



ЛОКАЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ

Д. М. КАЛЕКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Расчетным и экспериментальным путем показана возможность получения магнитоуправляемой дугой термообработанного участка поверхности кольцевой формы с минимальным искажением и повышенной маслостойкостью. Исследованы характеристики зоны термического влияния под вращающейся дугой и показано, что область двукратного повышения твердости распространяется на глубину до 1,5 мм.

Ключевые слова: магнитоуправляемая дуга, поверхностная термообработка, кольцевая форма, упроченная зона, нагрев вращающейся дугой

Повышение требований к работоспособности деталей, включая высокие износостойкость и усталостную прочность при малых расходах на высококачественные материалы, обусловило появление большого количества способов термообработки, в том числе поверхностной, высококонцентрированными источниками энергии, к которым относятся плазма и электрическая дуга. Исследованиям методов плазменной и дуговой поверхностной обработки посвящено много публикаций. Согласно им практически все детали обрабатываются дугой, сканируемой различными способами (под влиянием продольного магнитного поля, механическими колебаниями сварочной головки и др.). Во многих случаях полосы, получаемые таким образом, перекрываются или граничат между собой, образуя непрерывную термообработанную поверхность. Замечено [1], что наилучший результат при этом достигается поверхностным оплавлением деталей, однако в этом случае невозможно избежать искажения области воздействия.

Исходной предпосылкой для проведения исследований по локальной кольцевой поверхностной термообработке было предположение о том, что при быстром перемещении дуги уменьшится тепловая эрозия поверхности обрабатываемой детали. Кроме того, при кольцевой форме участка повышенной твердости увеличится маслостойкость термообработанной поверхности трения, а также возможно появление сжимающих напряжений на обрабатываемой поверхности детали и, как следствие, ее более высокой усталостной прочности [2].

Наиболее эффективно нагрев кольцевой поверхности можно осуществить путем вращения дуги в поперечном магнитном поле между вспомогательным кольцевым электродом и изделием. При этом скорость вращения дуги будет зависеть от напряженности магнитного поля в области горения дуги и тока дуги [3]. Нагрев полубесконечного тела источником тепла, перемещающимся по кольцевой траектории, можно проанализировать, приняв схему перемещающегося точечного источника. Исходное уравнение, имеющее вид

$$T_A = T_0 + \int_0^t \frac{2q}{c\gamma(4\pi at)^{3/2}} \exp[\bar{R}^2/4at] dt, \quad (1)$$

для точечного неподвижного источника в поставленной задаче преобразуется (рис. 1) в

$$T_A = T_0 + \frac{2q}{c\gamma(4\pi a)^{3/2}} \times \int_0^t \exp\left[-\frac{2rr_A \cos(2\pi nt - \varphi_A) + (r^2 + r_A^2 + z^2)}{4at}\right] \frac{dt}{t^{3/2}}, \quad (2)$$

где T_A и T_0 — текущая и начальная температура в точке A ; q — мощность теплового источника; c , a , γ — соответственно теплоемкость, температуропроводность и плотность материала нагреваемого тела; n — количество оборотов дуги, s (скорость вращения дуги); t — текущее время; остальные обозначения понятны из рис. 1.

Поскольку уравнение (2) инвариантно по отношению к оси Z , азимут φ_A старта дуги можно принять равным нулю. Уравнение (2) решали методом Симпсона. Исходя из того, что подынтегральная функция периодическая, для получения точных значений необходимо, чтобы количество интервалов интегрирования $m \gg 2\pi nt$ [4]. Принимая $n = 100 \text{ с}^{-1}$ и $t = 2,5 \text{ с}$ (максимальные значения при экспериментальном наблюдении процесса кольцевой термообработки), численное интегрирование проведено для числа разбиений $m = 12500$. Расчет проведен для стали 65Г со сле-

