

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ НА ОБРАЗОВАНИЕ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНОГО ШВА

В.С. Рыбин, В.Д. Квашнин

Работа посвящена оценке возможности современных инженерных компьютерных технологий для оперативной численной оценки параметров сварочного процесса, влияющих на образование холодных трещин в зоне термического влияния (ЗТВ). Холодные трещины являются типичным дефектом сварных соединений среднелегированных и высоколегированных сталей. Широкое распространение компьютерных средств позволяет применять вычислительные возможности MathCAD для решения технологических вопросов на основе классической модели тепловых сварочных процессов.

Установлено, что наибольшие значения мгновенной скорости охлаждения в зоне термического влияния возникают на границе оплавления, причем по мере снижения погонной энергии происходит увеличение мгновенных скоростей охлаждения. Поэтому образование холодных трещин (отрывов) между швом и ЗТВ обусловлено в значительной степени образованием закалочных структур.

При увеличении погонной энергии в 10 раз ширина зоны оплавления возрастает примерно в 3 раза, а мгновенная скорость охлаждения снижается на порядок, что позволяет предотвращать образование холодных трещин путем выбора режимов с увеличенной погонной энергией.

Увеличение погонной энергии режима сварки в 10 раз ведет к десятикратному увеличению продолжительности и трехкратному увеличению ширины зоны перегрева, что снижает прочностные характеристики металла и потому ограничивает возможности регулирования погонной энергии для снижения величины мгновенной скорости охлаждения.

На периферии ЗТВ, где максимальная температура не превышала 150 °С, низкие мгновенные скорости охлаждения не могут явиться причиной образования закалочных структур, поэтому основными причинами образования холодных трещин в указанной зоне являются остаточные сварочные напряжения или диффундирующий водород.

При разных значениях погонной энергии наблюдаются устойчивые соотношения радиус-векторов с соответствующими им изотермами, что может быть использовано на практике для оценки размеров ЗТВ в зависимости от ширины сварного шва.

Использование вычислительных возможностей MathCAD позволяет в оперативном порядке оптимизировать режим сварки с тем, чтобы предотвратить образование холодных трещин и исключить перегрев металла в зоне термического влияния.

Ключевые слова: холодные трещины, закалочные структуры, погонная энергия, математический пакет MathCAD, термический цикл, мгновенная скорость охлаждения, перегрев металла, оптимизация режима сварки.

Холодные трещины являются типичным дефектом сварных соединений среднелегированных и высоколегированных сталей. Продольные трещины, залегающие в зоне сплавления шва с основным металлом (отрывы) и расположенные в зоне термического влияния (отколы), являются наиболее распространенными разновидностями холодных трещин.

Согласно выполненным ранее исследованиям [1, 2] к числу основных факторов, ведущих к образованию холодных трещин, относятся в том числе и закалочные явления, следствием которых является возникновение хрупкой мартенситной структуры и сложного напряженного состояния, обусловленного суммированием структурных и остаточных сварочных напряжений. Для большинства конструкционных сталей, при сварке которых наблюдается образование холодных трещин, структурные превращения в зоне термического влияния (ЗТВ) начинаются при температурах ниже точки A_1 , интенсивно развиваются при температуре 500...550 °С и заканчиваются в основном при охлаждении до температур порядка 150 °С.

Для предотвращения образования холодных трещин в металле сварного шва и ЗТВ рекомендованы [3] в том числе режимы сварки с повышенной погонной энергией до максимально допустимого значения (при условии качественного формирования шва с размерами, соответствующими стандартам), что позволяет снизить скорость охлаждения при температуре наименьшей устойчивости аустенита и тем самым предотвратить образование закалочных структур. Однако при этом следует учитывать, что повышение погонной энергии увеличивает продолжительность пребывания металла при температурах выше 1000 °С и, соответственно, способствует росту аустенитного зерна, что ведет в конечном итоге к возникновению закалочных структур, опасных образованием холодных трещин.

Оптимизация режимов сварки требует применения расчетной оценки, которая может быть выполнена с использованием метода конечных элементов, что требует значительных трудозатрат, или на основе упрощенных аналитических подходов в соответствии с классической теорией рас-

пространения теплоты при сварке [3]. Использование вышеуказанных расчетных моделей требует применения компьютерных технологий, доступ к которым на этапе разработки классической теории был весьма ограничен. Поэтому результаты классической теории распространения тепла при сварке были представлены в виде таблиц, номограмм и т. п., что существенно затрудняет их использование в инженерных расчетах.

