

Более высокие скорости проволоки в экспериментах, по сравнению с расчетными значениями, свидетельствуют о том, что реальная поверхностная плотность теплового потока несколько выше, чем определенная с помощью калориметрического зонда.

Таким образом, экспериментально определены теплофизические параметры факелов установок активированного газопламенного напыления порошковых и проволочных материалов. Используя полученные данные расчетным путем найдены значения максимальной производительности процесса ГПН при напылении порошков полимеров и распылении проволок из различных металлов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белоцерковский М.А., Федаравичус А.В. Разработка технических средств для газопламенного напыления полимерных покрытий // Машиностроитель. – 2002. - №12. – С.13-15.

2. Белоцерковский М.А. Восстановление деталей методом активированного газопламенного напыления // Тяжелое машиностроение. – 2004. - №2. – С. 38-41.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия. -1969. – 440 с.
4. Иванов Е.М., Углов А.А., Усов В.Ф. Нагрев сферических частиц в высокотемпературном газовом потоке // Физика и химия обработки материалов. – 1993. - № 3. – С. 77-86.
5. Дорожкин Н.Н., Шипай А.К., Белоцерковский М.А. Исследование температурных характеристик газового пламени // Достижения в области технологии газотермических покрытий и методов их диагностики: Труды конф. – Апатиты, 1989. – С. 99-107.
6. Сергеев В.А., Безладнов Г.М., Ляшкевич В.Д. Экспериментальное исследование нагрева затупленных тел потоком плазмы // Инженерно-физический журнал. – 1971. Т. XX. – № 4. – С. 49-54.

УДК 621.793.6:785.5

*Хвиевич В.М., Сазонов М.И., Якушевич С.*

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ 45 И 40Х ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

Плазменные технологии относятся к разряду наиболее перспективных и в настоящее время интенсивно разрабатываются. Исследования и практика их применения показали, что плазменный источник нагрева эффективно может применяться наряду с лазерным и электронно-лучевым источниками, обеспечивая высокую эффективность процесса. Такие источники нагрева с высокой плотностью мощности позволяют осуществлять поверхностную закалку изделий, сущность которой заключается в фазовых и структурных превращениях при скоростном концентрированном нагреве поверхности и теплоотводе в материал детали. В результате значительных скоростей нагрева и охлаждения получают поверхностные слои с более высоким уровнем эксплуатационных свойств по сравнению с традиционными методами упрочнения (печная и газопламенная закалки, закалка ТВЧ и др.), т.е. осуществляется поверхностная плазменная закалка (ППЗ).

#### Материал и методика

Для поверхностной плазменной закалки (ППЗ) стальных изделий создана плазменная установка с модернизированным плазмотроном, который генерирует плазменную струю с плотностью теплового потока  $2,5 \cdot 10^7 - 6,0 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> (плазмобразующий газ – аргон, защитный газ – аргон или азот).

Исследования проводили на образцах изготовленных из среднеуглеродистой стали 45 (0,45 % С; 0,25 % Si; 0,6 % Mn) и среднеуглеродистой низколегированной стали 40 X (0,42 % С; 0,25 % Si; 0,6 % Mn; 1,1 % Cr; 0,3 % Ni; 0,2 % W). Плазменную обработку стали 45 осуществляли по пяти технологическим вариантам, варьируя скоростью движения источника  $V$ , ( $V = 4,2$  мм/с,  $V = 11,7$  мм/с,  $V = 13,36$  мм/с,  $V = 16,7$  мм/с,  $V = 20$  мм/с) при токе дуги  $I = 24$  А, расходе плазмобразующего газа  $Q_{Ar} = 18$  л/мин; защитных газов  $Q_{Ar} = 3,2$  л/мин;  $Q_{N_2} = 3,38$  л/мин. Микростроение металла в зоне воздействия плазменной струи изучали металлографическим методом с

помощью приборной системы НЕОРНОТ – 21. Травление шлифов осуществляли в 3 %-ом спиртовом растворе HNO<sub>3</sub>. Микротвердость по глубине зоны воздействия струи определяли по Виккерсу при нагрузке 0,981 Н (HV<sub>0,1</sub>). Фазовый состав стали анализировали с помощью дифрактометра Philips PW 1830.

За критерии оценки механических свойств обработанного поверхностного слоя принимали значения микротвердости.

#### Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных нами экспериментов по поверхностной плазменной закалке образцов из стали 45 удовлетворительно совпали с результатами работы [1]. Применяя плазмобразующий газ аргон и защитный - азот соответственно с расходами 1,8 и 3,3 л/мин при упрочнении из жидкого состояния с оплавлением поверхности микротвердость достигает до 1300 HV<sub>01</sub> (исходная 290 HV<sub>01</sub>) а при упрочнении из твердой фазы - 950 HV<sub>01</sub>. Очевидно это объясняется тем, что поверхностный слой нагревается в последнем случае до меньшей температуры. В связи с этим углерод не успевает выделяться из труднорастворимых соединений и концентрация его в аустените снижается.

Плазменное упрочнение с оплавлением привело к повышению микротвердости стали, однако, при этом уменьшилась ее ударная вязкость [2]. Мартенситная микроструктура оплавленной зоны имеет столбчатый характер. Выявлено, что в структуре оплавленной зоны имеется повышенное содержание аустенита. При оплавлении изменяется не только микротвердость и дисперсность мартенсита, но и характер разрушения стали. В оплавленной зоне разрушение происходит по границам зерен. Этот факт можно объяснить ростом зерна в связи с перегревом жидкого металла оплавленной зоны [3].

Следует заметить, что при использовании азота наблюдается больший рост твердости стали. В работе [4] высказано предположение, что при использовании азота в качестве за-

*Хвиевич Виталий Михайлович, к.т.н., доцент, зав. каф. сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.*

*Сазонов Михаил Иванович, д.т.н., профессор, каф. сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

*Якушевич Сергей, директор предприятия по производству технологического оснащения Белостокского технического университета, Польша.*

щитного газа возможно происходит азотирование поверхности и соответственно повышение микротвердости поверхностного слоя.

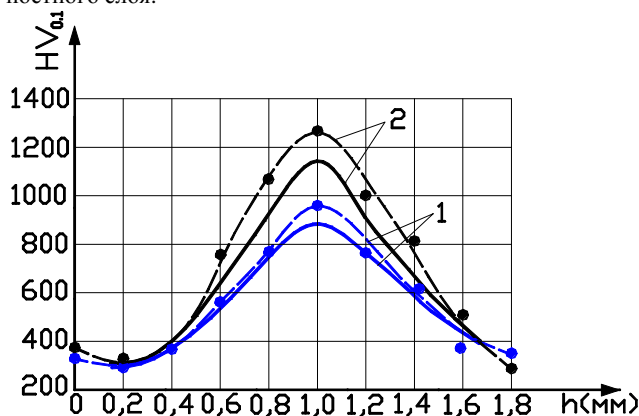


Рис. 1. Распределение микротвердости по ширине зоны влияния плазменной дуги; 1 – защитный газ аргон, 2 – защитный газ азот ( — - без оплавления; - - - с оплавлением)

Эксперименты показали, что микротвердость поверхности стали неоднородна, ее распределение по ширине зоны влияния плазменной дорожки подчинено определенному закону (рис. 1).

В этой связи возникает присущая для обработки поверхностей локальными высококонцентрированными источниками тепла специфическая особенность – упрочнение поверхности изделий отдельными полосками. В работе [2] отмечается, что при наложении полосок появляются зоны отпуска и микротвердость снижается до 4000 МПа, а при расположении их в стык сохраняются зоны разупрочнения, которые возможно играют роль “карманов” смазки в условиях поверхностного трения и повышают износостойкость поверхности.

Исследован процесс ППЗ в рассматриваемом диапазоне скоростей движения плазменной струи (от 4,2мм/с до 20 мм/с) и построены графики зависимости распределения микротвердости стали 45 по глубине поверхностного слоя (рис. 2).