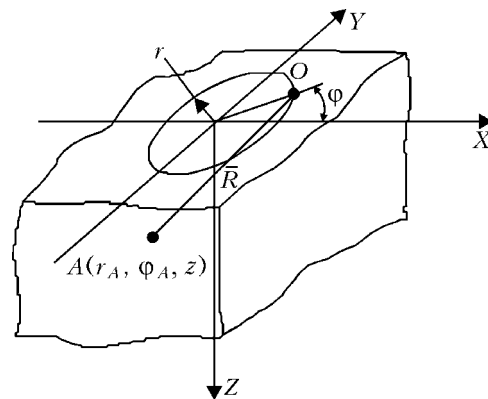


Рис. 1. Схема к расчету нагрева вращающимся точечным источником тепла

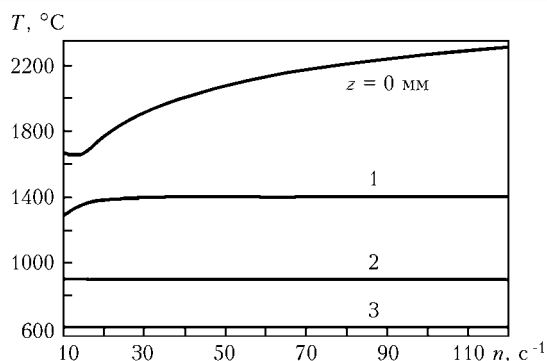


Рис. 2. Зависимость температуры кольца радиусом 0,5 см на разной глубине z полубесконечного тела, нагреваемого круговым вращением дуги со скоростью n в течение 2,5 с

дующими теплофизическими характеристиками: $c = 700 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$, $\gamma = 7,85 \text{ г}/\text{см}^3$, $\lambda = 0,325 \text{ Вт}/(\text{см}\cdot^\circ\text{C})$, $a = \lambda/c\gamma = 0,059 \text{ см}^2/\text{с}$. Радиус кольцевой траектории дуги мощностью 2,4 кВт (максимальной в описанных ниже экспериментах) принимался равным 0,5 см, поскольку в опытах использован трубчатый электрод диаметром 10 мм с толщиной стенки 2 мм. Расчет по уравнению (2) показал слабую ($< 3\%$) зависимость температуры в точке А (рис. 1) от ее азимута ϕ_A . Поэтому дальнейшие вычисления проводили при $\phi_A = 0$. Зависимость нагрева под дугой от скорости вращения дуги приведена на рис. 2. Существенная зависимость от скорости вращения дуги наблюдается только на поверхности тела и при скоростях менее 30 с^{-1} . При $n > 50 \text{ с}^{-1}$ для $z \geq 0,1 \text{ см}$ температура в контрольной точке снижается (в масштабе рис. 2 это снижение незаметно). Поэтому дальнейшие расчеты велись при $50 \geq n \geq 30 \text{ с}^{-1}$.

Наиболее важным является распределение температуры по диаметру траектории дуги и по глубине тела. Для указанных выше условий это распределение показано на рис. 3. Его форма сохраняется и при других условиях нагрева вращающейся дугой (рис. 4, а). Чем больше длится процесс, тем выше температура в соответствующих точках нагреваемого тела.

Выравнивание температуры рассчитываем по формуле

$$T = F(t) - F(t - t'), \quad (3)$$

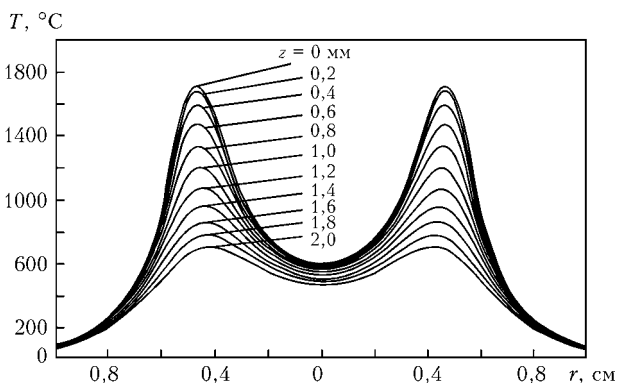


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу r и глубине z полубесконечного тела при нагреве дугой, вращающейся со скоростью 30 с^{-1} в течение 1,4 с