Имеющиеся в настоящее время в распоряжении инженеров компьютерные средства позволяют оперативно выполнить более точный прогноз и принять оптимальные решения, учитывающие не только процессы трещинообразования, но и нежелательный рост зерна в зоне термического влияния.

Целью представленной работы является проверка возможности применения современных инженерных компьютерных технологий для оперативной инженерной оценки влияния погонной энергии сварочного процесса на образование холодных трещин в зоне термического влияния.

Определение характеристик термических циклов – максимальной температуры, мгновенной скорости охлаждения при различных температурах, длительности пребывания металла выше заданной температуры или в определенном температурном диапазоне путем анализа температурных полей целесообразно выполнять с помощью математического пакета MathCAD.

Во многих случаях оказывается достаточным приближенное определение скорости охлаждения с использованием теории мощных быстро движущихся источников теплоты без учета теплоотдачи, что позволяет в целом упростить задачу при несущественном снижении точности результата. При наличии вычислительных возможностей MathCAD оценку параметров температурного цикла целесообразно выполнить не только по оси шва [1, 2], но и для всей зоны термического влияния.

В выполненной работе температуры точек шва и зоны термического влияния при наплавке валика на массивное тело или однопроходной сварке пластин встык определены из формул для быстро движущихся источников. В известном уравнении температурного поля из [1] отношение тепловой мощности к скорости движения заменено значением погонной энергии q_n , и оно включено дополнительно в состав аргументов.

$$T(r, t, q_n) = \frac{q_n}{2\pi\lambda t} e^{-\frac{r^2}{4at}} + T_0, \quad (1)$$

где T – температура металла в заданной точке; r – радиус-вектор заданной точки; t – время; T_0 – начальная температура металла; q_n – погонная энергия сварки; λ и a – соответственно коэффициенты теплопроводности и температуропроводности металла.

Функция мгновенной скорости охлаждения определена как производная уравнения (1) по вре-

мени, причем преобразования могут быть выполнены как с применением правил дифференцирования, так и с использованием возможностей символического вычисления программного обеспечения MathCAD. В общем случае мгновенная скорость охлаждения определена как

$$\begin{aligned} \omega(r, t, q_n) &= \frac{d}{dt} T(r, t, q_n) = \frac{q_n e^{-\frac{r^2}{4at}}}{2\pi\lambda t^2} \left(1 - \frac{r^2}{4at} \right) = \\ &= T(r, t, q_n) \left[\frac{1}{t} \left(1 - \frac{r^2}{4at} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

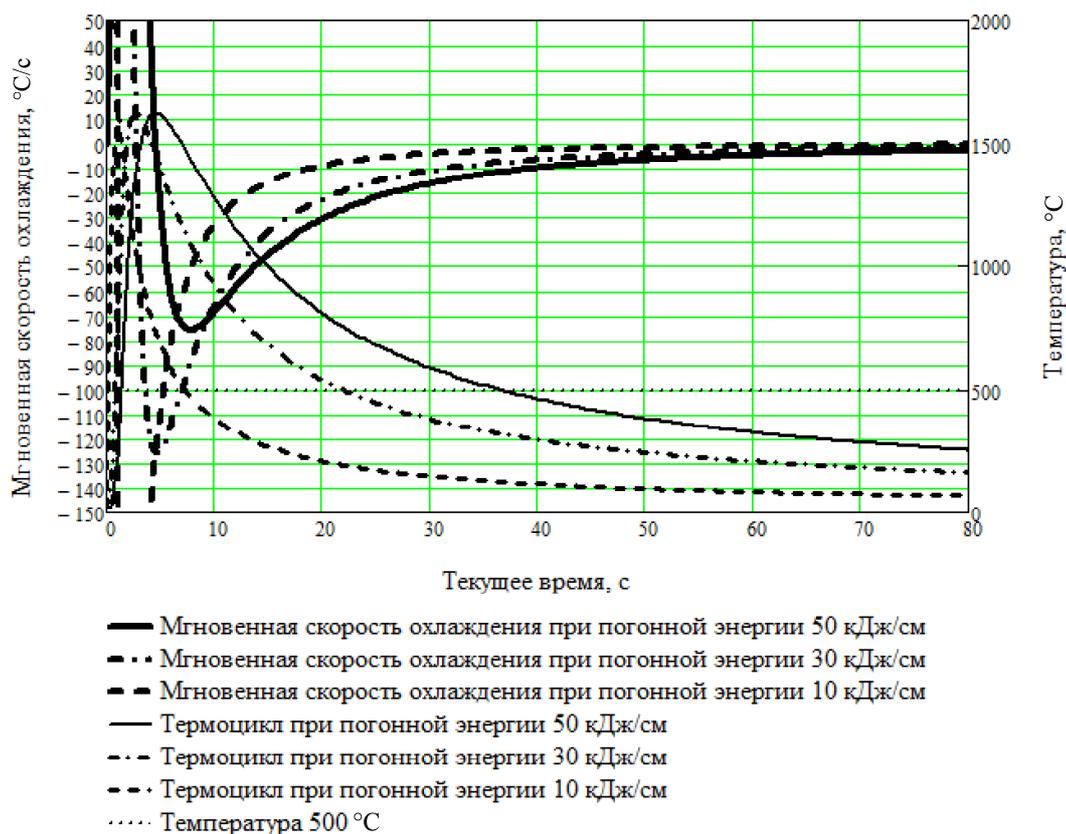
Радиус-вектор и время достижения границы оплавления, а также границы с температурой нагрева до 150 °С определены с использованием формул максимальных температур [1] для произвольной точки. Время снижения температуры в заданных точках до значений, соответствующих наименьшей устойчивости аустенита (500 °С), определены с использованием встроенной в MathCAD функции «root». Например, для границы оплавления r_{1500} и погонной энергии 50 кДж/см время снижения температуры до 500 °С составит 36,6 с.

