

матин, С.В. Ахонин // Проблемы спецэлектрометаллургии. – 1995. – № 2. – С. 24–35. 11. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. издание / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др.: В 4 т. – 3-е изд., перераб. и расшир. – М.: Наука, 1978. – Т. I, кн. 1. – 496 с., кн. 2 – 328 с.; – 1979. – Т. II, кн. 1. – 440 с. – кн. 2. – 344 с.; 1981. – Т. III, кн. 1. – 472 с., кн. 2. – 400 с; 1982. – Т. IV, кн. 1. – 623 с; кн. 2. – 560 с.

Потупила в редколлегию 02.06.06

УДК 621.791.754.5: 621.791.947.5

Л 33

Ю.М. Лебедев, проф., д-р техн. наук; В.А. Мартыненко, магистр
Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ ДУГОЙ С НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ, СКАНИРУЕМОЙ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Исследованы структурные превращения в сталях при поверхностном упрочнении нагревом, дугой с угольным электродом, сканируемой магнитным полем. Показано влияние сканирования на тепловые процессы и структурные превращения.

Розглянуто структурні перетворення у сталях під час поверхневого зміцнення нагріванням дугою з вугільним електродом, яка сканована магнітним полем. Показано вплив сканування дуги на теплові процеси та структурні перетворення.

The problems of low-carbon steel structural changes with carbon arc surface strengthening scanning without fusion are considered. The arc scanning influence on the quantity of thermal energy in steel and the further caused structural changes is shown.

Постановка проблемы. Для повышения износостойкости поверхностных слоев деталей при абразивном изнашивании выполняется их поверхностная закалка. Традиционным способом такой закалки является использование нагрева токами высокой частоты с последующим охлаждением нагретых участков водой [9]. Однако получение мартенситной структуры для низкоуглеродистых и низколегированных сталей в этом случае затруднено из-за их высоких значений критических скоростей закалки. Для таких сталей нагрев целесообразнее вести локальными источниками: электронным и лазерным лучами, плазменно-дуговыми источниками, дуговым разрядом с неплавящимся электродом. Из-

за беспрепятственного отвода тепла в окружающие холодные участки металла при таком нагреве достигаются очень высокие скорости охлаждения разогретой зоны даже без принудительного охлаждения. Такая технология поверхностной закалки сталей в последнее время получила достаточно широкое распространение [2–4].

Особенно перспективны способы такой закалки без оплавления поверхности, так как позволяют проводить ее на механически обработанных деталях. Эффективность поверхностного упрочнения нагревом локальными источниками может быть увеличена при помощи их сканирования, которое распределяет тепловую энергию локального источника на большую площадь и позволяет существенно увеличить его мощность, не приводя к оплавлению поверхностных слоев металла. Об этом свидетельствуют результаты работ по плазменной поверхностной закалке сталей со сканированием плазменной струи магнитным полем [2, 6, 7]. При этом можно не только расширить закаленную зону, но и существенно увеличить ее глубину. Так как вопросам поверхностного упрочнения дугой с неплавящимся электродом со сканированием в литературе уделено мало внимания, представленные исследования по этой проблеме *актуальны*.

Цель настоящей работы – повышение эффективности поверхностного упрочнения [5] при нагреве сталей дугой с неплавящимся угольным электродом путем сканирования ее в поперечном направлении магнитным полем.

Дуговой разряд с угольным электродом достаточно доступен для этих целей, так как электрод обладает большой износостойкостью и на прямой полярности в атмосфере воздуха дуга горит устойчиво даже при малой тепловой мощности, а эффективный КПД нагрева составляет 60 %.

Для увеличения ширины зоны нагрева использовали сканирование дугового разряда переменным магнитным полем промышленной частоты. Если поместить дуговой разряд в магнитное поле, векторы напряженности которого расположены в направлении его перемещения, то под действием силы Лоренца заряженные частицы столба дуги – электроны и ионы будут отклоняться от прямолинейного движения между катодом и анодом в поперечном направлении, испытывая колебания, пропорциональные частоте изменения направления внешнего магнитного поля. Величина отклонения ограничена условиями обрыва дуги при некотором критическом значении напряженности магнитного поля.

Влияние магнитного поля на геометрические характеристики прогрева исследовали металлографическим методом на плоских образцах из стали Ст3 после нагрева дугой на специализированной установке.

После прогрева на различных режимах из планки вырезали в поперечном направлении образец для изготовления макро- и микрошлифов.

