



УДК 669.117.56

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ ПРИ ПОРЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЖИДКОГО ПРИСАДОЧНОГО МЕТАЛЛА

К. А. Цыкуленко

Рассмотрены особенности формирования наплавленного слоя при электрошлаковой наплавке жидким металлом в токоподводящем кристаллизаторе. Показано влияние режимов порционной заливки на качество зоны соединения и кристаллическую структуру наплавленного слоя (образование при определенных условиях волнообразной или прямой линейной зоны соединения: условия постоянного увеличения глубины провара или непровара вообще, образования капель в наплавленном слое и изменения кристаллической структуры, являющиеся следствием порционной заливки жидкого присадочного металла).

Peculiarities of formation of a clad layer in electroslag cladding using a liquid metal in a current-carrying mould are shown. The effect of conditions of a portion pouring on the quality of joining and crystalline structure of a clad layer is shown (formation at certain conditions of a wavy or straight-linear zone of joining: conditions of a constant increase in depth of penetration or lack of penetration as whole, formation of drops in a clad layer and changes in crystalline structure caused by a portion pouring of the liquid filler metal).

Ключевые слова: токоподводящий кристаллизатор; электрошлаковая наплавка; порционная заливка жидкого металла; особенности формирования наплавленного слоя

Электрошлаковый процесс с отдельным плавлением и кристаллизацией металла [1–3], созданный на основе применения токоподводящего кристаллизатора в качестве нерасходуемого электрода и жидкого присадочного металла, позволяет преодолеть жесткую зависимость между производительностью классического электрошлакового процесса и его температурными параметрами, успешно осуществлять как наплавку различных цилиндрических изделий, так и выплавку сплошных и полых слитков. В отличие от канонической схемы электрошлакового переплава или наплавки, характерной особенностью этого процесса на современном этапе его развития является порционная подача жидкого присадочного металла на зеркало шлаковой ванны. Непрерывной подаче жидкого присадочного металла препятствуют трудности, связанные с необходимостью разлива жидкого металла со сравнительно малыми скоростями (до 1000 кг/ч) и тонкой (диаметром до 5 мм) струей жидкого металла.

Примерные скорости разлива стали непрерывной струей жидкого металла через отверстия различного диаметра следующие [4]:

Диаметр отверстия, мм	2	3	4	5	6	7
Скорость разлива, кг/ч	190	394	706	1087	1590	2226

Порционная подача жидкого присадочного металла обуславливает ряд особенностей технологических процессов выплавки слитков и наплавки. Некоторые из них применительно к наплавке описаны в работе [5]. Следует отметить, что именно при наплавке эти особенности наиболее многообразны и могут приводить к нежелательным последствиям. Поэтому их изучению следует уделять особое внимание.

Одним из наиболее важных вопросов формирования наплавленного слоя металла является характер провара основного металла. При непрерывном поступлении жидкого металла в зону наплавки и равномерном перемещении источника тепловыделения относительно наплавливаемой поверхности провар основного металла имеет в основном прямолинейный характер, обнаруживаемый, например, на швах, выполненных электрошлаковой сваркой расходуемым электродом в стационарных условиях плавки. И в этом случае поступление металла с каплями в ванну носит дискретный характер, однако высокая частота падения капель и их небольшая масса позволяют рассматривать этот поток жидкого металла как непрерывную струю. При порционной подаче жидкого присадочного металла, когда масса порции измеряется в килограммах, а частота подачи порций составляет 1 мин⁻¹ и менее, возникает другая проблема. При постоянной линейной скорости на-