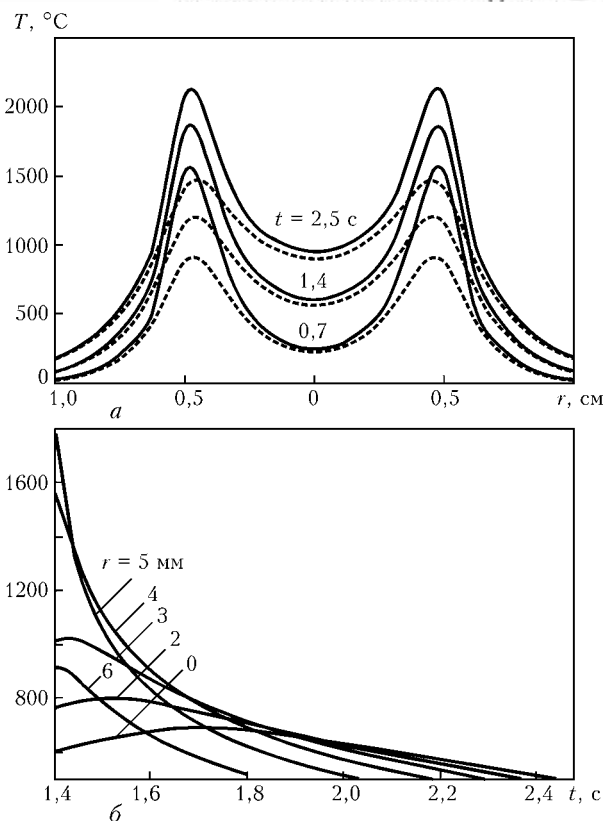


Рис. 4. Распределение температуры на поверхности (сплошная кривая) и на глубине 1 мм (штриховая) полубесконечного тела, нагреваемого дугой, вращающейся со скоростью 50 с^{-1} (а) и выравнивание температуры после гашения дуги при $z = 0 \text{ мм}$; $r = 1,4 \text{ см}$; $n = 50 \text{ с}^{-1}$ (б)

где t' — продолжительность горения дуги.

Интегрирование уравнения (3) по Симпсону имеет смысл лишь при условии $\cos(2\pi n t) = \cos(2\pi(t - t'))$, т. е. при совпадении точек притока и стока тепла. Типичные кривые выравни-

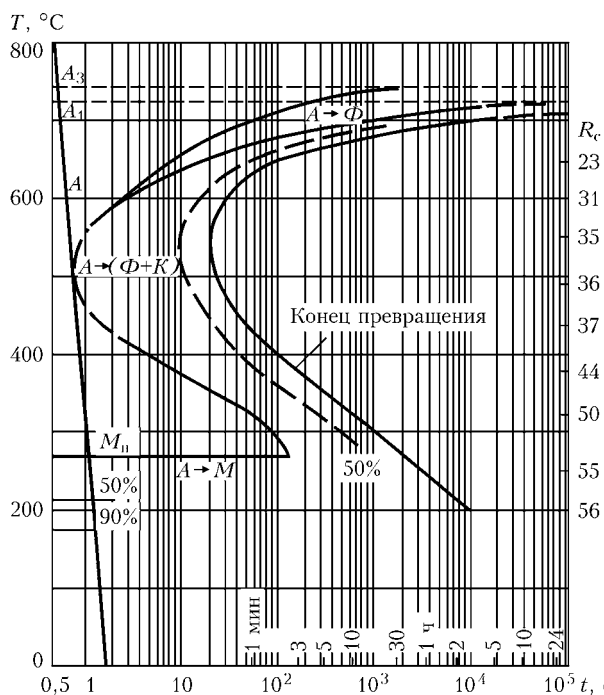


Рис. 5. Изотермическая диаграмма распада переохлажденного аустенита в стали 65Г [5]