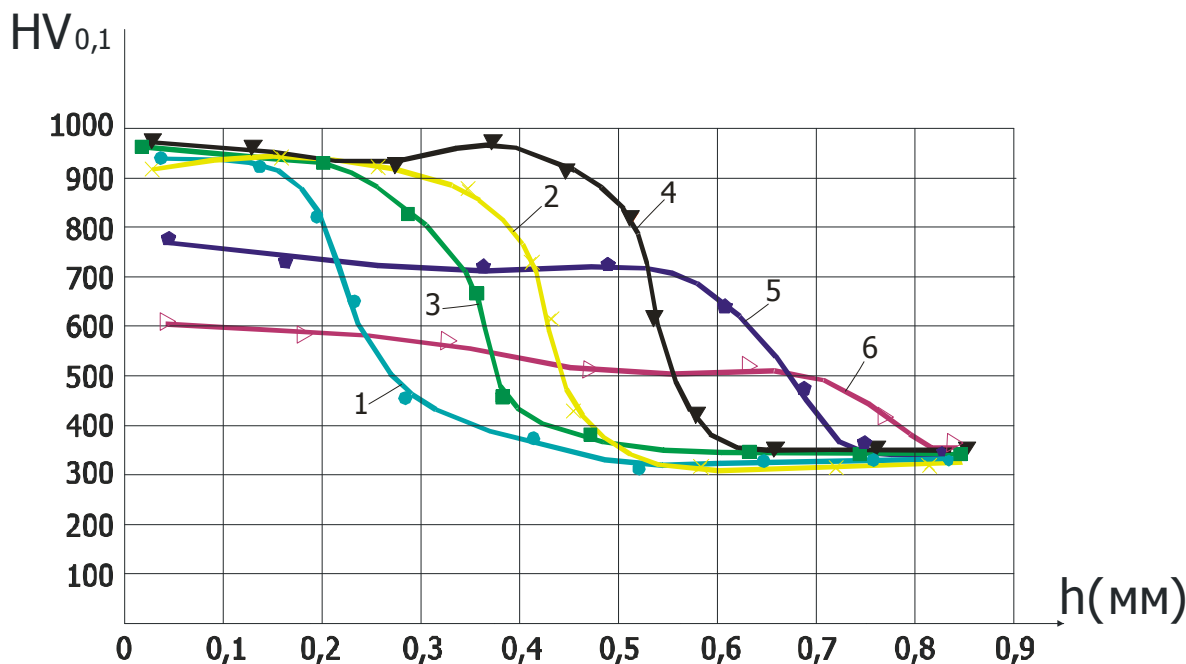


Рис. 2. Зависимости распределение микротвердости стали 45 по глубине поверхностного слоя.

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

Установлено, что при скорости движения плазменной дуги  $V=11.7$ мм/с микротвердость поверхностного слоя примерно на  $200HV_{0.1}$  выше микротвердости, получаемой с помощью объемной закалки. При скорости движения источника меньше 10мм/с наблюдается значительное снижение микротвердости. Очевидно, что такие изменения обусловлены тем, что при соответствующих скоростях нагрева порядка  $10^{40}C/c$  получается бездиффузионный процесс  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращений с последующей рекристаллизацией  $\gamma$  фазы. При соответствующей скорости нагрева, как отмечено в работах скорость зарождения аустенита становится соизмеримой, или превосходит скорость роста его зерен. В результате этого процесса формируется мартенситная структура поверхностного слоя. Структурное превращение «перлит-аустенит» осуществляется в рамках перлитных колоний, в результате происходит неоднородное распределение углерода в поверхностном слое. Такие структурные превращения согласно [6], характерны для всех локальных скоростных методов нагрева, то есть рассматриваемого, лазерного и электронно-лучевого. Отмеченные особенности обуславливают высокую твердость и дисперсность мартенсита, который образуется в поверхностном слое стали при скорости движения плазменной дуги  $V=11.7$ мм/с.

Уменьшение скорости движения дуги приводит к мгновенному возрастанию температуры в зоне нагрева, значения которой достигают 1300-1400°C, а также к возрастанию длительности выдержки стали при этой температуре и снижению скорости охлаждения металла. При таких параметрах процесса упрочнения происходит существенное снижение микротвердости и износостойкости упрочненного слоя.

Выполнен микроструктурный анализ стали 45 при термообработке образцов с использованием аргона и азота в качестве защитных газов (рис. 3а, б). Структура исходного материала сорбит с отпуском. Металлографический анализ упрочненной стали с использованием оптической и электронной микроскопии показал, что зона влияния плазменной струи имеет форму сегмента (рис. 3а) и по своему строению аналогична зоне влияния при термообработке стали лазером и электронным лучом [6].

