

5. Привод соосных исполнительных органов проходческого комбайна. (ВУ) Полезная модель № 9587 (Е 21С 31/00) от 04.014.2013. Оpubл. БИ 30.10.2013. / В. Я. Прушак [и др.].

6. Басалай, Г. А. Удельные затраты энергии на работу соосных роторов проходческого комбайна / Г. А. Басалай. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXI МНТК «Чтения памяти Р. В. Кубачека», проведенной в рамках Уральской промышленной декады 6–7 апреля 2023 г. / под общ. ред. Ю. А. Лагуновой. – Екатеринбург УГГУ, 2023. – С. 21–25.

7. Привод исполнительного органа проходческого комбайна. (ВУ) Патент № 14177 (Е 21С 31/00) от 30.01.2009. Оpubл. БИ 30.08.2010 / Г. А. Басалай [и др.].

8. Планетарный исполнительный орган проходческо-очистного комбайна. (ВУ) Полезная мод. № 9284 (Е 21С 31/04) от 21.12.2012. Оpubл. БИ 30.06.2013 / Г. А. Басалай [и др.].

9. Привод спаренного планетарного исполнительного органа проходческо-очистного комбайна. (ВУ) Полезная мод. № 10189 (Е 21С 31/04) от 16.12.2013. Оpubл. БИ 30.06.2014 / Г. А. Басалай [и др.].

Поступила 2.11.2023

УДК 621.791

Веремейчик А. И.¹, Овчинников Е. В.², Онысько С. Р.¹, Сазонов М. И.¹,

Хвисевич В. М.¹, Хеук М. В.¹

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО
ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА
ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ 45**

1. Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»,

Брест, Беларусь

2. Учреждение образования «Гродненский государственный университет

им. Я. Купалы», Гродно, Беларусь

На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса поверхностного плазменного упрочнения изделий из стали 45, определены оптимальные энергетические параметры генератора плазмы плазменной установки, кинематические параметры источника плазмы, теплофизические характеристики поверхностного слоя металла, что позволяет усовершенствовать процесс упрочнения и создавать поверхностный слой металлоизделий с управляемыми механическими свойствами.

Введение. Повышение срока службы деталей машин и механизмов остается актуальным вопросом и в настоящее время. Для решения этой проблемы в машиностроительной отрасли применяются различные упрочняющие технологии, в которых используются термические методы упрочнения: объемная закалка, электронно-лучевые, катодно-дуговые, лазерные и плазменные методы.

Как показала практика, технология плазменного поверхностного упрочнения является наиболее доступной, рациональной, экономически и экологически эффективной по сравнению с другими технологиями упрочнения изделий концентрированными источниками нагрева где используется сложное и дорогостоящее оборудование, предъявляются высокие требования к его техническому состоянию [1]. 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 связи с этим дальнейшее совершенствование технологий плазменного упрочнения в настоящее время является актуальной задачей [1–19].

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

Анализ литературных источников показал, что исследователи уделяют большое внимание процессам упрочнения с помощью лазерного воздействия. Для способов упрочнения, где используются локальные источники тепла, особый интерес представляют исследования температурных полей в зоне нагрева, скоростей нагрева и охлаждения металла при движущемся источнике [20–23]. Согласно [1; 16], воздействие высококонцентрированных источников нагрева на поверхность стальных изделий приводит к структурным, фазовым и аллотропическим превращениям в металле. Исходя из этого изучение влияния тепловых процессов на формирование упрочненного поверхностного слоя с целью получения оптимальных прочностных и износостойких свойств, обусловленных этими превращениями, представляет практически важную задачу. Для анализа физико-механических параметров в поверхностном слое металла необходимо определить оптимальные режимы процесса упрочнения, которые зависят главным образом от характеристик генератора плазмы: тока и напряжения дуги; вида защитного и плазмообразующего газов; расстояния от среза сопла генератора плазмы до поверхности детали; скорости движения источника.

Постановка задачи. Для реализации метода поверхностного упрочнения стальных изделий создана экспериментальная установка, состоящая из роботизированного комплекса *Advercut K6090T* с разработанным к нему узлом крепления плазменного генератора (рис. 1).