$$t = \text{root} \left[T(r_{1500}, t, 5000) - 500, t, 3, 50 \right] = 36,6. \quad (3)$$

Значения мгновенной скорости охлаждения для произвольных значений радиуса-вектора, времени и погонной энергии определены из (2).

На рисунке представлены термические циклы и скорости охлаждения точек как функция радиуса-вектора при различных значениях погонной энергии и текущего времени. Значения температуры металла свыше 1500 °С (температуры плавления стали) в расчете не учитываются, поскольку модель не учитывает фазовых превращений. Начальная температура металла принята равной 20 °С. Для расчетов выбран достаточно широкий диапазон значений погонной энергии (5...50 кДж/см) с тем, чтобы оценить влияние указанного фактора на мгновенную скорость охлаждения.

Кривые мгновенных скоростей охлаждения в период теплонасыщения изделия имеют характерный минимум с отрицательными значениями, после которого следует монотонное возрастание до выравнивания температурного поля основного металла, после чего скорость охлаждения становится равной нулю. Монотонный рост величины мгновенной скорости охлаждения на стадии охлаждения, характерный для всех режимов в рассматриваемом диапазоне погонной энергии, позволяет утверждать, что в исследуемой области ЗТВ наибольшие значения скорости приходятся на границу оплавления, которая является наиболее опасным участком с точки зрения образования закалочных структур. Это подтверждается частотой возникновения характерного дефекта (отрыва), располагаемого на границе шва. Поэтому в дальнейшем были определены мгновенные скорости на границе оплавления в диапазоне температур, близких 500 °С.



Термические циклы и скорости охлаждения в ЗТВ

Согласно выполненным расчетам при увеличении погонной энергии в 10 раз ширина зоны оплавления возрастает примерно в 3 раза, а мгновенная скорость охлаждения снижается на порядок. Таким образом, изменение погонной энергии является существенным фактором, позволяющим предотвратить возникновение холодных трещин по причине образования закалочных структур в околошовной зоне.

Вместе с тем сопоставление графиков термических циклов при различных значениях погонной энергии наглядно демонстрирует недостаток избыточной тепловой мощности: по мере ее увеличения заметно возрастают размеры зоны перегрева, а также продолжительность и температура перегрева, при которых происходит рост зерна, и,

соответственно, снижаются прочностные показатели металла. Увеличение ширины зоны перегрева и продолжительности пребывания металла при температурах более 1000 °C представлены в табл. 1. Из результатов расчета следует, что увеличение погонной энергии режима сварки ведет к пропорциональному росту продолжительности пребывания металла при температурах перегрева, а ширина зоны перегрева увеличивается в степени, примерно равной 0,4...0,5.

В связи с тем, что в [1] отмечена вероятность появления холодных трещин при охлаждении до температур порядка 150 °C, выполнена оценка влияния величины погонной энергии на мгновенную скорость охлаждения при указанной температуре (табл. 2).