Изучение макро- и микроструктуры проводили путем сканирования шлифов при различном увеличении, а также с помощью металлографического микроскопа. Макрошлифы таких образцов, прогретых на режиме $I_d = 150$ А; $U_d = 25$ В; $V_n = 36$ м/ч, приведены на рис. 1.

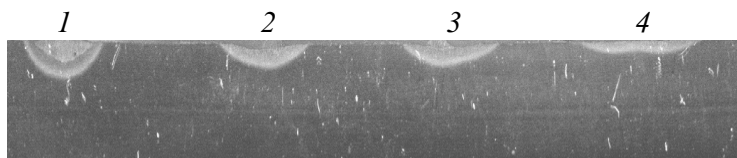


Рис. 1. Влияние магнитного поля на геометрические характеристики прогрева стали дугой с угольным электродом при напряжении на обмотке электромагнита:

1 – 0 В; 2 – 75 В; 3 – 100 В; 4 – 150 В

Светлые зоны на рис. 1 характеризуют измененную структуру основного металла, сформированную в результате прогрева дуговым разрядом. Границей этой зоны является изотерма критической точки A_{c1} (730 °С). Из рисунка видно, что при прогреве без воздействия на дугу магнитного поля (1) значительная часть металла переплавляется. При воздействии на дугу магнитного поля глубина прогрева и доля расплавленного металла уменьшаются, а ширина зоны прогрева увеличивается. При этом жидкий металл, расположенный на поверхности образца, скатывается в форму валика и совершает поперечные колебания под воздействием внешнего магнитного поля, что можно наблюдать на макрошлифах (2, 3). При напряжении переменного тока обмотки электромагнита 150 В поверхностный слой образца (4) не расплавляется, а форма зоны прогрева указывает на раздвоение дуги. При этом ширина увеличивается примерно в 1,5 раза, а глубина зоны перекристаллизации составляет около 1,2 мм.

Сравнение геометрии зон прогрева показывает также, что с повышением напряжения на обмотке электромагнита, т. е. при увеличении напряженности магнитного поля, площадь поперечного сечения участков перекристаллизации уменьшается. Это свидетельствует о снижении эффективного КПД нагрева металла дугой при воздействии на нее переменного магнитного поля. Количественные показатели этого влияния оценены путем относительного изменения площадей указанных зон прогрева. Для этого макрошлифы прогревов сканировались с шестикратным увеличением, наклеивались на фольгу толщиной 0,1 мм, из которой вырезались фигуры зон перекристаллизации и взвешивались на электронных весах. В качестве эталона сравнения была взята площадь зоны прогрева без воздействия магнитного поля, когда эффектив-

ный КПД нагрева дугой составлял 0,6. Эффективную тепловую мощность дуги q в переменном магнитном поле можно представить уравнением $q = I_n U_d \eta \eta_m$, где I_n – сила тока дуги; U_d – падение напряжения на дуге; η – термический КПД нагрева; η_m – магнитный КПД влияния.

Результаты исследования приведены на рис. 2, из анализа которого следует, что с повышением напряженности внешнего магнитного поля эффективная тепловая мощность дуги уменьшается. Это связано с увеличением площади поверхности столба дуги и потерями на теплообмен в окружающую воздушную среду, а также с эффектом сдувания магнитным полем части плазменного потока. При напряжении на обмотке электромагнита 150 В, которое создает магнитное поле, приемлемое для поверхностного упрочнения при прогреве сталей, эффективная тепловая мощность дуги снижается дополнительно на 40 %. Это ведет к перерасходу энергии, и на первый взгляд кажется, что использование сканирования дуги при поверхностном упрочнении энергетически невыгодно. Однако чтобы сделать выводы об эффективности такой технологии, необходимо проанализировать влияние данного сканирования на производительность обработки и качество упрочняемой поверхности.

В работах [4, 5] установлено, что максимальное значение погонной энергии дуги с угольным электродом диаметром 8 мм при нагреве стали, которое не приводит к оплавлению поверхности, составляет 500 Дж/см. При этом ширина упрочненной полосы, нагреваемой выше критической точки A_{c3} , составляет 4 мм. Использование магнитного поля для тех же условий позволило увеличить погонную энергию до 1350 Дж/см и ширину упрочняемой полосы до 12 мм. Таким образом, производительность процесса увеличилась в три раза.