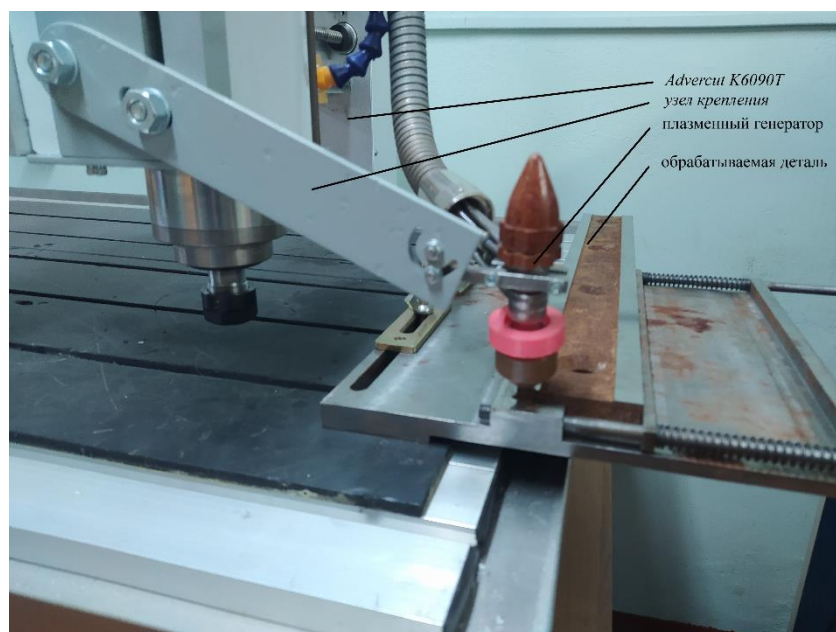


Рис. 1. Фрагмент экспериментальной установки для поверхностного плазменного упрочнения стальных изделий

Установка состоит из силового источника питания дуги 1, плазмотрона постоянного тока 2, устройства ВЧ-поджига дуги 3, упрочняемой детали 4 (рис. 2), а также систем газоснабжения плазмотрона аргоном, азотом и системы водоохлаждения. Силовой

источник питания обеспечивает горение дуги при напряжениях (14–35) В и токах дуги до 30 А. Поджиг дуги производится при помощи высоковольтного ВЧ-генератора, который подключен одним полюсом к катоду плазмотрона, другим – к его соплу. Перед запуском устанавливаются заданные расходы рабочего газа (аргона) и защитного газа (азота), задается определенная скорость перемещения. Затем на плазмотрон подается напряжение от силового источника и включается ВЧ-генератор, который обеспечивает пробой газового зазора между катодом и соплом. В этот момент сопло служит поджигающим электродом. По образовавшемуся искровому каналу развивается дежурная дуга между катодом и соплом. Ток дуги устанавливается в пределах (4–6) А и ограничивается переменным сопротивлением R (включено в электрическую цепь между соплом и анодом). Под действием потока аргона слаботочная дуга выдувается из плазмотрона и замыкается на анод-деталь. Приложенное напряжение к плазмотрону от силового источника обеспечивает загорание основной дуги между катодом и анодом, а дежурная дуга автоматически отключается.

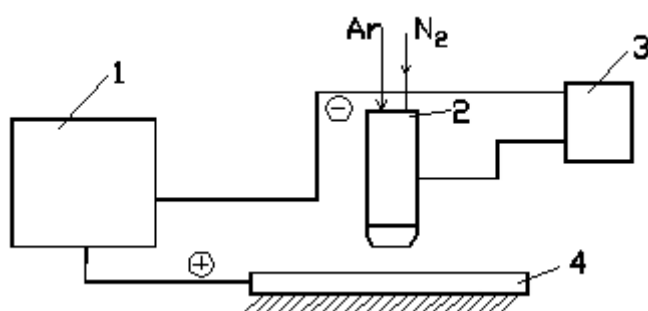


Рис. 2. Принципиальная схема установки для поверхностного упрочнения:
 1 – силовой источник питания; 2 – модернизированный плазмотрон;
 3 – высокочастотный генератор; 4 – упрочняемая деталь

Аргон и азот подаются из баллонов высокого давления через редукторы и вентили. Измерение расходов газов осуществляется с помощью ротаметров *PM-0,63 ГУЗ*.