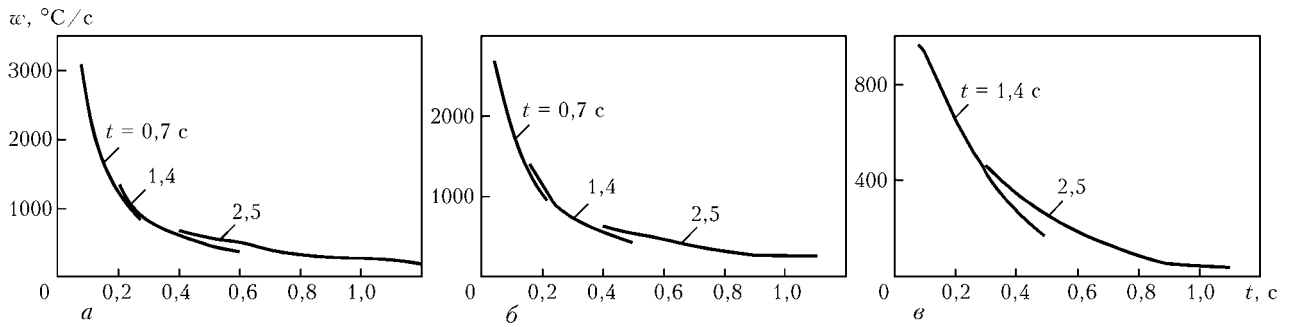


Рис. 6. Скорости охлаждения в интервале 800... 500 °С на различной глубине тела после нагрева дугой, вращающейся со скоростью 50 с⁻¹: а — z = 0,5; б — 1,0; в — 1,5 мм

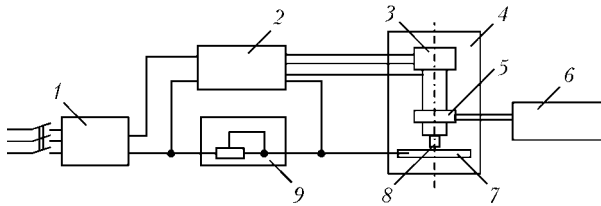


Рис. 7. Схема лабораторной установки (обозначения см. в тексте)

вания температуры на поверхности образца при разном расстоянии r от центра кольца показаны на рис. 4, б. Поскольку с точки зрения полиморфных превращений представляет интерес форма кривой охлаждения только до точки изгиба С-образной кривой изотермического распада аустенита (для стали 65Г эта точка лежит на изотерме 500 °С (рис. 5)), расчет выравнивания температуры ограничивался этим значением. На графике, представленном на рис. 5, нанесена прямая линия, которая определяет границу скоростей охлаждения, ниже которых происходит распад первичного аустенита. Видно, что предельная скорость охлаждения, определяющая мартенситную структуру закаленного металла, составляет 400 °С/с при температуре охлаждаемой области 500 °С. На рис. 6 показаны кривые скоростей охлаждения в интервале 800... 500 °С на разной глубине тела в точках, расположенных на радиусе 5 мм от оси вращения дуги.

Таким образом, расчет показал реальную возможность получения зоны термической обработки кольцевой формы с помощью вращаемой дуги; при этом глубина обработки должна быть достаточной для последующих технологических операций. Однако расчет не учитывает расход энергии на фазовые превращения и зависимость теплофизических характеристик от температуры и фазового состояния. Не принимались во внимание также теплоотвод с поверхности тела и влияние растекания жидкой фазы по поверхности металла. Поэтому теоретические результаты были уточнены экспериментально.

Наиболее часто поперечное магнитное поле используется при сварке труб и создается встречным включением двух симметричных катушек, располагаемых соосно со свариваемыми трубами. При локальной термической обработке стального листа сформировать поперечное магнитное поле таким же образом, как при сварке труб, невозможно из-за сложности юстировки осей соленоидов. Кро-

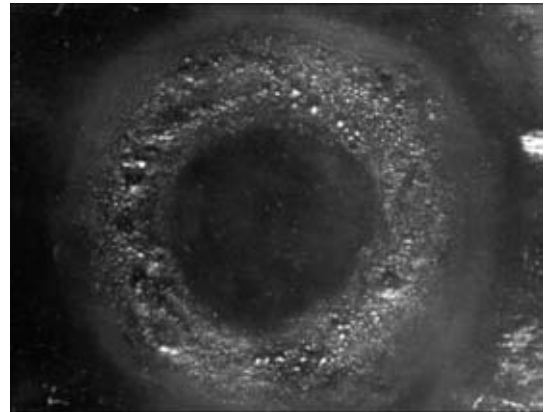


Рис. 8. Форма следа дуги мощностью 2,4 кВт, вращающейся со скоростью 30 с⁻¹ в течение 2,5 с

ме того, необходимо учитывать экранирующее влияние обрабатываемого изделия и наличие аксиальной составляющей магнитного поля в области горения дуги.

