



УДК 621.791.92.04

ВЛИЯНИЕ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОТКОЛОВ ПРИ НАПЛАВКЕ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ АУСТЕНИТНЫМИ ПРОВОЛОКАМИ

В. К. КАЛЕНСКИЙ, канд. техн. наук, **Я. П. ЧЕРНЯК**, инж., **В. Г. ВАСИЛЬЕВ**, канд. техн. наук, **Т. Г. СОЛОМИЙЧУК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На примере многослойной восстановительной наплавки изношенных боковых поверхностей желобчатых трамвайных рельсов аустенитными проволоками типа ПП-06Х15Г15Н2МФ показано, что выполнение наплавки первого валика одной дугой с погонной энергией 28...30 кДж/см исключает образование отколов в металле ЗТВ трудносвариваемой высокоуглеродистой стали М-76.

Ключевые слова: наплавка, износ, восстановление, металл ЗТВ, отколы, двух- и однодуговой процессы, термические циклы, структура, твердость

Настоящая работа выполнена на примере восстановительной наплавки изношенных рельсов.

Трамвайные рельсы и колеса, работая в паре, изнашивают друг друга. Наиболее интенсивно этот процесс идет на криволинейных участках пути, где устанавливаются желобчатые рельсы. Изнашиваются преимущественно внутренние боковые поверхности головки и губы рельсов.

Перед специалистами ИЭС им. Е. О. Патона была поставлена задача разработать технологию восстановительной наплавки боковых поверхностей изношенных рельсов на действующей трамвайной колее без применения предварительного и сопутствующего подогрева.

Рельсы в основном изготавливают из трудносвариваемой стали М-76 (ГОСТ 24182-80) с массовой долей углерода 0,69...0,82 %. В настоящей работе использовали рельсы из стали М-76, содержащей, мас. %: С 0,76; Мп 0,80; Si 0,33; S 0,021, Р 0,017. При дуговой наплавке рельсов из этой стали плавящимся электродом в угол массовая доля углерода в первом наплавленном валике за счет перемешивания с основным металлом может достигать 0,45 %. Чтобы избежать образования хо-

лодных и горячих трещин при таком содержании углерода, наплавку проволоками ферритно-перлитного класса на практике выполняют с обязательным предварительным подогревом и замедленным охлаждением [1, 2]. Поскольку техническим заданием применение подогрева исключалось, в настоящей работе при наплавке использовали стандартные проволоки аустенитного класса марок Св-08Х20Н9Г7Т, Св-08Х21Н10Г6 и опытную порошковую проволоку типа ПП-06Х15Г15Н2МФ. Известно [3, 4], что при использовании проволок аустенитного класса, имеющих пониженную температуру плавления, зона термического влияния (ЗТВ) меньше перегревается, а поступление в нее водорода из наплавленного металла резко сокращается.

Близкие к вертикальным изношенные внутренние поверхности наплавливали горизонтальными валиками. Их накладывали друг на друга и подформовывали флюсом АН-72, засыпанным в желоб рельса. Режим наплавки был следующим: сварочный ток $I_{св} = 350...450$ А; напряжение на дуге $U_d = 30...32$ В; скорость наплавки $v_n = 28...42$ м/ч; постоянный ток; обратная полярность; внешняя характеристика жесткая. Поперечный макрошлиф губы рельса, наплавленной указанным способом, показан на рис. 1.

При изучении макро- и микрошлифов было установлено, что во всех случаях без исключения под первым наплавленным валиком на границе



Рис. 1. Макрошлиф наплавленной губы рельса

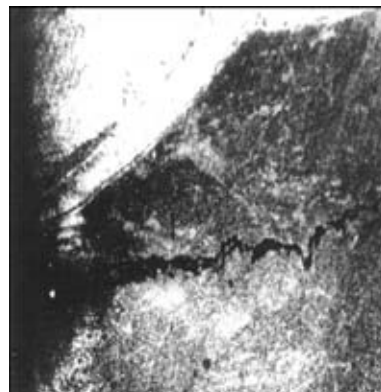


Рис. 2. Откол под первым наплавленным валиком (X50)