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 тело образца. Исследование скоростей нагрева и охлаждения в зависимости от режимов работы плазмотрона проведены в работах [21; 22]. При воздействии высококонцентрированного источника тепла в зоне термического влияния образуется мартенситно-аустенитная структура. Следует отметить, что структурные превращения при плазменном упрочнении происходят в основном также, как и при объемной закалке, однако, высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к увеличению плотности дислокаций и термонапряжений в кристаллической решетке, что существенно увеличивает твердость поверхностного слоя. Так [3], например, твердость стали при объемной закалке (48–53) HRC, закалке ТВЧ (51–56) HRC, плазменной закалке (54–59) HRC. Основное достоинство плазменной закалки заключается в существенном увеличении твердости приповерхностного слоя изделия и сохранении исходных свойств металла в его внутренних слоях, что повышает сопротивление усталости и изнашиванию детали, и что недостижимо при традиционных методах упрочнения. Отметим также, что глубина модифицированного слоя при воздействии плазменного источника нагрева варьируется в пределах (0,5–2,5) мм, ширина упрочняющей зоны – (5–15) мм [4]. Процесс плазменного упрочнения может осуществляться с оплавлением и без

оплавления поверхностного слоя. Во втором случае упрочненная зона не требует финишной обработки.

Проведены исследования вольт-амперных характеристик дуги при токах (7–30) А, при этом напряжение дуги составляет (14–35) В в зависимости от соотношения расходов аргона и азота.

Для исследования свойств упрочненного поверхностного слоя применялись металлографический, фазовый, рентгеноструктурный анализы. Шероховатость Ra поверхностного слоя определялась с помощью измерительного комплекса с лазерным сканированием *Mistral 070705* фирмы *Brown&sharpe* с программным обеспечением *PC-dmis PRO Software*, позволяющего производить контроль в 3D с предоставлением протоколов контроля (точность измерения 0,003 мм). Для определения влияния плазменной дуги на микроструктуру и свойства стали выполнен металлографический анализ образцов в форме параллелепипеда с нанесенной плазменной дорожкой.

Для определения оптимальных режимов термообработки, помимо экспериментальных исследований, использовались результаты численного решения задачи нестационарной теплопроводности при воздействии движущегося локального источника нагрева на основе разработанного алгоритма [22].

Результаты исследования процесса. Для совершенствования процесса поверхностной плазменной закалки в качестве материала выбрана сталь 45, свойства которой достаточно изучены при обработке лазером, микроплазменной дугой и другими методами [1–6]. Этот факт позволяет оценить достоверность результатов поверхностного плазменного упрочнения с помощью разрабатываемого метода. При термообработке осуществляется высокоскоростной нагрев с быстрым охлаждением, что приводит к упрочнению зоны нагрева, т. е. вследствие 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.

Выполнен микроструктурный анализ сталей при термообработке образцов с использованием аргона и азота в качестве защитных газов. Типичная микроструктура поверхностного слоя стали 45 при термообработке в защитной среде аргона приведена на рис. 3. Зона влияния плазменной струи имеет форму сегмента и по своему строению аналогична зоне влияния при термообработке стали лазером и электронным лучом.

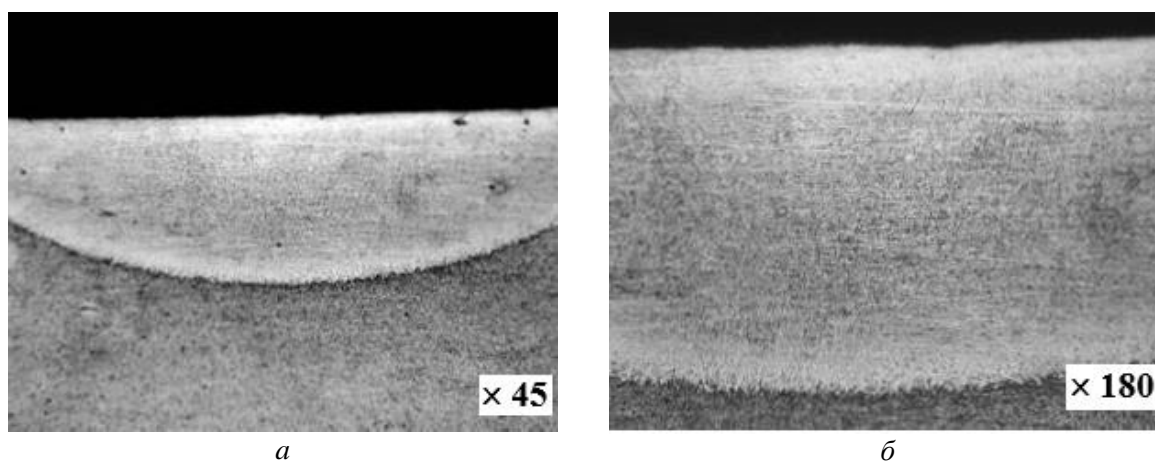


Рис. 3. Микроструктура стали 45 при термообработке в среде аргона: *a* – зона влияния плазменной струи; *б* – микроструктура зоны нагрева