Ранее [6] был проведен большой объем исследований по определению возможности получения достаточного поперечного магнитного поля, необходимого для вращения дуги по торцу полой детали, с использованием только одной катушки, располагаемой вокруг привариваемой трубки. Результаты этих исследований позволили создать установку для исследования локальной поверхностной термообработки дуговым импульсным разрядом кольцевой формы.

Установка, схема которой показана на рис. 7, состоит из источника постоянного тока АИСИ-2000 1, блока управления 2, который формирует и контролирует параметры вспомогательной дуги, включает и выключает ток основной дуги с заданной выдержкой времени термообработки, балластных реостатов 9, регулирующих ток дуги, приспособления для термообработки 4 с кольцевым электродом 8 и электромагнитом привода перемещения электрода 3, соленоида 5 с источником питания 6. В приспособление укладывается термообрабатываемый образец 7.

Источник постоянного тока АИСИ-2000 разработан фирмой АИСИ (Грузия) по техническому заданию ИЭС им. Е. О. Патона и предназначен для дугоконтактной тавровой приварки шпилек током 200... 2000 А. Для проведения исследовательской работы по поверхностной термообработке АИСИ-2000 не подвергался какой-либо модернизации. Для управления исследуемым процессом

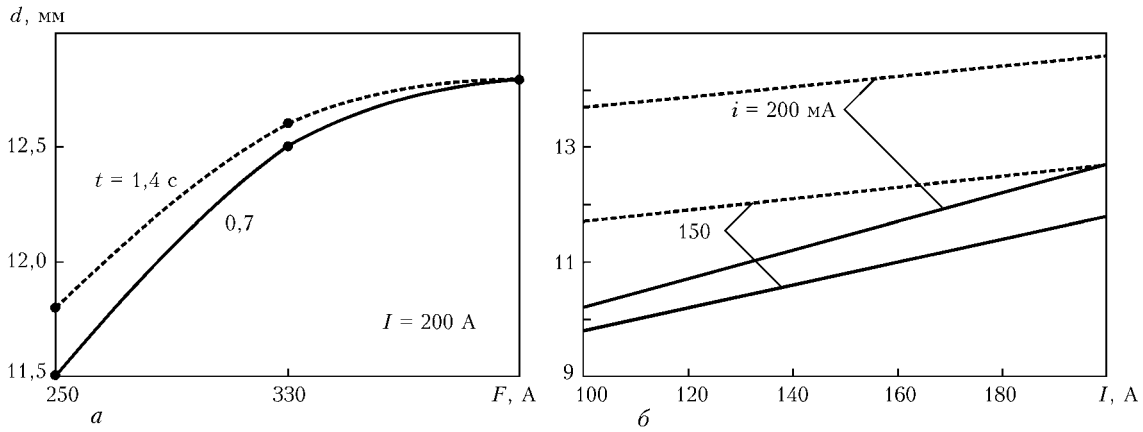


Рис. 9. Зависимость наружного диаметра кольцевого следа дуги от магнитодвижущей силы F (а) и тока дуги (б) при различных продолжительности горения дуги и токе питания соленоида вращения дуги

использовали блок управления дугоконтактной приваркой шпилек с необходимыми изменениями, связанными, главным образом, с отсутствием стадии погружения шпилек в ванну расплавленного металла на листе. Дуговой разряд осуществлялся между трубчатым электродом диаметром 10 мм с толщиной стенки 2 мм и пластиной из стали 65Г. Соленоид имел 1655 витков. Изменяемыми параметрами режима были время обработки ($t = 0,7... 2,5$ с), ток обрабатываемой дуги ($I = 100... 200$ А), ток питания соленоида вращения дуги ($i = 150... 250$ мА), а также длина дугового промежутка (2... 2,5 мм). Указанные пределы изменения параметров режима выбраны в предварительных экспериментах, исходя из необходимого требования равномерного обхода дугой всей окружности электрода. Выход за эти пределы приводил либо к неполному нагреву окружности под электродом (образованию серповидного следа), либо к оплавлению всей поверхности в пределах кольца. Внешний вид следа дуги на пластине изучали при увеличении $\times 10$ с помощью микроскопа МБС-2. На металлографических шлифах, приготовленных обычным образом, глубину и ширину обработанной зоны измеряли соответственно при увеличениях $\times 155$ и $\times 62$. Микротвердость определяли прибором М400 фирмы «Лесо» при нагрузке 50 г.