Другой особенностью поверхностной закалки при обработке сравнительно больших поверхностей с нагревом локальными источниками является поочередный ее прогрев отдельными полосами, при котором происходит неизбежное снижение твердости ранее закаленного металла. Тепловой поток от очередного прогрева нагревает металл предыдущего, и в участках, где температура достигает значений $A_{c1} \dots 300$ °С, происходят процессы отпуска мартенсита, снижающие твердость ранее закаленного металла. Поэтому при таком упрочнении не удастся добиться равномерной твердости вдоль поверхности. Между участками с макси-

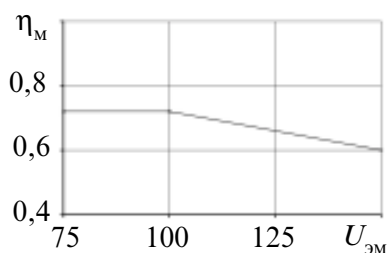


Рис. 2. Влияние напряжения на обмотке электромагнита на дополнительное снижение эффективного КПД нагрева стали дугой с угольным электродом

мальной твердостью мартенсита появляются прослойки с пониженной твердостью, протяженность которых зависит от условий отвода тепла в направлении ранее прогретых полос. Анализ этих процессов можно выполнить с использованием теории распространения тепла при сварке [8].

Процесс распространения тепла при нагреве поверхностей дугой без воздействия магнитного поля подчиняется формулам быстро движущегося точечного источника на поверхности полубесконечного тела. Термический цикл в любой точке выбранного поперечного сечения тела рассчитывается по уравнению

$$T(r_0, t) = \frac{q}{2\pi\lambda vt} \exp\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right), \quad (1),$$

где q – эффективная тепловая мощность сварочной дуги; λ – коэффициент теплопроводности; v – скорость прогрева; a – коэффициент температуропроводности; время t отсчитывается с того момента, когда сварочный источник переместится в плоскость YOZ , где находится точка, удаленная от него на расстояние $r_0 = \sqrt{y_0^2 + z_0^2}$.

Максимальную температуру нагрева отдельных точек можно вычислить по формуле

$$T_m = \frac{0,368q}{(\pi/2)c\gamma r_0^2 v}, \quad (2),$$

где $c\gamma$ – объемная теплоемкость нагреваемого металла.

При сканировании дуги магнитным полем источник нагрева из точечного преобразуется в полосовой. Распространение тепла в полубесконечном теле не имеет такого строгого решения, поэтому для оценки термических циклов и максимальных температур полосовой источник с равномерно распределенным по ширине прогрева B тепловым потоком можно заменить n -точечными источниками, эффективная суммарная тепловая мощность которых равна эффективной тепловой мощности полосового источника нагрева. Если начало координат y_0, z_0 в выбранном сечении на полосе прогрева поместить на оси прогрева, термический цикл в любой точке выбранного сечения можно рассчитать по формуле

$$T(y, z, t) = \sum_{i=1}^n \frac{q_n}{2\pi\lambda vt} \exp\left(-\frac{r_n^2}{4at}\right) + T_H, \quad (3)$$

где $q_n = q/n$ – эффективная тепловая мощность отдельного точечного источника, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $r_n = \sqrt{y_n^2 + z_n^2}$ – расстояние от рассматриваемой точки до n -го источника; T_n – начальная температура тела.

С использованием этих положений были выполнены расчеты распределения максимальных температур (рис. 3) и термических циклов (рис. 4) для поверхностного прогрева дугой с угольным электродом без магнитного сканирования и со сканированием на погонной энергии 500 Дж/см и 1350 Дж/см соответственно.

Погонная энергия 1350 Дж/см соответствовала прогреву в магнитном поле при напряжении на обмотке электромагнита 150 В с зоной прогрева, представленной на рис. 1 (4).

Для расчета термических циклов по формуле (3) были приняты следующие исходные данные: $n = 10$; $a = 0,08 \text{ см}^2/\text{с}$; $\lambda = 0,4 \text{ Дж}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$. Точечные сосредоточенные источники с эффективной тепловой мощностью по 135 Вт располагались на расстоянии B/n . Ширина зоны прогрева B взята из опытных данных равной 12 мм. Расчет выполнялся на персональном компьютере по разработанной программе на языке программирования Паскаль.

Результаты расчета распределения максимальных температур достаточно хорошо совпадают с опытными данными по размерам зоны перекристаллизации: глубина прогрева около 1,3 мм, а ширина 12,5 мм. Аналогичное совпадение опытных данных с расчетом получено и при распределении максимальных температур при нагреве дугowym разрядом без воздействия внешнего магнитного поля.