© В. К. Каленский, Я. П. Черняк, В. Г. Васильев, Т. Г. Соломийчук, 2001

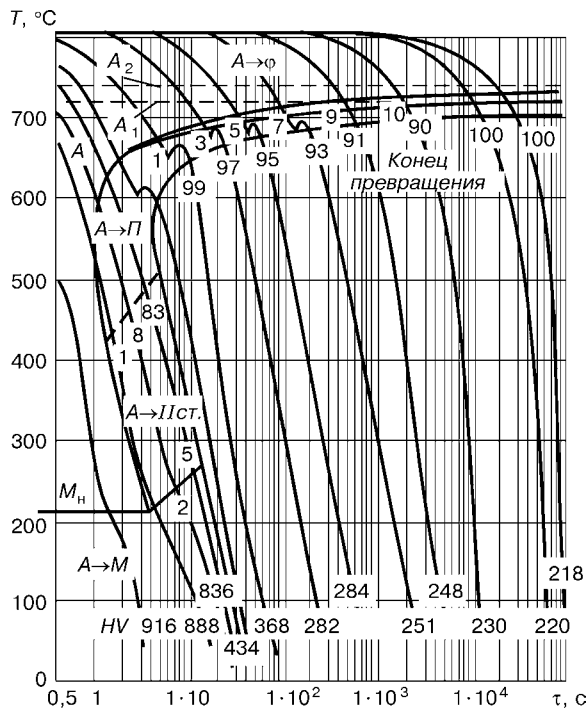


Рис. 3. Термокинетическая диаграмма превращений аустенита в стали У8, мас. %: С 0,76; Si 0,20; Mn 0,29

сплавления или в металле ЗТВ, вблизи от этой границы, по длине наплавленного участка наблюдалось образование холодных трещин типа отколов (рис. 2). Их глубина составляла от 4 до 8 мм, а раскрытие достигало 0,4 мм. Изменяя параметры режима наплавки в указанных выше пределах, избавиться от них не удалось. Однако необходимо отметить, что в металле ЗТВ последующих валиков трещины отсутствовали, видимо, потому, что они наплавлены на основной металл, который был уже подогрет теплом первого валика.

Наиболее вероятная причина появления отколов под первым валиком — наличие сварочных и структурных напряжений, возникающих на границе сплавления из-за почти двухкратной разницы между коэффициентами линейного расширения (КЛР) аустенитного наплавленного металла и высокоуглеродистой перлитной стали М-76, в металле

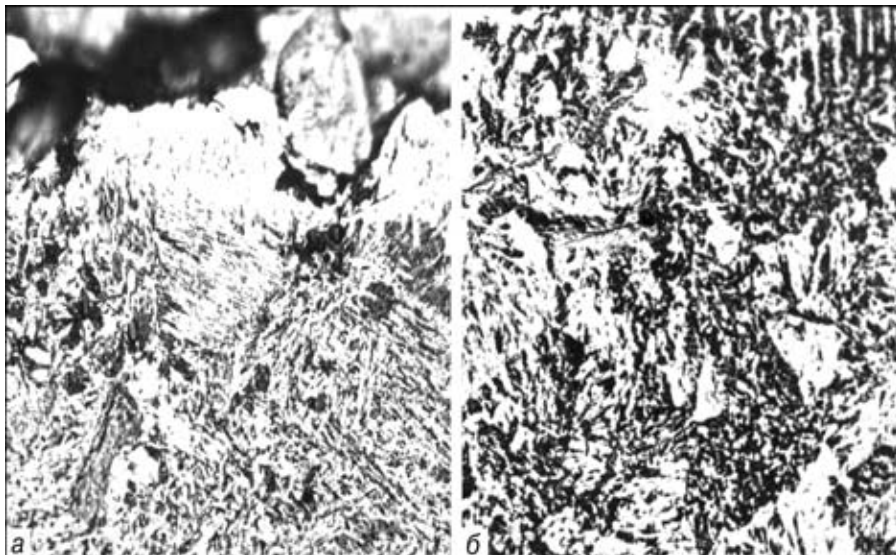


Рис. 4. Микроструктура (X500) металла ЗТВ, полученная при двухдуговой наплавке первого валика: а — $Q = 19,41$; б — $33,56$ кДж/см