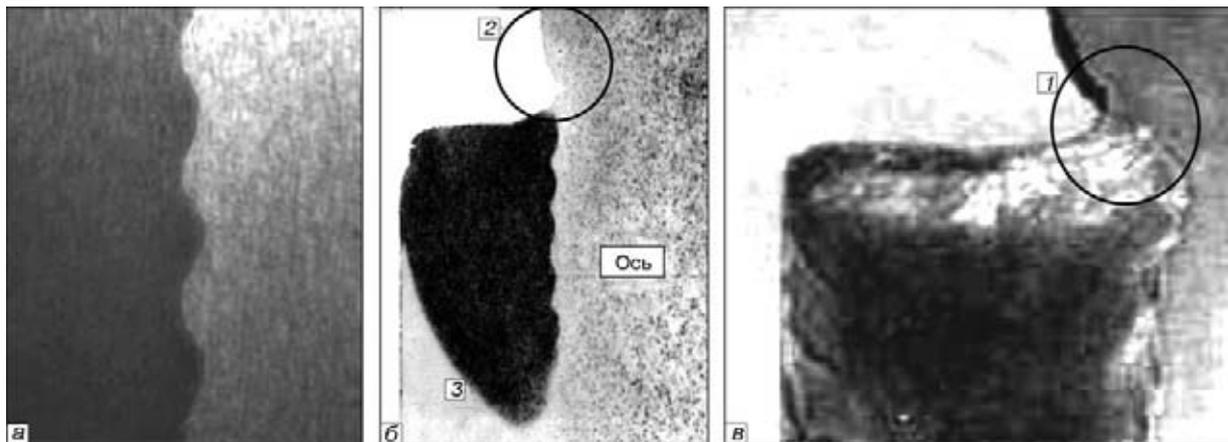


Рис. 1. Фрагмент зоны соединения — профиль провара — (а) и оплавление оси шлаком (б, в) при порционной подаче жидкого присадочного металла в процессе электрошлаковой наплавки (ЭШН ЖМ): 1 — участок контакта металлической ванны и наплавляемой заготовки; 2 — оплавление оси в шлаковой ванне; 3 — металлическая ванна

плавки происходит скачкообразное перемещение источника тепловыделения по высоте наплавляемой поверхности с частотой подачи порций металла. Это не может не сказываться на характере провара.

Кроме того, прерывистое поступление жидкого металла на фронт кристаллизации при постоянной линейной скорости кристаллизации обуславливает скачкообразное изменение основных параметров кристаллизации, что неизбежно влечет за собой периодическое изменение кристаллической структуры.

Обычно составы наплавляемого и основного металла отличаются друг от друга. Постоянный характер затвердевания металлической ванны и дискретный характер поступления в нее металла, отличающегося по составу, неизбежно приводят к повторяющейся неоднородности химического состава металла по высоте наплавки.

Еще одна особенность формирования наплавленного слоя при порционной подаче присадочного

металла проявляется в случае, когда температура плавления наплавляемого металла заметно меньше температуры плавления основного металла. Тогда в промежутке времени между заливками порций присадочного металла в металлическую ванну поступает металл, стекающий с оплавленной поверхности основного металла и имеющий более высокую температуру плавления, чем температура жидкого металла металлической ванны. При определенной ситуации это может привести к образованию так называемых капель, т. е. не успевших раствориться и закристаллизовавшихся в металлической ванне частиц более тугоплавкого металла [6].

Изучению этих особенностей посвящена настоящая работа.

Несмотря на накопленный опыт и объем проведенных исследований механизм формирования зоны соединения при порционной электрошлаковой наплавке жидким металлом в токоподводящем кристаллизаторе до конца не ясен. Имеющиеся сведения иногда носят неоднозначный и даже противоречивый характер. В частности, результаты физического [7] и математического [8] моделирования распределения в шлаковой ванне тока, напряжения и тепловой мощности в некоторых аспектах противоречат друг другу.