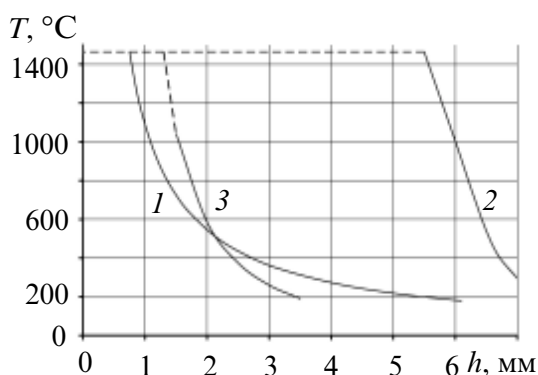


Рис. 3. Изменение максимальных температур в прогретой полосе стали дугой с угольным электродом:

1 – на оси Z дугой в магнитном поле; 2 – на поверхности прогрева ($Y=0$; $Z=0$) дугой в магнитном поле; 3 – дугой без магнитного поля

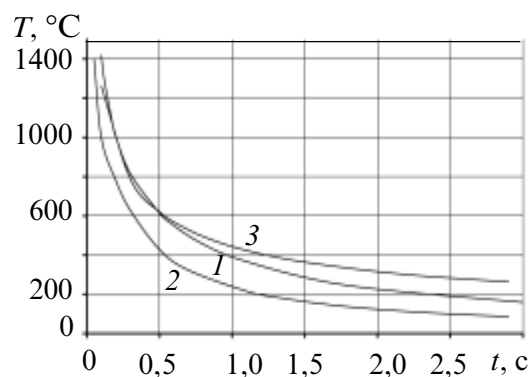


Рис. 4. Термические циклы при прогреве дугой в магнитном поле в точках:

1 – $Y=0$, $Z=0$; 2 – $Y=0,6 \text{ см}$, $Z=0$ (по формуле (3)); 3 – $Y=0$, $Z=0$ (по формуле (4))

Сравнение термических циклов для точек, расположенных по оси нагрева (1) и в конце полосы нагрева (2), показало, что точки, расположенные у края нагрева, охлаждаются более резко. При этом средняя скорость охлаждения в интервале температур от линии солидус до 400 °С для точек вблизи оси нагрева составляет около 1000 °С/с, для точек у края нагрева – около 2000 °С/с. Такая скорость практически не достигается при традиционных способах термической обработки, что позволяет нагревом локальными тепловыми источниками производить поверхностную закалку практически для всех марок углеродистых и низколегированных сталей.

На рис. 4 представлен также термический цикл в точке, расположенной по оси прогрева. Расчет выполнялся по уравнению от действия мгновенного плоского источника нагрева на поверхности полубесконечного тела (кривая 3)

$$T(z,t) - T_0 = \frac{2q}{\sqrt{B_H c \gamma} \sqrt{4\pi a t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\pi a t}\right), \quad (4)$$

где за ширину зоны нагрева B_H принимали ширину поверхности, нагреваемой до температуры критической точки A_{c1} , которую легко определить по макро- или микрошлифу. В рассматриваемом случае она составляла 12 мм.

Из сравнения кривых охлаждения 1 и 3 на рис. 4 видно, что они практически совпадают до 600 °С, а далее охлаждение, рассчитанное по уравнению (4), происходит медленнее, чем по (3). Это отклонение связано с тем, что в (4) не учитывается процесс распространения тепла в направлении оси Y .

Распределение максимальных температур по оси OZ для рассматриваемого случая можно рассчитать по формуле, которая выводится путем нахождения экстремума функции уравнения (4):

$$T_{\max} = \frac{0,484q}{z B_H \sqrt{c \gamma}}. \quad (5)$$

Расчет распределения максимальных температур по уравнению (5) дает несколько завышенные результаты, глубина зоны перекристаллизации для рассматриваемого режима прогрева при этом составляет около 1,5 мм. Точность расчетов по формуле (5) увеличивается с возрастанием ширины зоны прогрева. Поэтому это уравнение можно использовать только для получения качественных данных при анализе влияния режимов нагрева на процессы поверхностного упрочнения.

