

### Список цитированных источников

1. Немчинский, А. Л. Тепловые расчеты термической обработки / А. Л. Немчинский. – Л. : Судпром, 1953. – 106 с.
2. Веремейчик, А. И. Температурное поле в ноже гильотинных ножниц при действии движущегося нормально-кругового источника нагрева / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич, Б. Г. Холодарь // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сборник статей / Брестский государственный технический университет. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 188–193.
3. Веремейчик, А. И. Температурное поле в ноже гильотинных ножниц при локальной поверхностной плазменной закалке / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич // Актуальные проблемы прочности: материалы междунар. науч. конф., г. Минск, 23–27 мая 2022 г. / под ред. В. В. Рубаника – Минск : УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 375–376.
4. Сафонов, Е. Н. Плазменная закалка деталей машин: монография / Е. Н. Сафонов // М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 116 с.

УДК 004.94:539.3

*Ярмак М. А.; Парafenюк Н. Д.*

*Научный руководитель: к. ф.-м. н., доцент Веремейчик А. И.*

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ

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 влечет 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 из этих недостатков [1].

Поверхностное упрочнение может производиться тремя основными группами методов.

Механические методы: дробеструйная обработка (ABSP), механическая обработка поверхности истиранием (SMAT), ультразвуковая дробеструйная обработка (USP), абразивно-струйная обработка (SB), лазерное ударное упрочнение (LSP).

Термические методы: обработка ТВЧ, цементация, азотирование, плазменная закалка, плазменное азотирование, лазерная обработка.

Химические и электрические методы: химическое осаждение пленок (CVD), анодирование, ионное осаждение [2].

Наиболее перспективными методами поверхностной обработки являются лазерная и плазменная локальные поверхностные закалки.

В отличие от традиционных способов термообработки воздействие концентрированной плазменной струи (дуги) включает одновременное тепловое,

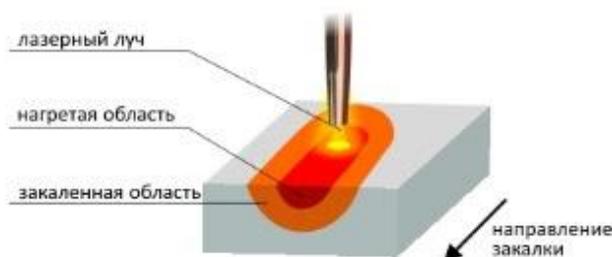
механическое и радиационное воздействие. Закалка сталей нагревом концентрированными потоками энергии по аналогии с другими видами закалки, заключается в образовании аустенитной структуры при нагреве и дальнейшем превращении ее в мартенсит на стадии охлаждения. В этом случае тепловая энергия превышает энергию, необходимую для перестройки кристаллической решетки. Такое упрочнение реализуется путем локальной закалки с помощью быстро перемещающегося высокоинтенсивного концентрированного источника тепла – плазмотрона, характеризующегося следующими преимуществами:

- достаточно малой глубиной закалки – до 0,7 мм и лишь в местах износа;
- твердостью и износостойкостью поверхностного слоя, которая значительно выше, чем при объемной закалке;

отсутствием термических деформаций благодаря локальности и кратковременности взаимодействия струи плазмы с поверхностью металла [3–4].

Поверхностная закалка широко используется для повышения износостойкости стальных механических деталей, таких как шестерни, валы, прокатные валки, штампы и т. д., в различных отраслях промышленности. Это достигается преобразованием поверхностной структуры стали из аустенита в мартенсит путем приложения соответствующего количества тепла с последующим быстрым охлаждением нагретого слоя. Этот процесс обычно осуществляется с помощью плазменного пучка, лазерного луча, электронного луча или пламени [5].

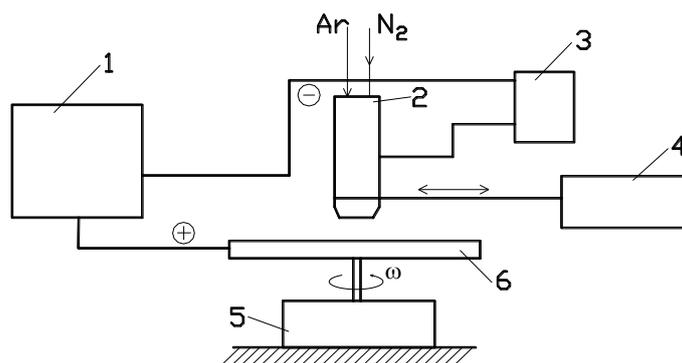
После распространения температурного поля в глубину детали на поверхности появляются сжимающие остаточные напряжения, которые могут достигать значительных величин. Величина и характер распределения этих термонапряжений изменяются в течение процесса нагрева и охлаждения. Основная причина возникновения 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.



*Рисунок 1 – Схема лазерной закалки*

Сфокусированный лазерный луч (рисунок 1) быстро нагревает поверхностный слой металла до температуры, при которой его микроструктура превращается из ферритной или перлитной фазы в аустенитную. Большая температура

изменяет расположение атомов углерода в структуре металла, после чего начинается аустенитное превращение.



*Рисунок 2 – Принципиальная схема установки плазменной закалки*

Установка для плазменного поверхностного упрочнения (рисунок 2) состоит из 1 – силового источника питания; 2 – модернизированного плазмотрона; 3 – высокочастотного генератора; 4 – манипулятора; 5 – манипулятора; 6 – упрочняемой детали.

Из-за высокой скорости нагрева диффузионные процессы перестройки решетки объемноцентрированного куба доэвтектоидного феррита в решетку границентрированного аустенитного куба могут не заканчиваться на линии GS Fe<sub>3</sub>C-диаграммы и сдвигаться в область более высоких температур. Также может произойти микроплавление границы цементита и аустенита. В результате образуется структура, особенности которой определяются степенью завершенности процесса аустенизации. При достаточно высокой температуре нагрева или при относительно длительной выдержке возможно образование однородного аустенита. При меньших температурах помимо аустенита и мартенсита в структуре могут существовать нерастворившиеся карбиды [1].

При нагреве поверхности детали плазменной дугой прямого действия основной характеристикой термического цикла является максимальная температура, время пребывания этой точки выше температуры точки. Взаимозависимые скорости нагрева и охлаждения определяются комбинацией параметров режима обработки. Например, при прочих равных условиях максимальная температура цикла и время пребывания нагретого объема в аустенитной области уменьшаются с увеличением скорости движения дуги. Скорость охлаждения увеличивается [5].

#### **Список цитированных источников**

1. Лашенко Г. И. Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лашенко. – Киев : Екотехнологія, 2003.
2. Rezayat, M. Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels / M. Rezayat [et al]. – Metals 2023, 13. – 1268.
3. Тюрин, Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин. – Киев : Наукова думка, 2008. – 215 с.
4. Лещинский Л. К. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский [и др.]; под общ. ред. Л. К. Лещинского. – Киев : Тэхніка, 1990. – 109 с.
5. Safonov, E. N., Mironova, M. V. (2018). Plasma hardening hypereutectoid steel / E. N. Safonov, M. V. Mironova. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 411, 012069.