Воздействие плазменной дуги на поверхность образца приводит к изменению микрогеометрии поверхности. При упрочнении в твердой фазе закалка металла происходит

без оплавления и шероховатость поверхности остается такой же, как и при механической обработке в исходном состоянии. Эксперименты показали, что поверхностное упрочнение сталей высококонцентрированным источником нагрева можно осуществлять с оплавлением и без оплавления поверхности (из жидкого состояния; в твердой фазе).

С помощью системы *Mistral 070705* построена топография поверхности образцов из стали 45 без оплавления и с оплавлением (рис. 4).

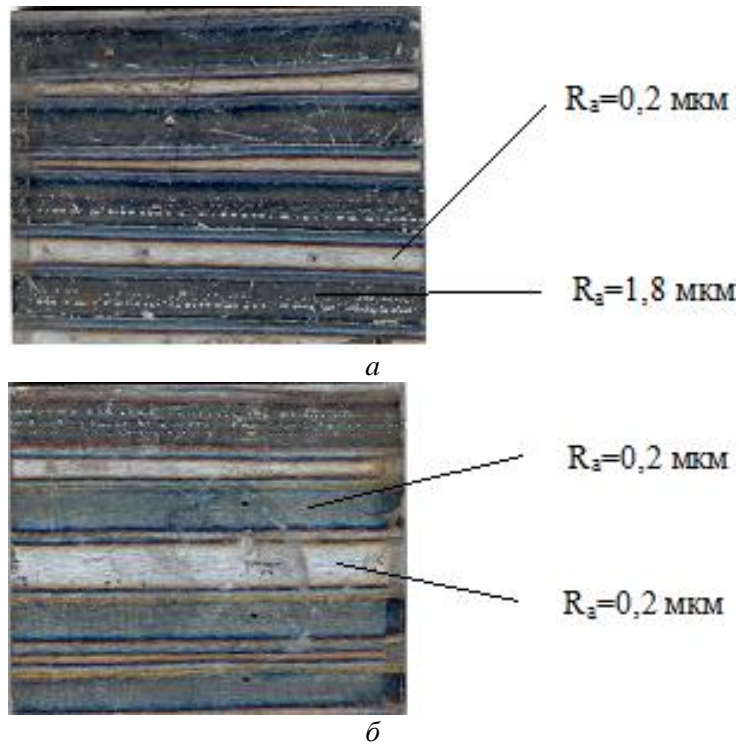


Рис. 4. Микрогеометрия поверхности образцов после термообработки:
 а – с оплавлением поверхности; б – без оплавления поверхности

На рис. 5 показано распределение микротвердости стали 45 по глубине упрочняющего слоя.

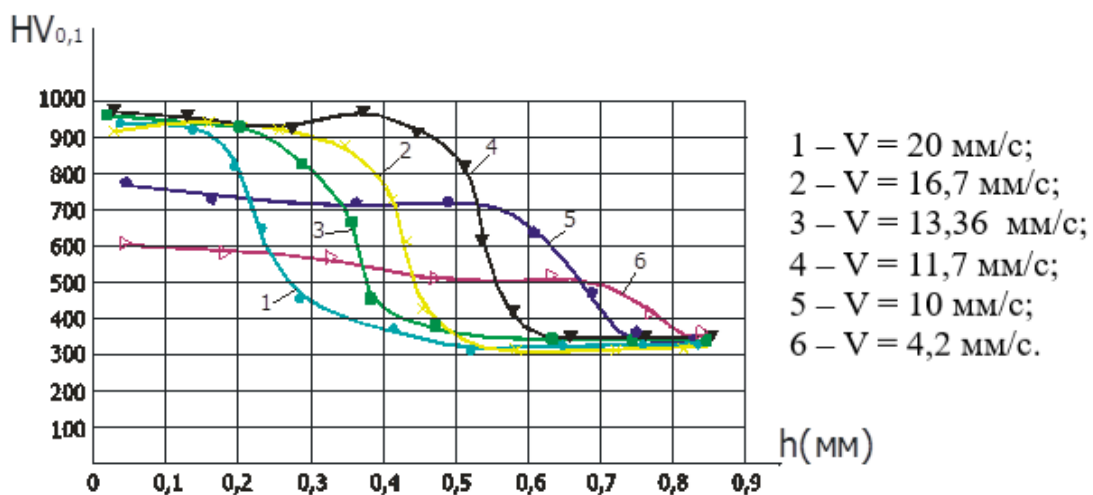


Рис. 5. Зависимости распределения микротвердости стали 45 по глубине поверхностного слоя