Натурные эксперименты по наплавке прокатных валков и изучение шлифов и серных отпечатков продольных темплетов, отобранных от этих валков, позволяют сделать следующие выводы:

профиль провара в большинстве случаев волнообразный (рис. 1, а);

идентичность профиля провара до и после заливки порции жидкого присадочного металла (рис. 1, б) свидетельствует о том, что он определяется характером оплавления оси в шлаковой ванне. Влияние подачи жидкого металла незначительно;

при толщине наплавки 25...85 мм и диаметре валков до 740 мм начало провара оси и его максимальная глубина в процессе наплавки располагаются в месте контакта металлической ванны с поверхностью заготовки (рис. 1, в);

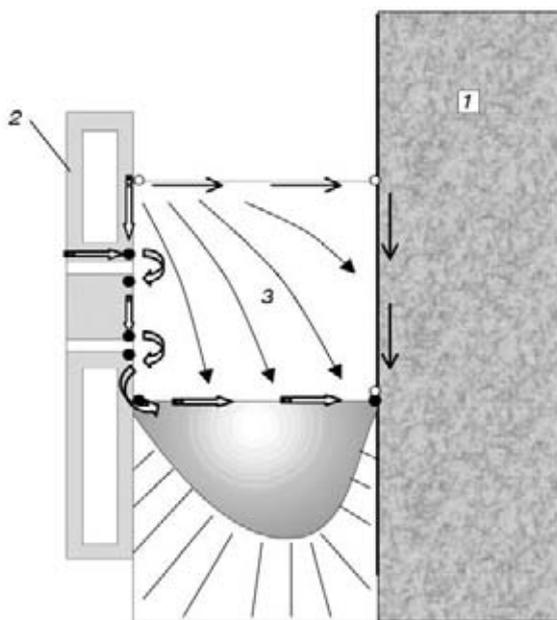


Рис. 2. Участки наибольшего тепловыделения в шлаковой ванне при ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе: 1 — ось; 2 — токоподводящая секция; 3 — шлаковая ванна

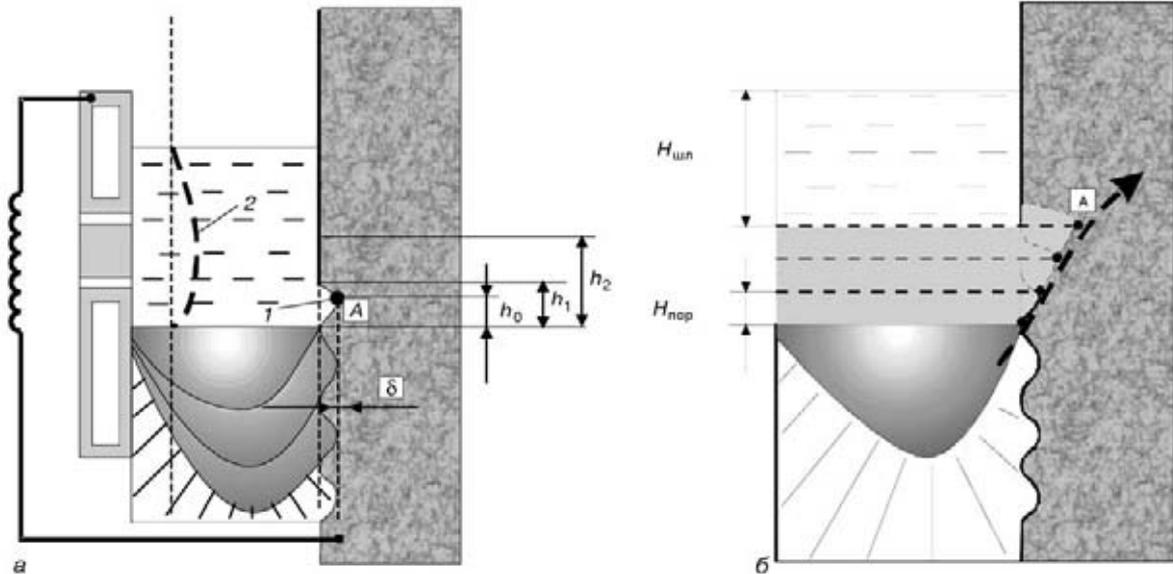


Рис. 3. Гипотетическая форма оплавления оси в шлаке при большом (1) и малом (2) зазорах между наплавляемой осью и кристаллизатором (а), а также схема увеличения провара оси (б)

высота провара (оплавление оси по высоте) существенно меньше глубины шлаковой ванны;

глубина шлаковой ванны практически не оказывает влияния на форму проплавления.

