

УДК 621.791.75.042

Бережная Е. В., Черномаз В. Н., Малыгина С. В., Лысак В. К., Куценберг Н. С.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

Подвижные станины рабочей клетки станов прокатки труб относятся к наиболее нагруженным деталям. Применяются в основном станины закрытого типа, представляющие собой массивную раму с двумя мощными поясами, которые воспринимают вертикальные усилия прокатки, с окнами для установки валков и нажимных устройств. В процессе работы станины подвержены воздействию циклических нагрузок. При этом в верхней части окна станины в сечении, ослабленном отверстием под нажимные винты, чаще всего образуются трещины, препятствующие дальнейшей нормальной эксплуатации агрегата. Характер и формы дефектов позволяют эффективно использовать ремонтную сварку [1], не превращая в металлолом дорогостоящие и сложные в изготовлении детали.

Однако при выполнении сварочных работ открытой дугой значительное количество расплавленных электродных брызг попадают на поверхность основного металла. Участки металла, поврежденные брызгами, являются, как правило, областью, в которой, прежде всего, возникает усталостное разрушение металла изделия. Оно в дальнейшем быстро охватывает обширные поверхности неповрежденных брызгами объемов металла. Причиной низкой усталостной прочности участков металла, поврежденных электродными каплями, являются местные внутренние напряжения, которые возникают в ограниченных объемах металла на тех участках поверхности сварного изделия, где упала капля, и резкое повышение твердости металла на этих участках в точке соприкосновения расплавленной капли с поверхностью металла изделия. Высокая скорость охлаждения металла в месте падения капли вызывает повышение его твердости. Это относится как к высокому, так и к низколегированным сталям. В результате снижения пластичности металла при работе изделия под нагрузкой в месте падения капли образуются микротрещины.

Рациональным способом повышения усталостной прочности изделий является предварительное нанесение на свариваемые поверхности специальных защитных покрытий [2]. При сварке на форсированных режимах возможен пробой покрытия [3]. Приваривание брызг в этом случае является результатом взаимодействия составляющих системы «капля – защитное покрытие – основной металл свариваемого изделия». Изучение этих контактных зон требует определенной трансформации ряда научных положений, разработанных смежными науками, а также привлечения совместных приборов и методик, должной математической обработки.

Цель работы – оценить максимальную температуру нагрева защитного покрытия в его наиболее термически нагруженных участках – вблизи границы сплавления основного металла со швом.

Для случая нагрева поверхности полубесконечного тела (т. е. пластины большой толщины) сосредоточенным точечным источником тепла постоянной мощности, движущимся прямолинейно по поверхности пластины с постоянной скоростью, когда теплофизические свойства свариваемого металла принимаются независимыми от температуры, максимальная температура, передаваемая защитному покрытию, может быть выражена уравнением:

$$\frac{1}{T_r - T_0} = \frac{\rho C_p \pi r^2}{q/V}, \quad (1)$$

где T_0 и T_r – начальная и максимальная температура в точке, расположенной на расстоянии r от источника тепла, соответственно;

ρ – удельный вес металла пластины;

C_p – удельная теплоемкость металла пластины;

V – скорость сварки;

q – тепловая мощность дуги.

Это уравнение позволяет приближенно определять максимальную температуру нагрева защитного покрытия от основного металла при дуговой сварке в точках, расположенных на различных расстояниях от источника тепла. Точный расчет температуры невозможен вследствие выше названных допущений, главное из которых состоит в том, что источник тепла принимается в виде точечного. Из уравнения (1) видно, что при $r = 0$ максимальная температура будет бесконечно большой. Расчет упрощается, если известна максимальная температура характерной точки (этой точкой может служить граница сплавления, в которой температура близка к температуре плавления металла) сварного соединения:

$$\frac{1}{T_r - T_0} = \left[\frac{\rho C_p \pi (r^2 - \bar{r}^2)}{q/V} + \frac{1}{\bar{T} - T_0} \right], \quad (2)$$

где r – расстояние от центральной линии шва до точки полубесконечного тела, в которой известна максимальная температура \bar{T} .

Центральная линия шва принимается как проходящая по верхней поверхности толстой пластины. При рассмотрении влияния граничной поверхности принимается условие, что эти поверхности (нижняя поверхность толстой пластины и поверхности кромок) адиабатические. Это допущение не оказывает существенного влияния на точность расчета, если он осуществляется для точек, расположенных вблизи сварного шва (на расстоянии от оси шва, равном одной толщине).