В табл. 1 указаны режимы плазменной закалки поверхности и результаты измерения микротвердости в точках по длине дорожки.

Таблица 1 – Режимы плазменной закалки и значения микротвердости

Номер дорожки	d , мм	h , мм	U , В	I , А	v , см/с	$G_{осн}(Ar)$, л/мин	$G_{защ}(Ar)$, л/мин	Микротвердость HV		
								слева (л)	центр (ц)	справа (п)
35	1,8	1,4	39	23	10	10	60	379,498	525,916	365,344
36			38	22	26	8	60	418,747	484,35	461,372
37			39	23	26	10	80	368,889	571,976	373,049
38			39	23	20	10	80	380,359	561,788	398,864
40			40	23	20	10	80	447,63	525,653	424,195
41			42	26	20	10	80	482,081	675,484	550,808
43			42	26	16	10	80	502,831	693,988	522,978
44			42	26	16	10	80	572,892	663,479	499,025
45			39	23	16	10	80	499,607	573,536	487,471

Примечание: d – диаметр сопла; h – расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности; U – напряжение дуги; I – ток дуги; v – скорость движения источника нагрева; $G_{осн}(Ar)$ – расход основного газа; $G_{защ}(Ar)$ – расход защитного газа.

На рис. 6 показано распределение микротвердости стали 45 по ширине дорожки.

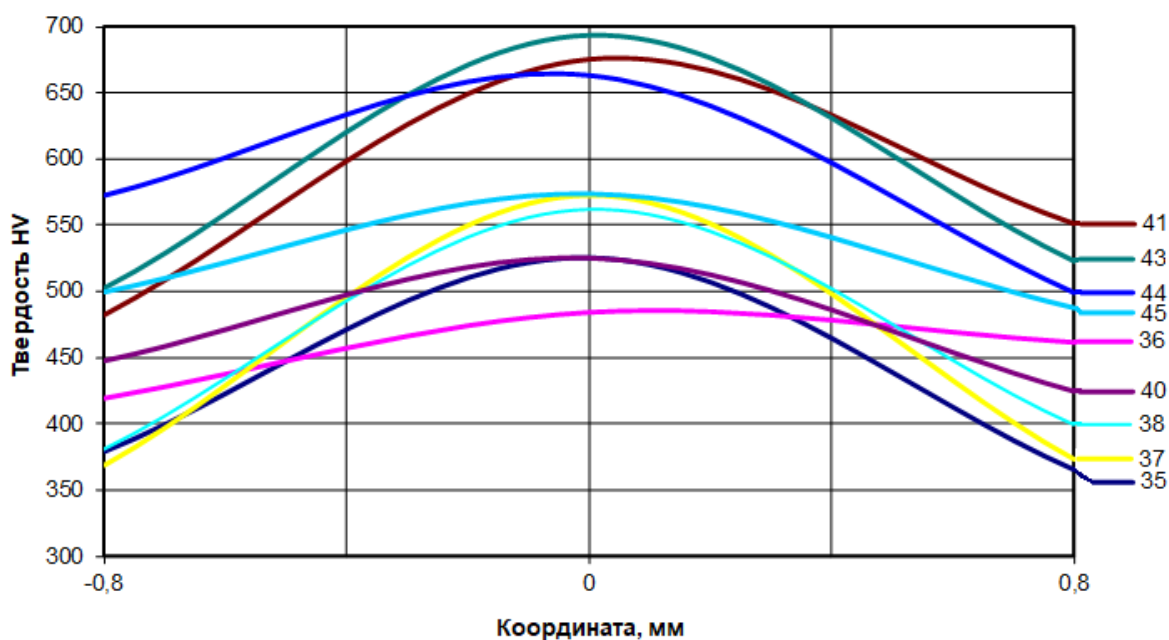


Рис. 6. Зависимости микротвердости стали 45 по ширине дорожки

На рис. 7 показана микроструктура поверхности упрочненной зоны образца в зависимости от режимов плазменной закалки. На каждой дорожке произведено девять замеров микротвердости. Точки промеров распределены по длине следующим образом: по три точки вначале участка (слева); по центру (центр); в конце участка (справа).