Для объяснения указанных феноменов рассмотрим гипотетическое распределение тока в шлаковой ванне при наплавке оси в токоподводящем кристаллизаторе. При электрошлаковой наплавке только часть шлаковой ванны располагается в токоподводящей секции кристаллизатора. Другая ее часть расположена в разделительной и формирующей секциях кристаллизатора. Ток протекает от стенки токоподводящей секции в двух направлениях: горизонтальная составляющая направлена к наплавляемой оси, вертикальная — к металлической ванне. Абсолютное значение этих составляющих определяется электрическим сопротивлением шлаковой ванны прохождению тока в том или ином направлении. Благодаря выделению тепла при прохождении тока через шлак шлаковая ванна поддерживается в расплавленном состоянии. Однако может существовать электрическая цепь, по-видимому, оказывающая существенное влияние на провар, проходящая от токоподводящей секции к наплавляемой оси через стенки всех секций кристаллизатора, зону раздела шлаковой и металлической ванн, которые практически не оказывают сопротивление протеканию тока, в отличие от мест перехода через шлак от одной секции к другой (рис. 2). Как показывают результаты физического и математического моделирования [7, 8], именно в этих местах обнаружены локальные участки значительного тепловыделения. Абсолютное значение этой части вертикальной составляющей тока может быть сравнительно небольшим, но сконцентрировано на небольшом участке поверхности оси, примыкающей к металлической ванне (или к металлической затравке в начале процесса). Поэтому плотность тока в этом месте может существенно превышать плотность горизонтальной составляющей тока остальной части оси, погруженной в шлак. В результате оплавления ось принимает вид, показанный схематично на рис. 3, а. Сопротивление этой цепи не зависит от глубины шлаковой ванны, а определяется только уровнем переходных сопротивлений между секциями кристаллизатора, что и объясняет фиксируемую в экспериментах независимость характера оплавления оси от глубины шлаковой ванны при неизменном токе. Следует, по-видимому, ожидать изменения характера оплавления оси при существенном уменьшении зазора между кристаллизатором и осью. Тогда с уменьшением сопротивления шлака на этом участке и увеличением горизонтальной составляющей тока роль последней в оплавлении оси существенно увеличится.

Таким образом, в отличие от классического процесса электрошлаковой сварки, токораспределение в шлаковой ванне токоподводящего кристаллизатора способствует формированию на границе шлак–металл концентрированного источника нагрева. При этом определяющую роль в формировании линии сплавления играют размер и частота подачи порций жидкого присадочного металла. Если электрический режим и скорость наплавки определяют среднюю глубину провара, то частота и размер пор-

ций жидкого присадочного металла. Если электрический режим и скорость наплавки определяют среднюю глубину провара, то частота и размер пор-



Рис. 4. Белые полосы в макроструктуре наплавки

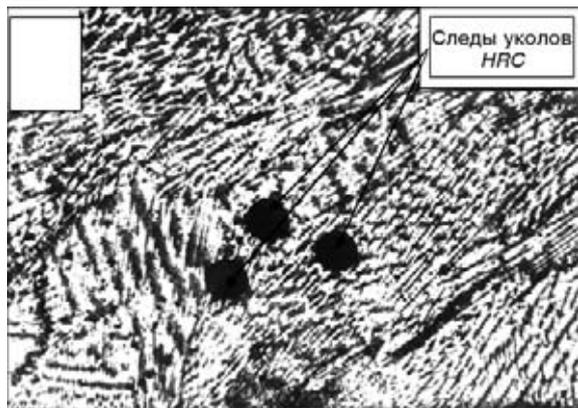


Рис. 5. Травление на дендритную микроструктуру участка белой полосы и прилегающих к ней участков