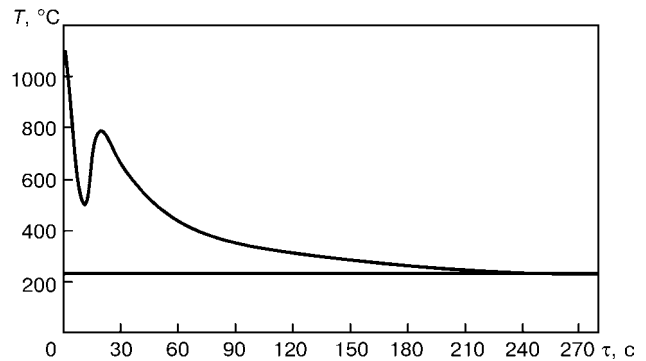


Рис. 5. Кривая термического цикла, полученная при двухдуговой наплавке первого валика с $Q = 33,56$ кДж/см

ЗТВ которой образовались непластичные структуры.

Настоящее исследование было предпринято с целью исключить появление отколов. На первом его этапе определяли влияние скорости охлаждения на температуру распада аустенита в стали М-76. С этой целью на быстродействующем дилатометре конструкции ИЭС им. Е. О. Патона имитировали сварочный термический цикл, при котором скорость охлаждения в интервале температур $600...500$ °С составляла $w_{6-5} = 36, 20$ и $8,5$ °С/с. При $w_{6-5} = 36$ и 20 °С/с аустенит в стали полностью превращается в мартенсит. Температура начала мартенситного превращения составляет около 230 °С. При скорости охлаждения $8,5$ °С/с мартенситному превращению M_n предшествует незначительное частичное промежуточное превращение аустенита в перлит.

Следует отметить, что сталь М-76 по составу очень близка стали У8, близки также и температурные интервалы превращений в этих сталях, а точки M_n совпадают полностью. Поскольку в литературе мы не нашли достаточно подробной термокинетической диаграммы распада аустенита в стали М-76, то в настоящей работе руководствовались известной [5] диаграммой превращения аустенита в стали У8 (рис. 3). Из нее следует, чтобы получить в металле ЗТВ относительно благоприятную структуру с твердостью около $HV 350$ ($P = 10$ Н, $t = 10...15$ с) нужно «выйти» из мар-



Таблица 1. Влияние погонной энергии на образование отколов под первым валиком при двухдуговой наплавке*

| № опыта | Валик | Количество дуг | $I_{св}$, А | v_n , м/ч | Q , кДж/см | w_{3-2} , °С/с | Максимальная твердость ЗТВ, HV_1 | Наличие отколов |
|---------|-----------|----------------|--------------|-------------|--------------|------------------|------------------------------------|-----------------|
| 1 | Первый, | 2 | 620* | 36,8 | 19,41 | 1,05 | 413 | Есть |
| | остальные | 1 | 350 | 36,8 | 10,96 | Не опр. | — | |
| 2 | Первый, | 2 | 620* | 24,8 | 28,80 | 0,70 | 378 | Нет |
| | остальные | 1 | 350 | 36,8 | 10,96 | Не опр. | — | |
| 3 | Первый, | 2 | 620* | 21,8 | 33,56 | 0,40 | 348 | » |
| | остальные | 1 | 350 | 36,8 | 10,96 | Не опр. | — | |

* Суммарный ток на двух дугах; напряжение на дуге составляет 32 В.

Таблица 2. Влияние погонной энергии на образование отколов под первым валиком при однодуговой наплавке*

| № опыта | Валик | v_n , м/ч | Q , кДж/см | w_{3-2} , °С/с | Максимальная твердость ЗТВ, HV | Наличие отколов |
|---------|-----------|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|-----------------|
| 4 | Первый, | 36,8 | 11,59 | 1,25 | 408 | Есть |
| | остальные | 36,8 | 11,59 | » | — | |
| 5 | Первый, | 19,2 | 22,20 | 0,85 | 368 | Нет |
| | остальные | 36,8 | 11,59 | » | — | |
| 6 | Первый, | 15,2 | 28,05 | 0,50 | 352 | » |
| | остальные | 36,8 | 11,59 | » | — | |

* Остальные параметры режима наплавки составляют: $I_{св} = 370$ А; $U_d = 32$ В.