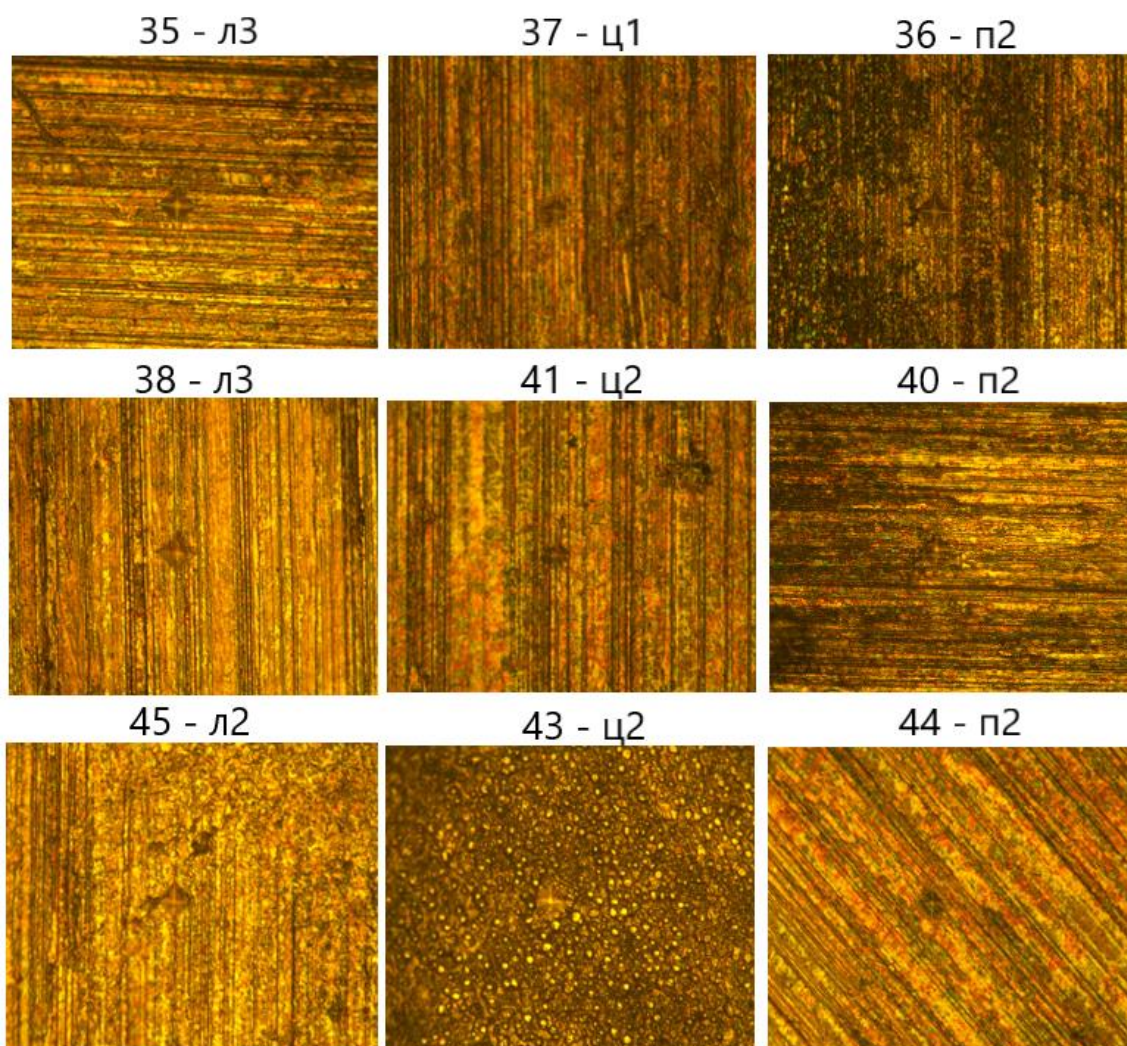


Рис. 7. Микроструктура поверхности упрочненной зоны

Анализируя профилограммы, можно заключить, что шероховатость поверхности порядка $Ra = 0,2$ мкм после механической обработки образцов сохраняется такой же и после обработки плазменной дугой.