Оценка влияния последующих прогревов, выполняемых с неболь-

шим перекрытием предыдущих с целью получения сплошного упрочнения поверхности, на процессы отпуска ранее закаленного металла показывает явное преимущество применения технологии прогрева сканированной дугой. Так, ширина зоны максимальных температур от критической точки A_{c1} до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ при сканировании дуги магнитным полем составляет $0,7\text{ мм}$, тогда как при прогреве без воздействия на дугу магнитного поля ширина этого интервала $1,7\text{ мм}$. Поэтому распределение твердости в поверхностном слое при прогреве дугой, сканированной магнитным полем, более равномерно, чем при прогреве обычным дуговым разрядом.

Следует отметить, что продолжительность нагрева ранее закаленных слоев при температурах отпуска не превышает секунды. При таком импульсном нагреве процессы отпуска не доходят до равновесия и снижение твердости ранее закаленного металла в зоне, нагреваемой ниже критической точки A_{c1} , незначительно.

Таким образом, несмотря на то что сканирование дуги магнитным полем при поверхностной закалке приводит к снижению эффективного КПД нагрева, за счет увеличения ширины B полосы прогрева (на $20\ldots 50\%$) при существенном повышении тока (с 110 до 150 А) производительность процесса увеличивается в $2\text{--}3$ раза.

Эффект снижения эффективного КПД нагрева дуги под действием магнитного поля можно уменьшить за счет обдува ее газом и использования специальных графитовых отражателей [1], а также применением режимов с большой плотностью тока, что способствует сжатию столба дуги и повышению его устойчивости при сканировании.

Другим существенным преимуществом сканирования дуги магнитным полем при поверхностной закалке сталей является значительное уменьшение размеров зоны разупрочнения при отпуске, когда обработка поверхности производится поочередным прогревом полосами с небольшим перекрытием. В результате такой обработки получается слой с более равномерным распределением твердости и повышенным сопротивлением износу.

Выводы. 1. Сканирование магнитным полем дугового разряда неплавящимся электродом при поверхностной закалке сталей позволяет преобразовать источник нагрева из точечного в полосовой и выполнять обработку поверхности без ее расплавления практически на любых режимах, доступных по стойкости для выбранного электрода. 2. Снижение эффективного КПД нагрева дуги в магнитном поле окупается повышением производительности поверхностной обработки, образованием равномерного по глубине закаленного слоя и уменьшением размеров зоны отпуска, возникающей под влиянием последующих прогревов отдельными полосами обрабатываемой поверх-

ности. 3. Разработанная методика расчета тепловых прогревов металлов полосовыми источниками хорошо согласуется с опытными данными и может быть теоретической базой при разработке технологии поверхностного упрочнения сталей дугой, сканируемой магнитным полем.

Список использованной литературы. 1. Гаген Ю.Г., Таран В.Д. Сварка магнитоуправляемой дугой. – М.: Машиностроение, 1970. – 159 с. 2. Домбровский Ю.М., Бровер А.В. Обработка стали воздушно-плазменной дугой со сканированием // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. – № 1. – С. 10–13. 3. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая закалка поверхностей металлов // Сварщик. – 1999. – № 3. – С. 14–15. 4. Лебедев Ю.М., Мартыненко В.А. Применение дуги с неплавящимся угольным электродом при поверхностной обработке сталей с низкой прокаливаемостью // Автоматическая сварка. – 2004. – № 8. – С. 24–29. 5. Патент України на винахід № 54030 А. Спосіб поверхневого загартування сталей з низькою прогартуваністю / Ю.М. Лебедев, В.О. Мартыненко. – Заявлено 23.04.02; Опубл. 17.02.03. Бюл. № 2. 6. Поверхностное упрочнение стальных деталей сжатой электрической дугой / А.Е. Михеев, С.С. Ивасев, А.В. Гирн и др. // Сварочное производство. – 2003. – № 2. – С. 24–27. 7. Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д., Мальшиев А.В. Применение шестиполусной электромагнитной системы для управления параметрами формирования швов при сварке неплавящимся электродом // Автоматическая сварка. – 2004. – № 2. – С. 45–49. 8. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1952. – 296 с. 9. Сельский С.В., Сорокина Т.М. Повышение эрозионной стойкости лопаток турбин закалкой с нагревом ТВЧ // МиТОМ. – 2000. – № 4. – С. 25–27.

Поступила в редколлегию 02.06.06

УДК 691.791.35

Д 33

О.А. Денисевич, канд. техн. наук, доц. каф. звар. в-ва
НТУУ "КПІ", м. Київ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ПРИПОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДИК ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

З використанням методик повного факторного і дробового факторного експерименту розроблено математичні моделі та проведено їх статистичний аналіз. Уточнено оптимальний склад композиції припою, визначеного при аналізі математичної моделі.