм от поверхности. По результатам измерений построен график (рисунок 4) распределения микротвердости в зависимости от расстояния от края второй полосы. Из графика видно, что в закаленной зоне микротвердость увеличилась примерно в 2 раза (с HV300 до HV650-750). При этом в зоне перекрытия полос микротвердость снизилась на HV50-100 вследствие отпускных процессов.



*Рисунок 4 – График распределения микротвердости в зависимости от расстояния от края второй полосы*

Поверхностное плазменное упрочнение металлоизделий существенно повышает твердость поверхностного слоя при сырой «сердцевине».

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования служат одной из основ разработки технологии поверхностного плазменного упрочнения габаритных металлоизделий.

Результаты экспериментов позволяют разработать рекомендации по оптимизации процесса нанесения закалочных полос на детали с целью повышения их эксплуатационных свойств.

#### **Список цитированных источников**

1. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов [и др.]; под общ. ред. В. И. Чачина. – Минск : Вышэйшая школа, 1988. – 155 с.
2. Тюрин, Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин. – К. : Наукова думка, 2008. – 215 с.
3. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский [и др.]; под общ. ред. Л. К. Лещинского. – Киев : Техніка, 1990. – 109 с.
4. Крауз, В. И. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / В. И. Крауз, Ф. Симоне, Д. Моуренас; гл. ред. В. Е. Фортов. – 2007. – Сер. Б “Справочные приложения, базы и банки данных”. Тематический том IX-3. Радиационная плазмодинамика. – 541 с.
5. Лашенко, Г. И. Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лашенко – Киев : Екотехнологія, 2003. – 64 с.