Таблица 1

Расчетные параметры температурного цикла для границы с температурой 500 °C в зависимости от величины погонной энергии

Погонная энергия, кДж/см	Радиус-вектор зоны оплавления, см	Текущее время достижения температуры 500 °C, с	Мгновенная скорость охлаждения на границе оплавления при температуре 500 °C, °C/c	Продолжительность периода перегрева, с	Ширина зоны перегрева, см
5	0,39	0,46	-114,83	2,03	1,00
10	0,56	0,91	-57,42	4,06	1,42
20	0,79	1,82	-28,71	8,12	2,01
30	0,96	2,74	-19,14	12,18	2,47
40	1,11	3,65	-14,35	16,24	2,85
50	1,25	4,56	-11,48	20,3	3,19

Таблица 2

Расчетные параметры температурного цикла для границы оплавления при температуре 150 °С в зависимости от величины погонной энергии

Погонная энергия, кДж/см	Радиус-вектор зоны оплавления, см	Текущее время, с	Мгновенная скорость охлаждения, °С/с
5	0,39	14,84	-8,49
10	0,56	29,68	-4,24
20	0,79	59,36	-2,12
30	0,96	89,04	-1,41
40	1,11	118,72	-1,06
50	1,25	148,4	-0,85

Таблица 3

Расчетные параметры температурного цикла для периферийного участка ЗТВ в зависимости от величины погонной энергии

Погонная энергия, кДж/см	Радиус-вектор границы, см	Текущее время, с	Мгновенная скорость охлаждения, °С/с
5	1,33	5,2	-0
10	1,88	10,4	-0
20	2,66	20,8	-0
30	3,26	31,2	-0
40	3,76	41,5	-0
50	4,2	51,9	+0

Согласно выполненным расчетам при температуре 150 °С мгновенные скорости охлаждения на границе оплавления существенно снизились, и лишь при самой малой погонной энергии скорость охлаждения составляет -8,49 °С/с, что может представлять опасность для некоторых трещиночувствительных сталей.

Для получения наиболее полной картины влияния погонной энергии на параметры температурного цикла аналогичный расчет выполнен для периферийного участка ЗТВ, для которого максимальный нагрев составляет 150 °С (табл. 3).

Согласно результатам расчетов температурное поле основного металла близко к выравниванию, и потому мгновенные скорости охлаждения близки к нулю. Это означает, что образование холодных трещин в ЗТВ, нагреваемой до температуры 150 °С, обусловлено иными причинами: остаточными сварочными напряжениями или диффундирующим водородом.

Интересно отметить подобие параметров температурных циклов точек при различных значениях погонной энергии:

– отношение радиусов-векторов для точек с максимальными температурами, в частности, с температурой 150 и 1500 °С имеет устойчивый характер: $r_{150}/r_{1500} = 3,4$;

– отношение погонной энергии к текущему времени наступления максимальной температуры 1500 °С: $q_n/t_{1500} = 10,9$ кДж/см·с;

– отношение погонной энергии к текущему времени наступления максимальной температуры 500 °С: $q_n/t_{500} = 1,37$ кДж/см·с;

– отношение погонной энергии к текущему времени наступления максимальной температуры 150 °С: $q_n/t_{150} = 0,96$ кДж/см·с и т. п.

Поскольку классическая теория теплопередачи не учитывает размера электродов, рода и полярности тока и т. п., то представленные соотношения, безусловно, носят ориентировочный характер. Тем не менее, при идентичных условиях они позволяют прогнозировать размеры ЗТВ с учетом известных размеров сварочного шва. Поэтому по мере необходимости указанные соотношения могут быть использованы в расчетных схемах, пригодных для использования в производственных условиях.

Широкое распространение компьютерных средств позволяет применять вычислительные возможности MathCAD для решения технологических вопросов на основе классической модели тепловых сварочных процессов [3] и в соответствии с рекомендациями [4] оптимизировать режим сварки с тем, чтобы предотвратить образование холодных трещин и исключить перегрев металла в зоне термического влияния.

Выводы

1. Вычислительные возможности MathCAD позволяют прогнозировать значения мгновенных скоростей охлаждения в ЗТВ при произвольном сочетании параметров режима сварки.