тенситной области. Для этого требуется уменьшить скорость охлаждения стали после наплавки, т. е. увеличить время охлаждения металла ЗТВ до 150... 250 с. Известно, что эффективным способом снижения скорости охлаждения металла ЗТВ является двухдуговая наплавка [6, 7]. Изменяя параметры режима наплавки на каждой дуге, а также расстояние между ними, можно в широких пределах регулировать характеристики термического цикла.

В нашем случае наплавку первого валика выполняли двумя, последовательно расположенными, расщепленными проволоками, которые подключали к одному источнику питания. Для проведения опытов была выбрана порошковая проволока типа

ПП-06Х15Г15Н2МФ. При этом руководствовались следующими соображениями:

металл, полученный при наплавке этой проволокой, имеет самый большой КЛР ($23 \cdot 10^{-6}$ в интервале 0... 1000 °С) и, следовательно, в большей степени склонен к образованию отколов;

он содержит минимальное количество никеля, дефицитного в Украине;

его твердость после наплавки, составляющая около $HRC 22$, после налета колесами трамвая увеличивается до $HRC 52$, что повышает износостойкость наплавленных рельсов в несколько раз.

В опытах использовали плавящийся пемзовидный флюс АН-72. Перед наплавкой флюс и проволоку тщательно прокаливали в печи. Начинали наплавку при температуре 10 °С. Расстояние между дугами при наплавке первого валика устанавливали равным 90 мм. Второй и последующие валики наплавливали одной электродной проволокой. В общей сложности

на каждый образец наплавливали по пять валиков с интервалом 10 мин после наплавки каждого. Погонную энергию рассчитывали по формуле

$$Q = \frac{60 I_{св} U_d}{1000 v_n} \text{ [кДж/см]},$$

где v_n — скорость наплавки, см/мин.

Запись термических циклов осуществляли самопишущим прибором КСП-4 с использованием хромель-алюмелевых термопар, зачеканенных в основном металле на уровне предполагаемой границы сплавления. Результаты проведенных опытов приведены в табл. 1.

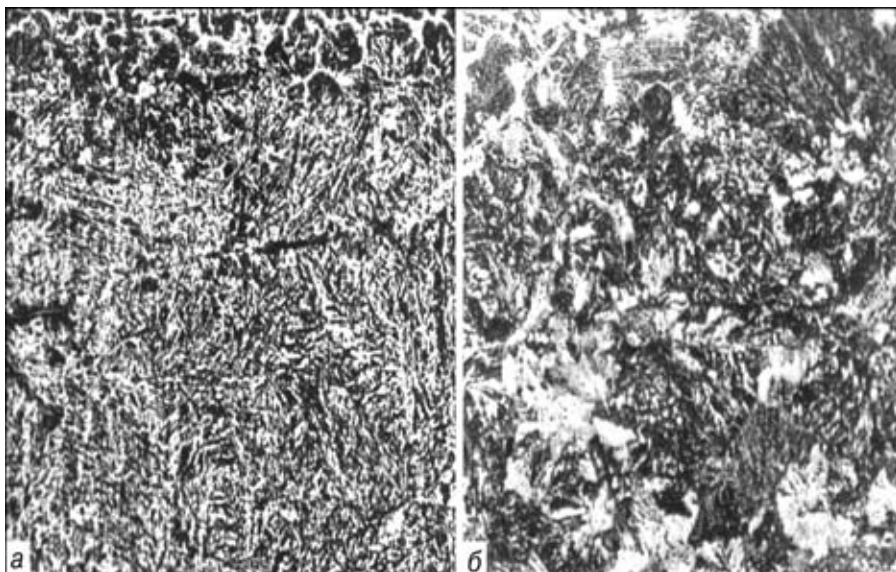


Рис. 6. Микроструктура (×500) металла ЗТВ, полученная при однодуговой наплавке первого валика: а — $Q = 11,59$; б — $28,05$ кДж/см

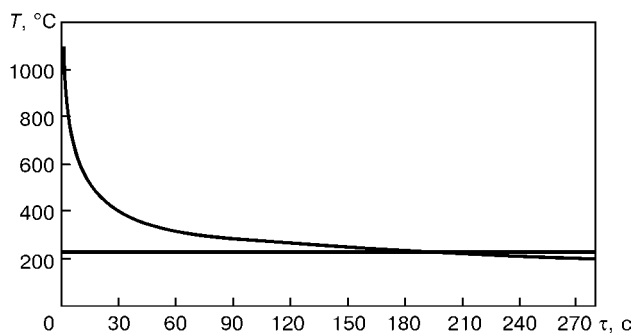


Рис. 7. Кривая термического цикла, полученная при однодуговой наплавке первого валика с $Q = 28,05$ кДж/см