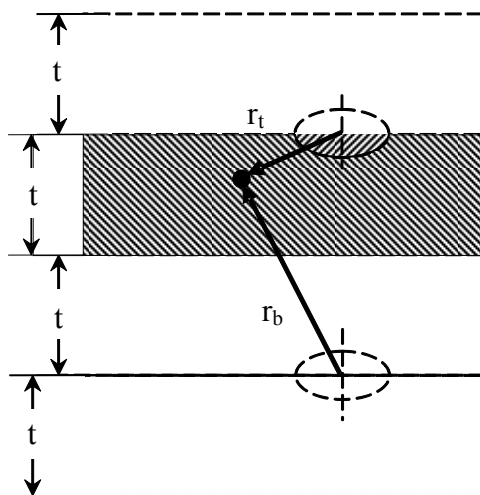


Рис. 1. Схема источников тепла при наплавке валика на пластину вблизи кромок

Если валик наплавляется вдали от боковых кромок пластины, а толщина пластины достаточно тонка, чтобы нижняя поверхность ее подвергалась существенному тепловому воздействию, в этом случае схематично можно представить, что на рассматриваемую в пластине конечной толщины точку воздействует источник тепла, равный удвоенному значению погонной энергии дуги, действующей на бесконечное тело (рис. 1).

Адиабатические поверхности изображены пунктирными линиями. Эти воображаемые поверхности представляют собой отражения действительной поверхности, симметрично расположенные по отношению к источнику тепла. При рассмотрении максимальной температуры в данной точке только ближайший источник тепла оказывает существенной воздействие на точку, так как интенсивность распространения тепла от источника обратно пропорциональна квадрату расстояния рассматриваемой точки от источника тепла.

Когда источник тепла расположен достаточно далеко от кромок, максимальная температура на нижней поверхности пластины с нанесенным защитным покрытием может быть определена из следующего уравнения:

$$\frac{1}{T_4 - T_0} = \left[\frac{\rho C_p \pi (y_4^2 + t^2 - \bar{r}^2)}{q/V} + \frac{0,5}{T - T_0} \right], \quad (3)$$

где T_4 – максимальная температура в точке 4 на нижней поверхности пластин (рис. 2);
 $(y_4^2 + t)^2$ – радиальное расстояние от центральной линии шва до точки 4;
 t – толщина пластины.

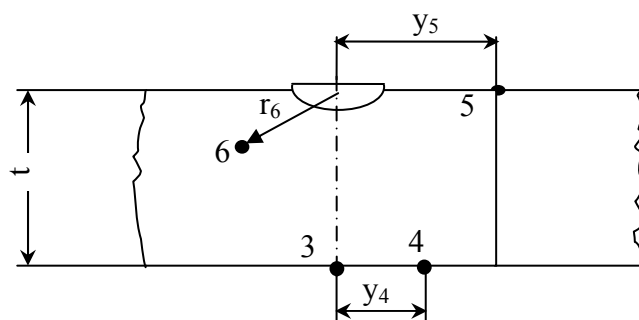


Рис. 2. Схема дуговой наплавки валика на пластину вдали от кромок

При сравнении уравнений (2) и (3) видно, что максимальная температура в точке 4 пластины конечной толщины в два раза выше, чем в той же точке полубесконечного тела. Таким образом, при рассмотрении пластины ограниченной толщины на данную точку как бы воздействуют два одинаковых источника тепла. Два других источника тепла вследствие значительного удаления боковых кромок от места сварки не оказывают существенного влияния на температуру рассматриваемой точки. Уравнение (3) может быть использовано для определения максимальной температуры в точках, расположенных ниже верхней поверхности пластины конечной толщины.

Второй характерный случай – это температура в точке, расположенной на верхней поверхности пластины конечной толщины. В этом случае максимальная температура, передаваемая защитному покрытию, может быть получена из следующего уравнения:

$$\frac{1}{T_5 - T_0} = \left[\frac{\rho C_p \pi (y_5^2 - r^2)}{q/V} + \frac{1}{T - T_0} \right], \quad (4)$$

где T_5 – максимальная температура в точке 5 (см. рис. 2);
 y_5 – расстояние точки 5 от центральной линии шва.

Уравнение (4) идентично уравнению (2), так как в этом случае на точку 5 действует только один источник тепла.

Для определения максимальной температуры в точке, расположенной на кромке пластины (в случае, когда источник тепла расположен вблизи кромки), может быть применено следующее уравнение:

$$\frac{1}{T_1 - T_0} = \frac{1}{(1 + e^{-n_1})} \left[\frac{\rho C_p \pi (z_1^2 + y_s^2 + r^2)}{q/V} + \frac{0,5}{T - T_0} \right], \quad (5)$$

где z_1 и y_s – расстояния, показанные на рис. 3;
 $(z_1^2 + y_s^2)$ – расстояние точки 1 от центральной линии шва.

$$n_1 = \left(\frac{r_b}{r_t} \right)^2 - 1 = 4t \left[\frac{t - z_1}{y_s^2 + z_1^2} \right], \quad (6)$$

где r_b и r_t – расстояния, показанные на рис. 4.