Условие получения следа дуги в виде замкнутого кольца выполняется не во всем диапазоне изменения указанных выше параметров дуги. Нап-

пример, при увеличении тока до 200 А кольцевое оплавление получено только при длительности воздействия не более 0,7 с. При более продолжительном времени горения дуги оплавлена вся площадь круга.

Регулированием режима можно получить поверхность с минимальными искажениями (рис. 8) и высокой микротвердостью металла ЗТВ.

При увеличении магнитодвижущей силы (рис. 9, а) и тока дуги (рис. 9, б) диаметр следа дуги возрастает. На рис. 9, б показаны две серии, полученные при продолжительности горения дуги 2,5 с (штриховые) и 1,4 с (сплошные кривые). При наименьших токах дуги и управляющего магнитного поля дуга вращается по внутреннему краю трубчатого электрода. При увеличении этих параметров и соответствующем возрастании скорости вращения дуги по торцу электрода нейтральный газ, увлекаемый дугой, смещается к наружному краю трубки центробежной силой. При этом дуга приобретает коническую форму, расширяясь у обрабатываемого листа тем больше, чем выше взаимодействующие ток дуги и управляющее магнитное поле.

Увеличение времени горения дуги также приводит к возрастанию наружного диаметра следа. Но это, по-видимому, связано не с кинематикой, а с энергетикой дуги. Такое же объяснение можно предложить для изменения ширины следа, возрастающей вместе с током дуги и временем ее

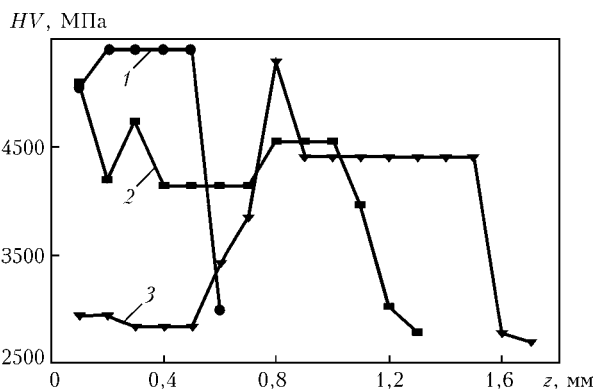


Рис. 10. Распределение микротвердости HV по глубине z образца, нагретого при разных режимах обработки: 1 — $t = 2,5$ с, $I = 103$ А, $i = 150$ мА; 2 — $t = 2,5$ с, $I = 185$ А, $i = 150$ мА; 3 — $t = 2,5$ с, $I = 196$ А, $i = 200$ мА

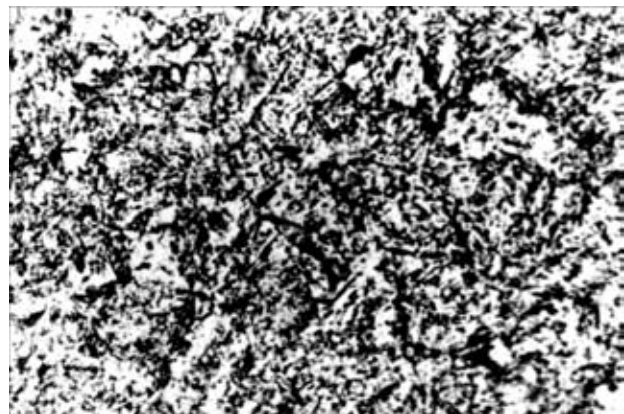


Рис. 11. Микроструктура участка металла ЗТВ после термообработки по режиму 1 (см. рис. 10), $\times 80$



Рис. 12. Микроструктура зоны плавления на поверхности образца, обработанного по режиму 3 (см. рис. 10), $\times 400$

вращения от 1,7 мм ($I = 100$ А, $t = 0,7$ с) до полного заплавления при $I = 200$ А и $t \geq 1,4$ с. Увеличение скорости вращения позволяет получить кольцевую форму следа дуги вплоть до $t = 2,5$ с. При этом повышение тока при максимальной магнитодвижущей силе катушки вызывает сужение следа дуги (вследствие увеличения внутреннего диаметра кольца) из-за возрастания скорости вращения. Удлинение дуги приводит к расширению ее следа.