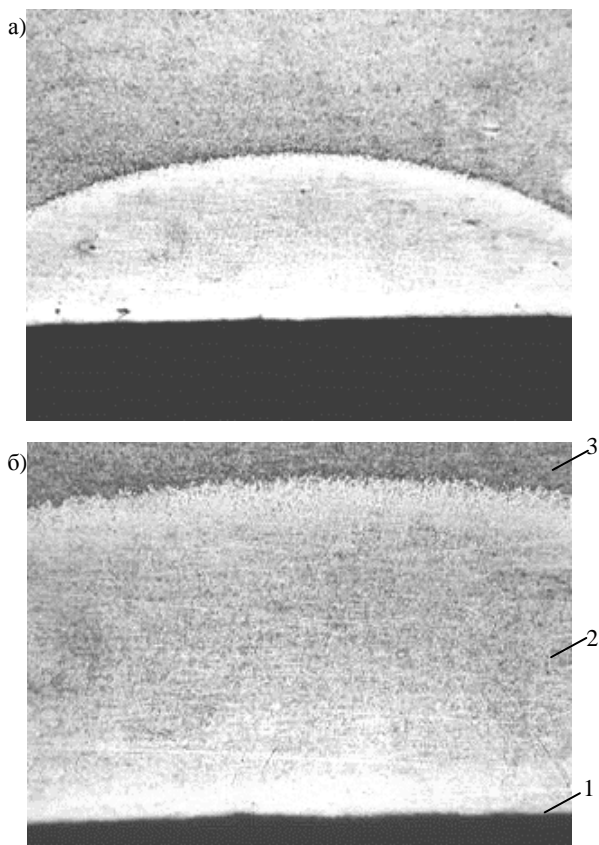


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя стали 45 при термообработке в защитной среде аргона  
 а) зона влияния плазменной струи;  $\times 45$ ,  
 б) микроструктура зоны нагрева;  $\times 180$ .

Структура зоны влияния плазменной дуги однофазная, однородная без следов переплавления. Влияние параметров процесса сказывается только на величине зоны воздействия.

При воздействии на образцы плазменной струи в среде аргона (без оплавления) в поверхностном слое образовалась закаленная зона, в которой произошли мартенситные превращения и переходная зона, близкая к исходному материалу (рис. 3). Микроструктура закаленной зоны состоит из однофазного высокодисперсного мартенсита – 1, остаточного аустенита – 2, и карбидов – 3. Образование такой структуры при ППЗ обусловлено аустенитными зернами малого размера. При оптимальных режимах термического цикла, рост зерна аустенита не происходит из-за очень малой длительности нагрева и последующей скоростью охлаждения. При таком механизме структурных превращений задерживается и растворение карбидов.

На микрофотографии просматриваются три слоя. Первый слой состоит из мелкоугольчатого мартенсита, второй слой имеет пониженную твердость с сохранением феррита, третий слой неоднороден и по структуре близок к исходному состоянию материала.

Таким образом, характер структурообразования стали 45 при воздействии плазменной струи сходен с характером структурообразования при термообработке стали лазером [6].

Проведены эксперименты по термообработке плазменной струей образцов из стали 40X.

Металлографический анализ показал, что характер термического воздействия плазменной струи также, как и для стали 45 имеет форму сегмента (рис. 4а). Структура стали видоизменена, по сравнению с исходной и состоит из характерных зон. В закаленной зоне при обработке без оплавления наблю-

дается высокодисперсный мартенсит (рис. 4б), далее имеется нерегулярный мартенсит с остаточным аустенитом и затем зона с фрагментами карбидов.

Как известно, при изменении химического свойства стали, меняются их теплофизические характеристики. При ППЗ стали 40X по сравнению со сталью 45 скорость процесса уменьшается, это объясняется тем, что аустенит в таких сталях более устойчив к распаду в связи с наличием легирующих элементов хрома и вольфрама, которые образуют с углеродом карбиды, препятствующие насыщению аустенита углеродом. В результате эффект упрочнения стали 40X менее значителен, чем для стали 45.

Повышение степени дисперсности закаленной структуры этой стали обусловлено высокой степенью тетрагональности мартенсита, плотности дислокаций, измельчения пластин мартенсита. Важное значение при этом имеет, также, содержание остаточного аустенита в закаленной зоне стали и особенно, во втором подповерхностном слое.