С помощью металлографических исследований установлено, что под первым наплавленным валиком структура металла ЗТВ вблизи границы сплавления в образце, полученном в опыте № 1, практически полностью состоит из отпущенного мартенсита (рис. 4, а). Его твердость достигает $HV 413$. На границе сплавления виден откол. С увеличением погонной энергии доля мартенсита отпуска уменьшается и в структуре металла ЗТВ образуются бейнит и даже перлит (рис. 4, б).

На рис. 5 приведена кривая термического цикла, полученная в опыте № 3 при двухдуговой наплавке первого валика, обеспечивающего отсутствие трещин в ЗТВ основного металла.

Таким образом, применение двухдуговой наплавки позволяет решить проблему наплавки трамвайных рельсов без предварительного подогрева и отколов в металле ЗТВ под первым валиком. Однако этот способ наплавки заметно усложняет технологический процесс, поскольку рабочему уследить за двумя проволоками труднее, чем за одной (следует учитывать, что наплавка рельсов должна производиться на улице в ночное время, когда трамвайное движение прекращается).

В связи с изложенным выше мы остановились на наплавке первого валика одной проволокой. В остальном методика наплавки и записи термических циклов остались прежними. Результаты второй серии опытов приведены в табл. 2.

Наплавка на малой погонной энергии (опыт № 4) так же, как и при двухдуговом способе, приводит к возникновению откола. В металле ЗТВ

образуется мартенсит, который при наложении последующих валиков подвергается отпуску (рис. 6, а). Его твердость составляет $HV 408$. Увеличение погонной энергии при наплавке первого валика до $28,05$ кДж/см уменьшает скорость охлаждения металла ЗТВ в интервале температур $300 \dots 200$ °C до $0,50$ °C/с, а максимальную твердость — до $HV 352$. Отколы при этом исключаются. Структура металла ЗТВ состоит из бейнита и перлита (рис. 6, б). Благодаря уменьшению тепловложения при однодуговой наплавке структура его заметно измельчается по сравнению с двухдуговой.

На рис. 7 показана кривая термического цикла, полученная при однодуговой наплавке первого валика, обеспечивающего отсутствие трещин в металле ЗТВ основного металла.

Таким образом, чтобы исключить образование отколов в металле ЗТВ рельсов из стали М-76 при наплавке проволоками аустенитного класса, первый валик следует наплавлять одной дугой при погонной энергии $28 \dots 30$ кДж/см.

Порошковая проволока ПП-06Х15Г15Н2МФ сравнительно дорогая, однако ее применение для наплавки экономически оправдано. Расчеты, при которых не учитывалось повышение износостойкости рельсов, показали, что расходы на восстановительную наплавку рельсов с применением указанной проволоки в $3 \dots 4$ раза меньше, чем на замену изношенных рельсов новыми.

1. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.
2. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 767 с.
4. Козлов Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей. — М.: Машиностроение, 1986. — 160 с.
5. Попов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термодинамические диаграммы распада переохлажденного аустенита. — М.: Металлургия, 1965. — 495 с.
6. Метелев А. В., Горбачев Ю. И. Регулирование термического цикла двухдуговой сварки закаляющихся сталей // Свароч. пр-во. — 1984. — № 2. — С. 4–5.
7. Бурский Г. В., Савицкий М. М., Новикова Д. П. Сопро-тивляемость ЗТВ сварных соединений закаляющихся высокопрочных сталей замедленному разрушению при двухдуговой сварке // Автомат. сварка. — 1998. — № 2. — С. 12–15.

It is shown by an example of multilayer restoration surfacing of worn out side surfaces of tram guard rails, using austenitic wires of the 06Kh15G15H2MF type, that deposition of the first bead by one arc with a heat input of $28 \dots 30$ kJ/cm eliminates spallings in the HAZ of hard-to-weld high-carbon steel M-76.

Поступила в редакцию 16.07.2001