ций определяют амплитуду колебаний глубины провара. При неизменной скорости наплавки размер порций и частота их подачи жестко связаны. Чем больше порции, тем меньше частота их подачи и тем больше временной интервал между поступлениями присадочного металла в металлическую ванну. В результате локальная глубина провара увеличивается, а последующая большая порция металла резко переносит уровень металлической ванны в положение, где провар минимальный, и цикл снова повторяется. Таким образом, чем меньше порция и больше частота, тем меньше амплитуда колебаний глубины провара. Очевидно также, что абсолютное значение амплитуды колебаний провара снижается при уменьшении средней глубины провара. В случае, когда средняя глубина провара минимальна, а частота подачи порций достаточно велика, волнообразный провар может перейти в прямолинейный. Следует отметить, что при определенном соотношении средних глубин провара, частоты и размера порции прямолинейный провар возможен и при достаточно большой средней глубине провара. Из рис. 3 видно, что при порции h_1 будет формироваться волнообразный провар. С уменьшением размера порций и сохранением их частоты, т. е. при снижении производительности наплавки высота гребня волны будет уменьшаться, а абсолютная глубина провара δ увеличиваться, достигая своего максимального уровня за период между порциями в точке А, что соответствует $H_{пор} = h_0$ (рис. 3, б). Если уменьшить размер порций, например до h_0 , одновременно повысить частоту их заливки и сохранить ту же производительность, то нарастание средней



Рис. 6. «Капли» основного металла в наплавленном слое

глубины провара происходить не будет, точка А переместится вверх по волнообразной линии. Профиль такой волнообразной линии будет зависеть от размера порции (чем меньше порция, тем больше этот профиль соответствует прямой линии). С учетом инерционности электрошлакового процесса даже при порционной подаче присадочного металла можно получить прямую линию сплавления. При размере порции $h_2 > h_1$ и сохранении их частоты заливки, т. е. при повышении производительности, возможно образование непроваров.

Из изложенного следует, что путем изменения размера порций и частоты их подачи в строгом соответствии со средней глубиной провара, определяемой энергетическими параметрами плавки, можно управлять формой линии сплавления при порционной электрошлаковой наплавке в токоподводящем кристаллизаторе, получая как прямолинейную линию сплавления, так и волнообразную с различной высотой волны.

Однако даже получение прямолинейной линии сплавления не устраняет скачкообразное изменение параметров кристаллизации в момент заливки порции металла. Это может привести к образованию структурной неоднородности в наплавленном металле, проявляющейся в формировании белых полос в макроструктуре наплавки (рис. 4), наиболее отчетливо видных в периферийных областях. Характерно, что полосы не обнаруживаются на микрошлифах, а микроструктуры участков металла белых полос и вне их идентичны.

Следует полагать, что локальные изменения теплового режима приводят лишь к локальным изменениям направленности роста кристаллитов (рис. 5), что и вызывает изменение в этих местах интенсивности отражения света. Твердость участков бывших белых полос и 45,5; 43; 41 HRC — на участке вне белых полос. Поэтому эти неоднородности вряд ли могут служить браковочным признаком. Вместе с тем данный вопрос требует дополнительных исследований.

Более серьезной является проблема химической неоднородности наплавленного металла вследствие дискретного характера поступления присадочного металла на фронт кристаллизации при непрерывном его продвижении. Проблема может усугубляться еще и тем, что в периоды между подачей порций присадочного металла в металлическую ванну продолжает поступать отличный по составу металл в результате оплавления основного металла.