Как видно из рис. 7, поверхность образца с оплавлением имеет сложный рельеф, обусловленный системой впадин и гребней. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при закалке поверхности в твердой фазе целесообразно применить аргон в качестве защитного газа, который в меньшей степени, чем азот, обжимает дугу. В результате снижается плотность потока энергии, которую поглощает поверхность, и температура поверхностного слоя металла получается ниже температуры его плавления.

Согласно [12; 14], плазменная закалка сталей без оплавления поверхности является наиболее распространенной, т. к. обеспечивает сохранение необходимых качеств поверхности изделия (шероховатость), которые получены механической обработкой. В этом случае процесс поверхностной плазменной закалки используется как финишная операция. Необходимые значения твердости, размеры зоны воздействия струи и другие параметры можно регулировать в широких пределах. В случаях, когда для детали необходимо получить особенные эксплуатационные свойства или к шероховатости рабочей поверхности не предъявляются высокие требования, используют плазменную закалку с оплавлением поверхности.

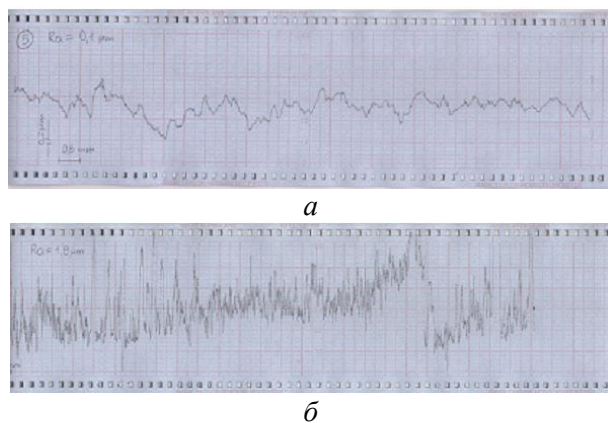


Рис. 8. Профилограмма поверхности образцов после термообработки:
a – без оплавления поверхности; *б* – с оплавлением поверхности

Большое влияние на изменение шероховатости поверхности оказывает ток дуги, скорость движения источника и объемы расхода газов. Эксперименты показали, что шероховатость поверхности в диапазоне (0,1–20) мкм для образцов из стали 45 можно получать, варьируя процентным отношением смеси защитных газов аргон/азот. Установлено, что при 30 % содержании азота и 70 % аргона в смеси термообработка происходит без оплавления поверхности, повышение же процентного содержания азота приводит к оплавлению поверхности (технологические параметры процесса: ток дуги $I = 26$ А, скорость перемещения источника $v = 11,7$ мм/с). Оплавление поверхности можно получить также, изменяя скорость движения источника при постоянстве других технологических параметров.

Заключение. По результатам исследований установлено:

- в процессе термообработки плазменным источником энергии за счет высоких скоростей нагрева и охлаждения в упрочняемой стали формируется поверхностный слой структура и 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;
- наименьшая шероховатость поверхности порядка 0,2 мкм получается при воздействии дуги в защитной 100 % среде аргона при $v = 11,7$ мм/с, $I = 26$ А;
- появление в упрочненном слое сжимающих напряжений и остаточного аустенита исключает процесс трещинообразования деталей;
- минимальные деформации деталей при термообработке позволяют повысить точность их изготовления;
- достигается высокий КПД нагрева по сравнению с другими методами термообработки;
- плазменная установка является мобильной, отличается простотой эксплуатации и обслуживания.

Таким образом, на основе экспериментальных исследований установлены зависимости между мощностью генератора плазмы, током и напряжением электрической дуги, объемами защитного и плазмообразующего газов. Получены зависимости микротвердости стали от режимов термообработки в области воздействия источника плазмы.