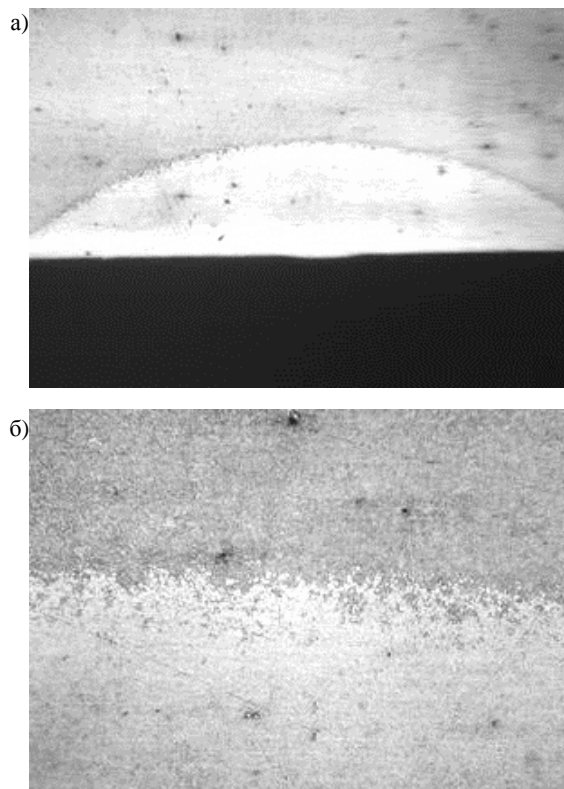


Рис. 4. Микроструктура стали 40X (защитный газ аргон)  
 а) увеличение  $\times 36$ ; б) увеличение  $\times 180$ .

Эксперименты показали, что микротвердость поверхностного слоя стали 40X ниже чем для стали 45, однако глубина упрочненного слоя значительна и достигает до 0,6 мм (рис. 5, б). Микротвердость при обработке в защитной среде аргона при ППЗ без оплавления почти в 1,8 раза выше исходной, а с оплавлением в 2,3 раза. При ППЗ без оплавления шероховатость поверхности не изменилась.

Термообработку стали плазменной струей в защитной среде азота осуществляли при токе дуги  $I=26A$ , напряжении дуги  $U=15B$ , скорости движения плазменной дуги  $V=11,2$  мм/с, расход аргона  $Q_{Ar}=1,9$  л/мин, расход азота  $Q_{N2}=3,1$  л/мин. ППЗ осуществлена с оплавлением и без оплавления поверхности, соответственно из жидкого состояния и твердой фазы. Исследования показали, что эффект влияния аргона и азота защитных газов на микротвердость стали 40X качественно подобны. Ширина упрочненной дорожки

составляет около 2,5мм. Результаты измерения микротвердости на поперечном сечении образцов (рис. 6), показали больший прирост микротвердости порядка 100-150HV<sub>0,1</sub> в сравнении с предыдущим вариантом упрочнения (защитный газ аргон).

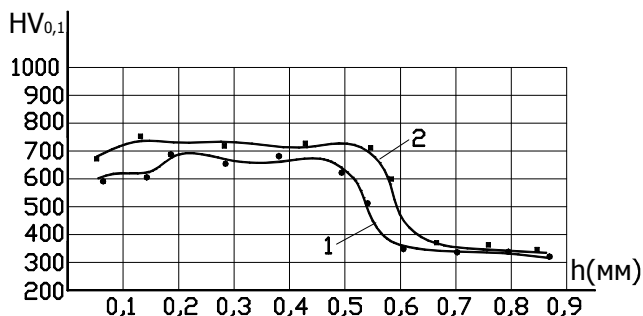


Рис. 5. Характер распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя стали 40X (защитный газ аргон) 1 – без оплавления, 2 – с оплавлением.

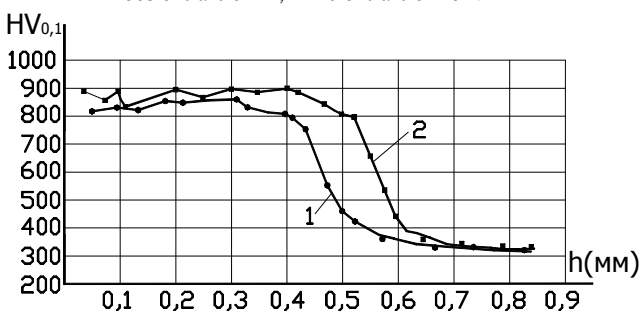


Рис. 6. Характер распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя стали 40X (защитный газ азот) 1 – с оплавлением, 2 – без оплавления.

