

# СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

А. А. Батаев<sup>1</sup>, В. А. Батаев<sup>1</sup>, М. Г. Гслковский<sup>2</sup>, Я. Г. Рыбинская<sup>2</sup>

Новосибирский государственный технический университет,

Институт ядерной физики СО РАН 630092, Новосибирск, Россия, E-mail: [dsm@nstu.nsk.su](mailto:dsm@nstu.nsk.su)

## Аннотация

Методом металлографического анализа изучены структурные преобразования, происходящие в поверхностном слое доэвтектоидной углеродистой стали при вневакуумной электронно-лучевой наплавке порошковых материалов.

## Введение

Одним из наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения сталей, основанных на высокоэнергетическом воздействии на материал, является вневакуумная электронно-лучевая обработка. Мощные (до 100 кВт) промышленные ускорители электронов производства Института ядерной физики СО РАН позволяют с высокой производительностью выполнять поверхностную закалку сталей и оплавление порошковых материалов. Возможность вывода пучка в воздушную атмосферу позволяет обрабатывать крупногабаритные изделия, что является важнейшим достоинством анализируемого метода поверхностного упрочнения.

Процесс электронно-лучевого оплавления порошковых материалов длится короткое время, температура нагрева поверхностных слоев исследованных сталей превышает температуру их плавления. Такое интенсивное воздействие на объект является причиной резкого температурного градиента в основном металле. Результатом наличия температурного градиента является формирование в поверхностном слое стали сложной структуры, определяемой условиями нагрева и охлаждения каждой конкретной точки материала. Таким образом, в процессе электронно-лучевого оплавления порошковых материалов имеет место не только формирование защитного покрытия, но и происходят существенные изменения структуры в поверхностной зоне основного металла. Эти структурные преобразования сопровождаются соответствующими изменениями основных механических свойств материала. В данной работе изучены структурные изменения, происходящие в поверхностной зоне доэвтектоидной стали, при электронно-лучевом оплавлении порошков различного состава.

## Методика проведения исследований

Для проведения исследований были использованы плоские образцы размерами 100x60x15 мм из стали 30 (0,28 %C, 0,22 %Si, 0,65 %Mn) и стали 45 (0,44 %C, 0,33 %Si, 0,58 %Mn). Предварительной обработкой обеих сталей являлась нормализация. В качестве материалов для поверхностного легирования использовали порошки карбидов хрома, бора, кремния.

Электронно-лучевую обработку выполняли в Институте ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск) на промышленном ускорителе типа ЭЛВ-6. Оплавление порошков осуществляли в режиме сканирования электронного луча при энергии 1,4 МэВ. Частота сканирования составляла 50 Гц. В продольном направлении образцы перемещались со скоростью 10 мм/с. Диаметр луча в зоне упрочнения был равным мм. Расстояние от выпускного окна до поверхности образцов составляло 90 мм. Ток электронного пучка был равным 22 тА.

Металлографические исследования проведены на микроскопе типа NU 2E при увеличениях от  $\times 100$  до  $\times 1500$ . Травление микрошлифов осуществляли водным раствором хлорного железа. Микротвердость материала оценивали по ГОСТ 9450-76 на приборе типа ПМТ-3, оснащенный четырехгранной алмазной пирамидой. Усилие, прикладываемое к индентору, составляло 0,981 Н.

## Результаты исследования и их обсуждение

В общем случае структурные изменения, имеющие место при вневакуумном электронно-лучевом оплавлении различных порошков на сталях с феррито-перлитной структурой, принципиально одинаковы. На поверхности стальных образцов образуется легированный слой толщиной до 2,5 мм. Ниже этого слоя располагается зона термического влияния, в пределах которой происходит полное или частичное изменение исходной структуры материала. Температура стали в зоне термического влияния изменяется от критической точки  $A_d$  до температуры плавления. Толщина этой зоны примерно в 2 раза больше толщины легированного слоя.

В поверхностных слоях сталей условно можно выделить шесть зон. Зона 1 представляет собой покрытие, являющееся результатом сложных превращений, происходящих при нагреве электронным лучом порошка, на

несенного на поверхность основного металла. Эти превращения связаны с частичным или полным расплавлением порошка, расплавлением поверхностного слоя стали, растворением порошка в расплаве основного металла, диффузионным перераспределением элементов, сопровождающим процесс нагрева поверхности.

Наиболее глубокая зона представляет собой исходную феррито-перлитную структуру стали. Средний размер ферритного зерна в стали 45 составлял 20 мкм, в стали 30 - 28 мкм. Температура нагрева материала в зоне 6 (даже самых верхних ее слоев) не превышала критической точки  $A_{c1}$ , поэтому полиморфных превращений здесь не наблюдается.

Между покрытием 1 и зоной исходной феррито-перлитной структуры 6 выделены четыре характерные зоны (2, 3, 4, 5), отличающиеся друг от друга строением  $\alpha$ -фазы и конгломератов перлитных колоний. Чем глубже расположена зона, тем ниже температура была достигнута в ней. Температура зон 5 и 4 соответствует температуре межкритического интервала  $A_{a} - A_{c3}$ . В них наряду с «новым» мелкозернистым ферритом сохранена некоторая доля исходных зерен феррита.