Результаты исследований послужили основой для совершенствования процесса упрочнения стали 45, управления механическими свойствами упрочненного поверхностного слоя и получения микротвердости (560–670) HV_{0,1}, что в 2,2 раза выше микротвердости исходного материала. Толщина упрочненного слоя может изменяться в зависимости от скорости упрочнения от 0,5 до 0,7 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов. – Мн. : Вышэйшая школа, 1988. – 155 с.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский, С. С. Самотугин, И. И. Пирч, В. И. Комар. – Киев : Тэхника, 1990. – 109 с.
3. Сафонов, Е. Н. Поверхностное упрочнение деталей из стали и чугуна плазменной закалкой / 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. – 28 с.
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.
5. Поверхностное упрочнение инструментальных сталей и сплавов при нагреве высококонцентрированной плазменной струей / С. С. Самотугин, О. Ю. Нестеров, В. А. Мазур [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 23–28.
6. Шнайдер, Б. И. Микроплазменная обработка материалов / Б. И. Шнайдер. – Киев : Наукова думка, 1976. – 56 с.
7. Самотугин, С. С. Свойства инструментальных сталей при плазменном упрочнении с оплавлением поверхности / С. С. Самотугин, Н. Х. Соляник, А. В. Пуйко // Сварочное производство. – 1994. – № 11. – С. 20–24.
8. Алибеков, С. Я. Плазменное упрочнение деталей машин / С. Я. Алибеков, М. В. Шалагин, С. В. Сластихина, Е. В. Соловьева, Р. С. Сальманов // Вестник технологического университета. – 2013. – Т. 16, в. 17. – С. 218–219.
9. Коротков, В. А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями / В. А. Коротков, А. А. Бердников, И. А. Толстов. – Челябинск : Металл, 1993. – 144 с.
10. Балановский, А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А. Е. Балановский. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2006. – 180 с.
11. Влияние плазменно-дуговой обработки на структурные превращения и поверхностное упрочнение углеродистых и легированных сталей / Д. С. Ставрев, Л. М. Капуткина, С. К. Киров [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 9. – С. 16–19.
12. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр. Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.
13. Сазонов, М. И. Теоретические и экспериментальные исследования процесса поверхностного плазменного упрочнения режущего инструмента / М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик, В. В. Гарбачевский // Вестник Брестского государственного технического университета. – Серия: Машиностроение. – Брест: БрГТУ, 2013. – С. 28–31.
14. Davis, J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics / J. R. Davis // ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. – 319 p.
15. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – М. : Металлургия, 1983. – 359 с.
16. Влияние плазменно-дуговой обработки на структурные превращения и поверхностное упрочнение углеродистых и легированных сталей / Д. С. Ставрев, Л. М. Капуткина, С. К. Киров [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 9. – С. 16–19.

17. Сафонов, Е. Н. Закалка поверхностного слоя деталей машин плазменной дугой прямого действия / Е. Н. Сафонов, И. С. Дружинин, Н. В. Орлова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 9. – С. 23–30.

18. Поверхностное упрочнение сталей плазменной закалкой / В. А. Линник [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1983. – № 4. – С. 2–4.

19. 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.

20. Немчинский, А. Л. Тепловые расчеты термической обработки / А. Л. Немчинский. – Л. : Судпром, 1953. – 106 с.

21. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

22. 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 : Издательство БрГТУ, 2022. – С. 188–193.

23. 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. Рубаник. – Минск : УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 375–376.

Поступила 13.02.2023

УДК 621.793

Девойно О. Г., Рудницкий А. Ю., Володько А. С., Вегера И. И.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ИНДУКЦИОННЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ В РЕЖИМЕ ЗАКАЛКИ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В статье описана возможность использования метода оплавления с помощью ТВЧ с одновременной закалкой из жидкого состояния никелевых самофлюсующихся сплавов. В статье исследовались макрогеометрия поверхности, а также влияние режимов на трещинообразование в полученном покрытии и твердость поверхности. В работе приводится информация о влиянии режимов индукционной обработки на трещинообразование и на физико-механические свойства. В работе показана возможность использования метода ТВЧ с одновременной закалкой омытием струями воды из расплавленного состояния для оплавления покрытий из никелевого сплава. В статье констатируется, что, управляя режимами оплавления, можно изменять физико-механические свойства.

Введение. В настоящее время инженерия поверхности играет все более возрастающую роль в получении изделий с заданным уровнем поверхностных свойств [1]. Использование износостойких, коррозионностойких, жаростойких, химически стойких, электроизоляционных, теплоизоляционных и других видов покрытий позволяет резко сократить потери металлов, расход ресурсов на их возмещение и дает возможность повысить качество, надежность и долговечность машин и оборудования [2]. Это значительно сокращает себестоимость их обслуживания за счет снижения затрат на ремонтные работы, снижения количества запасных комплектующих, а также уменьшение простоя машин.