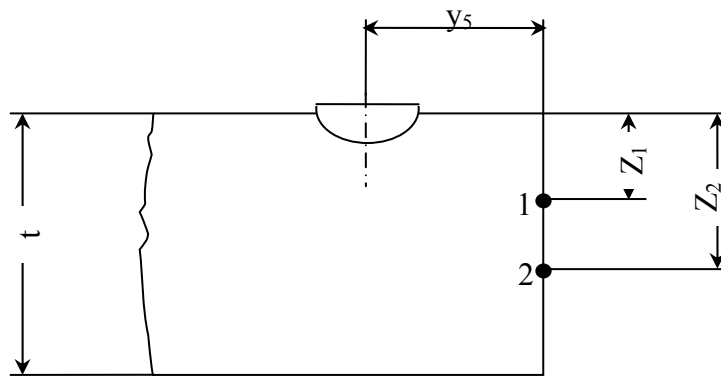


Рис. 3. Схема дуговой наплавки валика параллельно близлежащей кромке

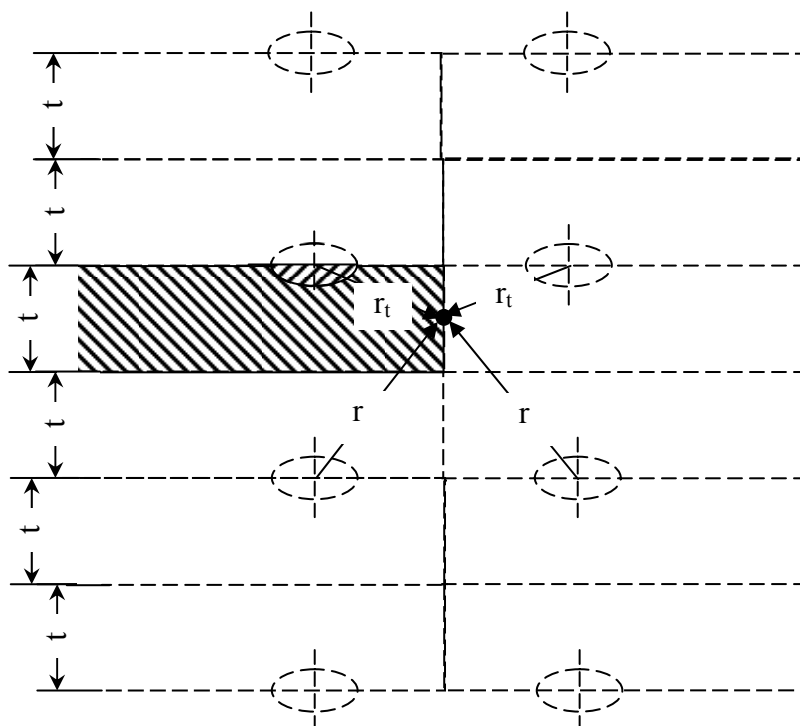


Рис. 4. Схема источников тепла при наплавке валика параллельно близлежащей кромке

Уравнение (5) является более полным, так как на точку 1 как бы действуют одновременно четыре источника тепла. Экспонента в уравнении (5) указывает, что все источники тепла расположены на разных расстояниях от рассматриваемой точки.

Если рассматриваемая на кромке точка будет приближаться к верхней поверхности пластины, экспонента будет стремиться к нулю; при приближении этой же точки к нижней поверхности пластины экспонента будет стремиться к 1.

Результаты расчетов по уравнениям (3)–(5) хорошо согласуются с данными опыта при измерении температуры на поверхности защитного покрытия с помощью термопар. Удовлетворительные результаты расчетов получаются в том случае, если расстояния y_4 , y_5 и y_s меньше толщин пластины t . Если эти расстояния больше толщины пластины, то точность расчета снижается. Для расстояния более $1,5t$ от источника тепла (измерения в направлении y) будет преобладать двухмерный тепловой поток, поэтому в этом случае для расчетов следует использовать уравнения (7) и (8):

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\rho C_p y_m t}{q/V} + \frac{1}{T_m - T_0}, \quad (7)$$

где T_p – максимальная температура в точке, расположенной на расстоянии y_m от границы сплавления;

T_m – температура плавления металла.

В общем виде это уравнение будет иметь следующий вид:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\rho C_p (y - \bar{y}) t}{q/V} + \frac{1}{\bar{T} - T_0}, \quad (8)$$

где y – расстояние от центральной оси шва до точки, в которой максимальная температура достигает значения T_p ;

\bar{y} – расстояние от центральной оси шва до точки, в которой максимальная температура известна и равна T .