Между тем исследования химического состава и микроструктуры быстрорежущей стали, наплавленной на ось из низколегированной стали при проплавлении до 10 мм, существенных отличий разных участков наплавки не выявили. Этот факт можно объяснить усреднением состава металлической ванны в результате ее интенсивного перемешивания при вращении. Однако бывают случаи, когда не весь металл, стекающий с оплавленной поверхности



в металлическую ванну, успевает в ней полностью раствориться. Он образует металлические включения основного металла в матрице из наплавленного металла (рис. 6). Подтверждением этому служат данные спектрального анализа участка капли на ванадий (3,2 %), дающие промежуточное значение между содержанием этого элемента в основном (40ХМ — нет) и присадочном (быстрорез — 7 %) металлах. Роль этих включений в работоспособности изделий до конца не ясна.

Можно было бы сделать априорное заключение, что такие включения могут снижать износостойкость изделий, например валков прокатных станов с наплавленным слоем из быстрорежущей стали, поскольку эти включения более мягкие, а также оказывать положительное влияние на стойкость против хрупкого разрушения, тормозя развивающиеся трещины. Однако промышленные испытания быстрорежущих валков не подтверждают этого. Вопрос требует дальнейших исследований. Приведенные данные о формировании наплавленного слоя при порционной электрошлаковой наплавке необходимо учитывать при разработке режимов наплавки.

1. *Электрошлаковая* наплавка жидким присадочным металлом / Б. И. Медовар, А. В. Чернец, Л. Б. Медовар и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1995. — № 1. — С. 6–11.
2. *Электрошлаковые* процессы без расходуемых электродов / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, Л. Б. Медовар и др. // Там же. — 1997. — № 2. — С. 12–16.
3. *Опыт* изготовления и применения быстрорежущих валков ЭШН ЖМ / Л. Б. Медовар, А. В. Чернец, Ц. Ф. Грабовский и др. // Там же. — 2000. — № 3. — С. 3–9.
4. *GE, Direct processing of electroslag refined metal* / Mark G. Benz, Burnt Hills, Thomas E. Sawyer. Pat. 5160532 USA. — Publ. 03.11.92.
5. *Чернец А. В.* Некоторые вопросы образования наплавленного слоя при ЭШН ЖМ // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1999. — № 1. — С. 8–12.
6. *О механизме* образования металлических включений («капель») в переходной зоне электрошлаковых композитных слитков из разнородных металлов / А. К. Цыкуленко, Б. И. Медовар, Л. В. Чекоило и др. // Спец. электрометаллургия. — 1972. — № 15 — С. 44–52.
7. *Исследование* параметров электрошлаковой плавки в токоподводящем кристаллизаторе / Ю. М. Кусков, В. И. Ус, С. В. Томиленко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1995. — № 3. — С. 24–28.
8. *Some thermal-physical peculiarities of electroslag cladding of rolls using a liquid metal* / N. I. Tarasevich, I. V. Korniets, L. B. Medovar et al. // Proc. of intern. Symp. on electroslag remelting technology and equipment (May 15–17, 2001, Kyiv, Ukraine). — Kyiv, 2001. — P. 83–86.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 26.02.2007

НОВАЯ КНИГА

Электронно-лучевая плавка титана /

Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. —

Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.

В книге рассмотрены вопросы металлургии и металловедения титана и его сплавов. Приведены закономерности поведения примесей и легирующих элементов в процессе электронно-лучевой плавки, учет которых дает возможность получать слитки титановых сплавов заданного химического состава. Рассмотрены особенности кристаллизации титана в условиях регулируемого нагрева электронным лучом поверхности расплава, что позволяет задавать скорость кристаллизации, форму фронта кристаллизации и глубину ванны расплавленного металла. Приведены характеристики микро- и макроструктуры слитков титановых сплавов, механические характеристики титана электронно-лучевой плавки в литом и деформированном состояниях. Дано описание технологических схем плавки и оплавления поверхности слитков, а также конструкции электронно-лучевых установок.

Для научных и инженерно-технических работников, а также студентов металлургических факультетов вузов.