В зоне 5 металлографически наблюдаются конгломераты перлитных колоний, отличающиеся от исходного перлита тем, что в них имеются светлые островки феррита. Средний размер этих островков (зерен феррита) составляет 2 мкм (в обеих сталях). Их появление обусловлено тем, что при превышении температуры  $A_{a}$  перлит превращается в аустенит, углерод которого диффундирует за пределы контура бывших перлитных колоний. Однако низкая диффузионная подвижность углерода при этих температурах и малое время прогрева зоны являются причиной того, что углерод не успевает выйти далеко за пределы контуров бывших перлитных конгломератов. При охлаждении материала зоны 5 имеет место превращение аустенита с образованием перлита и «нового» феррита. Причем объемная доля последнего в зоне 5 мала (менее 10 %), что связано, как уже упоминалось, с относительно низкой диффузионной подвижностью углерода. Размер зерен феррита в матрице, окружающей перлит составляет 15 мкм (в стали 45) и 22 мкм (в стали 30),

Металлографически в зоне 5 можно наблюдать такие перлитные образования, верхний объем которых, нагретый до более высоких температур (выше  $A_{a}$ ), испытал перлитно-аустенитное превращение и обратный переход, а нижний, более холодный, остался в исходном состоянии. Такие конгломераты выделяются из множества соседних по двум характерным признакам. Во-первых, верхняя часть этих образований, обращенная к источнику тепла, отличается развитым рельефом (изрезанным контуром), а, во-вторых, в верхней части обсуждаемых перлитных конгломератов наблюдаются мелкие, редкие выделения феррита. Причиной проявления обоих признаков является превращение перлита в аустенит и диффузионное перемещение углерода из аустенита.

Характерной особенностью перлита зоны 5, позволяющей визуально отличать зоны 5 и 4, является, то, что в пятой зоне наблюдается непрерывность перлита, а в зоне 4 перлитные образования выглядят мелкими обособленными объектами. Средний размер обособленных перлитных конгломератов в зоне 4 составляет ~ 2,5 мкм.

Металл в третьей зоне был нагрет до температуры, превышающей критическую точку  $A_{c3}$ , т.е. сталь находилась в аустенитном состоянии. Температурно-временные условия процесса электронно-лучевой обработки, реализованные в зоне 3, позволили углероду относительно равномерно раствориться по объему металла. В условиях последующего охлаждения стали была сформирована мелкодисперсная феррито-перлитная структура. Феррит и перлит, наблюдающиеся в этой зоне, можно считать однородными. Средний размер ферритных зерен составляет 5 мкм, перлитных конгломератов - 4 мкм. Анализ строения приповерхностных слоев основного металла, испытавших структурные изменения в результате электронно-лучевого оплавления порошка, показывает, что с точки зрения обеспечения высокого комплекса прочностных свойств и трещиностойкости структура стали в зоне 3 является наилучшей.

Зона 2, непосредственно примыкающая к покрытию 1, имеет грубую феррито-перлитную структуру. Феррит этой зоны отличается характерным игольчатым строением, т.е. является видманштеттовым. Причиной образования видманштеттова феррита является перегрев поверхностного слоя стали, непосредственно контактирующего с формируемым при оплавлении порошка покрытием. Учитывая, что температура в зоне была выше, чем в зонах 3,4 и 5, размер аустенитного зерна в ней был максимальным. По сетке выделений феррита можно реконструировать бывшую аустенитную структуру стали. Размер аустенитного зерна в этой зоне изменяется от ~ 220 мкм до ~ 100 мкм. Максимальная длина кристаллов видманштеттова феррита примерно соответствует этим размерам.

Грубозернистое строение зоны 2, наличие в ней видманштеттова феррита являются причинами, объясняющими повышенную хрупкость стали. С позиции повышения конструктивной прочности сталей с защитными покрытиями, нанесенными методом электронно-лучевого оплавления порошка, имеет смысл каким-либо образом устранить вредное влияние зоны 2. При выполнении данной работы проводились исследования по выбору режимов оплавления, обеспечивающих уменьшение толщины зоны, в которой образуется феррит видманштеттова типа. Технологическими факторами, способствующими решению данной проблемы, являются снижение температуры нагрева материала и уменьшение времени выдержки материала при высоких температурах. В ре

зультате проведенных исследований было установлено, что полностью устранить образование феррита видманштеттова типа при оплавлении порошков на углеродистых сталях практически невозможно.

### Выводы

1. В процессе вневакуумного электронно-лучевого оплавления порошков на поверхности сталей образуется легированный слой толщиной до 2,5 мм. Ниже этого слоя располагается зона термического влияния, в пределах которой происходит полное или частичное изменение исходной структуры материала. Температура стали в зоне термического влияния изменяется от критической точки  $A_{c1}$  до температуры плавления. Толщина этой зоны примерно в 2 раза больше толщины легированного слоя.

2. При оплавлении порошков на сталях с исходной феррито-перлитной структурой в зоне термического влияния формируется сложная структура. В слоях, нагретых до температур, соответствующих межкритической области  $A_{c2}A_{c3}$ , образуется феррито-перлитная структура с размерами перлитных конгломератов, равными несколько микрометров (- 2,5 мкм). Существенного измельчения зерен феррита при этих температурах не происходит.

3. Наиболее благоприятная, мелкодисперсная, однородная феррито-перлитная структура, обеспечивающая высокий уровень механических свойств, формируется в зоне, соответствующей низким температурам нагрева материала в аустенитной области. В сталях 30 и 45 размер ферритных зерен в этой зоне равен ~ 5 мкм, размер перлитных конгломератов ~ 4 мкм.

4. Зона, непосредственно примыкающая к оплавленному покрытию, имеет сугубо неблагоприятное строение (феррит видманштеттова типа в сочетании с псевдоперлитом). Грубая феррито-перлитная структура с ферритом видманштеттова типа, образующаяся в результате нагрева до температур, близких к температуре плавления стали, обеспечивает наиболее низкий уровень ударной вязкости материала. Снижению толщины этой зоны способствует увеличение толщины упрочняемого изделия и уменьшение времени воздействия электронного луча на поверхность материала.