Для практического использования уравнения (8) необходимо знать максимальную температуру в характерной точке сварного соединения. Тогда уравнение (8) заменяется уравнением (7). Проверка точности выбора характерной точки может быть осуществлена путем химического травления макрошлифов, вырезанных из сварного соединения.

Для определения максимальной температуры точки защитного покрытия вблизи сварного валика (см. точку 6 на рис. 2), удаленной от кромок на большое расстояние, может быть использовано следующее уравнение:

$$\frac{1}{T_6 - T_0} = \frac{1}{(1 + e^{-n_6})} \left[\frac{\rho C_p \pi (r_6^2 - r^{-2})}{q/V} + \frac{1}{\bar{T} - T_0} \right], \quad (9)$$

где T_6 – максимальная температура в точке 6 (см. рис. 2), радиус-вектор которой относительно центральной линии шва равен:

$$n_6 = \left(\frac{r_b}{r_t} \right)_6^2 - 1, \quad (10)$$

где r_b и r_t – определяются из рис. 1 (в нашем случае $r_t = r_6$).

Когда толщина пластины становится очень большой по сравнению с r_6 , то экспонента в уравнении (8) будет близка к нулю и уравнение (8) превратится в уравнение (1).

При сравнении максимальных температур на верхней и нижней поверхностях пластины с нанесенным защитным покрытием в точке 3 и в точке 4 (см. рис. 2) установлено, что максимальные температуры в этих точках имеют следующее соотношения:

$$\frac{1}{T_4 - T_0} - \frac{1}{T_3 - T_0} = \rho C_p \pi \frac{V}{q} y_4^2. \quad (11)$$

Сравнение результатов расчета и опытов показало, что расчет позволяет определить значения максимальных температур с точностью не менее 5 %.

Исследование влияния повреждения участка поверхности металла расплавленной каплей проводилось следующим образом. Образец из СтЗкп размером $165 \times 60 \times 10$ устанавливался в приспособление, точно фиксирующее его положение. Производилось расплавление электродной проволоки до образования и падения капли на поверхность образца. Исследовалась партия образцов, установленная в приспособление параллельно друг другу. После падения капли приспособление перемещалось и капля попадала на следующий образец. После наплавки каплей на одну плоскость образца приспособление поворачивали на 180° , и капли аналогичным образом наносились на противоположную поверхность образца. После наплавки образцы снимались с установки, и приварившиеся капли удалялись посредством сбивания. Исследование большинства образцов проводили на испытательной машине для плоского изгиба и кручения при частоте нагружения 300 мин^{-1} , а часть образцов, нагруженных наибольшей нагрузкой – с частотой 1500 мин^{-1} . В качестве критерия принималось количество циклов нагружения, при котором наступало разрушение образца.

При разработке высокоэффективного защитного покрытия применялись также и другие методики экспериментальных исследований. Так предварительные эксперименты показали, что эксплуатационные и технологические свойства покрытий зависят от способности суспензии образовывать равномерные, без подтеков и залысин слои определенной толщины. Для качественного определения сплошности покрытия по металлу на испытуемую поверхность с защитным покрытием накладывали фильтровальную бумагу, смоченную водным раствором, содержащим железисто-синеродистый калий (40 г/л) и хлористый натрий (15 г/л). При наличии пор, несплошностей и других дефектов покрытия через 2–3 мин появляется синее окрашивание (берлинская лазурь).

Полученные результаты являются теоретическими предпосылками для разработки статистически прогнозируемого и научно обоснованного метода создания защитного покрытия, позволяющего уменьшить загрязнение сварных узлов брызгонесущей средой в наиболее уязвимых зонах их вероятного поражения от контактного соударения с расплавленными каплями ($T = 2500\text{--}2800^\circ\text{C}$).

ВЫВОДЫ

Распределение максимальных температур с достаточной точностью определяется аналитическим путем для точек, расположенных в зоне контакта «защитное покрытие – основной металл». На скорость нагрева – охлаждения нанесенного защитного покрытия существенное влияние оказывает температура предварительного подогрева изделия и взаимное расположение швов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман С. И. Устранение дефектов электросваркой / С. И. Герман. – Харьков : Прапор, 1969. – 70 с.
2. Малыгина С. В. Разработка покрытий для защиты поверхностей от налипания брызг расплавленного металла / С. В. Малыгина // Материалы междунар. научн.-техн. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». – Харьков : ХАИ, 2003. – С. 175–177.
3. Чигарев В. В. Влияние защитных покрытий на параметры режима сварки в углекислом газе / В. В. Чигарев, С. В. Малыгина // Зб. наук. праць Кіровоградського держтехуніверситету. – Кіровоград : КДТУ, 2003. – Вип. 12. – С. 134–140.