Наибольшая микротвердость наблюдается у поверхностного слоя (рис. 5, 6). Глубина упрочняемого слоя достигает 0,5-0,6 мм. Далее зависимость равномерная, по глубине слоя микротвердость плавно снижается до исходного значения.

Проведены лабораторные исследования образцов из этой стали после ППЗ и объемной закалки на износостойкость. Дорожки наносили с перекрытием на 30% зоны влияния плазменной струи.

Износостойкость упрочненных образцов оценивали по массе. Влияние микротвердости на износостойкость после ППЗ для сталей 45 и 40X моделируется линейной зависимостью, т.е. с увеличением микротвердости повышается износостойкость. Однако, степень повышения износостойкости для различных сталей не одинакова в связи с их разной износостойкостью в исходном состоянии и морфологическими особенностями закаленной структуры.

Анализ результатов испытаний показал, что износостойкость образцов упрочненных путем ППЗ ~ в 2.3 раза выше, чем при объемной закалке.

#### Выводы

1. Поверхностную плазменную закалку стали можно осуществлять как в твердой фазе (без оплавления поверхности), так и из жидкой фазы (с оплавлением поверхности). Микрогеометрия поверхности детали формируется в зависимости от вида защитного газа, тока дуги и скорости движения плазменной струи. При ППЗ без оплавления поверхности детали не требуется ее дополнительная механическая обработка;

2. Характер распределения микротвердости по ширине зоны воздействия плазменной дуги подчиняется нормальной

закономерности, в этой связи в поверхностном слое изделия возникает локальное упрочнение, которое характерно воздействию точечных высококонцентрированных источников нагрева на металл. В зависимости от параметров процесса глубина закаленного слоя изменяется в пределах 0,15-0,60 мм;

3. Скорость нагрева металла при его обработке плазменной струей достигает порядка 10<sup>4</sup>°C/с. Это приводит к бездиффузионному процессу α→γ превращений с рекристаллизацией γ-фазы. Превращения “перлит-аустенит” происходят в рамках перлитных колоний в результате в поверхностном слое формируется высокодисперсная мелкоизмельченная мартенситная структура.

4. При нагреве поверхностного слоя стали до температуры порядка 950°С скорость его охлаждения составляет от 1000 до 5000°С/с. При таких условиях в этом слое происходят мартенситные превращения, что обуславливает появление в нем сжимающих остаточных напряжений, которые по своим значениям меньше чем при других способах упрочнения кроме лазерного и электронно-лучевого. В нижних слоях металла, где температура ниже 950°С возникают растягивающие напряжения. Таким образом, термические напряжения возникающие при таком способе обработки, практически не вызывают деформаций изделия.

5. Твердость стали при ее легировании карбидообразующими элементами, такими как Cr, W, при поверхностной плазменной закалке, ниже чем нелегированной стали, что объясняется наличием определенного количества углерода в карбидообразующих элементах.

Вид защитного газа оказывает значительное влияние на глубину закаливаемого слоя и его микротвердость.

6. Характер распределения микротвердости при обработке стали 40X плазменной струей по ширине дорожки имеет нормальный закон и качественно сравним с законом распределения микротвердости для стали 45. Глубина упрочняемого слоя при закалке без оплавления или с оплавлением достигает от 0,4 до 0,6 мм, и соответствует глубине закалки 45, однако микротвердость на 100-200HV<sub>0,1</sub> ниже. В целом механизм бездиффузионных α→γ превращений с последующей рекристаллизацией γ-фазы замедляется, однако мартенситная структура формируется. Максимальная микротвердость достигается при скорости V=11,2 мм/с, расходах газов Q<sub>Ar</sub>=1,9 л/мин, Q<sub>N2</sub>=3,6 л/мин, токе дуги I=26 А.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиридонов Н.В. и др. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. – Мн. Вышэйшая школа, 1988. – 155с
2. Лещинский Л.К., Самотугин С.С., Пирч И.И., Комаров В.И. Плазменное поверхностное упрочнение. – Киев.: “Тэхніка”, 1990. – 109 с.
3. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 359с.
4. Ри Сэйу. Поверхностное упрочнение металлов под действием высокотемпературной плазмы: Пер. с японского. – ГИЭН. – 1977. - № 21. – С.7-13.
5. Кидин И.Н. Фазовые превращения при ускоренном нагреве стали. – М.: Металлургиздат, 1957. – 94 с.
6. Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. – М.; Машиностроение, 1985. – 485 с.