Несоответствие расчетной температуры в центре окружности следа дуги, которая в процессе выравнивания не превышает 1100 °С, и наличия при определенных условиях заплавления всей площади круга, связано, очевидно, с растеканием металла из областей, нагретых выше температуры плавления ($0,35$ см $< r < 0,45$ см), по горячей внутренней области обрабатываемой локальной поверхности.

Характерные кривые изменения микротвердости металла ЗТВ показаны на рис. 10.

В соответствии с теоретическим расчетом при недостаточном нагреве (рис. 10, кривая 1) только на глубине до 0,6 мм (см. рис. 6, а) скорость охлаждения достаточна для образования мелкозернистой мартенситной структуры (рис. 11). Глубже микротвердость снижается до уровня ферритно-перлитной структуры основного металла. При увеличении мощности источника нагрева и скорости вращения дуги (рис. 10, кривая 2) микротвердость металла ЗТВ только вблизи поверхности соответствует мартенситной структуре. Начиная с $z = 0,2$ мм область термического воздействия имеет структуру верхнего бейнита.

При интенсивном оплавлении поверхности образца закристаллизовавшийся металл литой зоны имеет дендритную структуру (рис. 12) с относи-

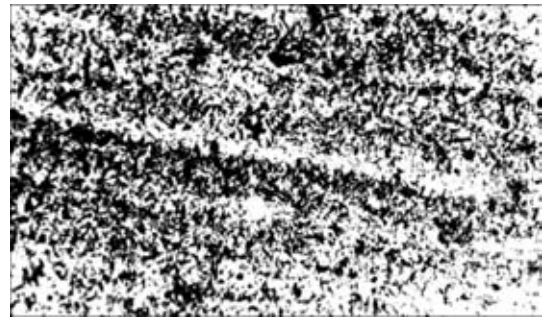


Рис. 13. Микроструктура участка металла ЗТВ после термообработки по режиму 3 (см. рис. 10), $\times 400$

тельно низкой микротвердостью (рис. 10, кривая 3). Из рисунка видно, что высокая твердость отмечена непосредственно под зоной плавления. Охлаждение здесь прошло настолько быстро, что не успела завершиться рекристаллизация, сохранились текстура прокатки и мелкозернистый мартенсит как результат закалки (рис. 13).

Выводы

1. Локальная поверхностная термическая обработка вращающейся дугой позволяет получить упороченную зону кольцевой формы, имеющую минимальное искажение (выпуклость!).
2. Глубина зоны термической обработки с повышенной твердостью, превышающей в 2 раза твердость основного металла, достигает 1,5 мм.
3. Наличие центрального участка незакаленного (мягкого) металла способствует увеличению маслостойкости поверхности, и вследствие этого можно ожидать уменьшения коэффициента трения и износа термообработанной поверхности.

1. Вайтерман А. Е., Колганов Б. Д., Попов В. О. Особенности состояния и перспективы применения материалов с особыми свойствами поверхностных слоев // Вопр. материаловедения. — 1995. — № 1. — С. 116–125.
2. Сафонов А. Н. Остаточные напряжения в поверхностных слоях после лазерной обработки и их влияние на эксплуатационные свойства // Свароч. пр-во. — 1996. — № 8. — С. 7–11.
3. Гаген Ю. Г., Таран В. Д. Сварка магнитоуправляемой дугой. — М.: Машиностроение, 1970. — 160 с.
4. Бахвалов Н. С. Численные методы. — М.: Наука, 1975. — 632 с.
5. Попов А. А., Попова Л. Е. Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. — М.; Свердловск: Машгиз, 1961. — 431 с.
6. Лебедев В. К., Калеко Д. М., Быховец В. Н. Дугоконтактный способ тавровой приварки деталей трубчатой формы // Автомат. сварка. — 1999. — № 7. — С. 30–36.

Design and experimental procedures were used to demonstrate the possibility of producing by a magnetically-impelled arc a heat-treated section of a circular shape with minimum distortion and higher oil absorption. Characteristics of the HAZ under the magnetically-impelled arc have been studied, and it is shown that the region of a two-times increase of hardness goes down to the depth of 1.5 mm.

Поступила в редакцию 23.09.2003