2. Установлено, что наибольшие значения мгновенной скорости охлаждения в зоне термического влияния возникают на границе оплавления, причем более интенсивное снижение ее к перифе-

рии наблюдается на режимах сварки с низкой погонной энергией. Поэтому образование холодных трещин (отрывов) между швом и ЗТВ обусловлено в значительной степени образованием закалочных структур.

3. При увеличении погонной энергии в 10 раз ширина зоны оплавления возрастает примерно в 3 раза, а мгновенная скорость охлаждения снижается на порядок, что позволяет предотвращать образование холодных трещин за счет корректирования режима сварки путем увеличения погонной энергии.

4. Увеличение погонной энергии режима сварки в 10 раз ведет к десятикратному увеличению продолжительности и трехкратному увеличению ширины зоны перегрева, что ограничивает возможности использования погонной энергии для снижения величины мгновенной скорости охлаждения.

5. На периферии ЗТВ, где максимальная температура не превышала 150 °С, низкие мгновенные скорости охлаждения не могут явиться причиной образования закалочных структур, поэтому

основными причинами образования холодных трещин являются остаточные сварочные напряжения или диффундирующий водород.

6. При разных значениях погонной энергии наблюдаются устойчивые соотношения радиусов-векторов с соответствующими им изотермами, что может быть использовано на практике для оценки удаления изотерм от границы сварного шва.

Литература

1. Рыкалин, Н.Н. *Расчеты тепловых процессов при сварке* / Н.Н. Рыкалин. – М.: Машиз, 1951. – 296 с.

2. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением* / под ред. акад. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.

3. *Теория сварочных процессов: учеб. для вузов* / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров и др.; под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.: ил.

4. Шоршоров, М.Х. *Металловедение сварки стали и сплавов титана* / М.Х. Шоршоров. – М.: Наука, 1965. – 336 с.

Рыбин Владимир Семенович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); vsrybin@gmail.com.

Квашнин Владимир Дмитриевич, студент кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); kvashnin.vovochka1993@mail.ru.

Поступила в редакцию 1 октября 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Metallurgy"
2014, vol. 14, no. 4, pp. 60–65**

ESTIMATED EFFECT OF HEAT INPUT ON FORMATION OF COLD CRACKS IN HEAT-AFFECTED ZONE OF WELD

V.S. Rybin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, vsrybin@gmail.com,

V.D. Kvashnin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, kvashnin.vovochka1993@mail.ru

The possibilities of modern computer technologies to efficiently calculate the parameters of the welding process that influence the formation of cold cracks in the heat affected zone were studied. Cold cracks are typical defects of the welds in medium and high-alloy steels. MathCAD software can be used to solve technological problems on the basis of the classical model of thermal welding processes.

It is found that the highest values of the instantaneous cooling rate in the heat-affected zone are on the melting boundary. When heat input decreases, instantaneous cooling rates increase. Therefore, the formation of cold cracks between the weld and HAZ is largely due to the formation of hardening structures.

If the heat input increases tenfold, the width of the melting zone increases about three times, but the instantaneous cooling rate reduces in order to prevent the formation of cold cracks by selecting modes with the increased heat input.

The tenfold increase of the heat input of the welding mode leads to a tenfold increase in time and to the three times increase of the width of the overheating zone. This reduces the strength characteristics of the metal and, therefore, limits the possibility of regulating heat input to reduce the magnitude of the instantaneous cooling rate.

On the HAZ periphery, where the maximum temperature does not exceed 150 °C, low instantaneous cooling rates can not be the cause of hardening structures appearance. So, the main reasons for the formation of cold cracks in this area are residual welding stresses or diffusible hydrogen.

With different values of heat energy a sustainable ratio of radius-vectors with the corresponding isotherms is observed. This can be used in practice to estimate the size of the HAZ depending on the width of the weld.

The use of the MathCAD software allows to quickly optimize the welding mode in order to prevent the formation of cold cracks and avoid overheating of the metal in the heat affected zone.

Keywords: cold cracks, hardening structures, heat input, mathematical package "MathCAD", thermal cycle, the instantaneous speed of cooling, overheating of the metal, optimization of welding conditions.

References

1. Rykalin N.N. *Raschety teplovykh protsessov pri svarke* [Calculations of Thermal Processes in Welding]. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 296 p.
2. *Tekhnologiya elektricheskoy svarki metallov i splavov plavleniem* [The Technology of Electric Welding of Metals and Alloys by Melting]. Ed. by B.E.Paton. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 768 p.
3. Konovalov A.V., Kurkin A.S., Makarov E.L., Nerovnyy V.M. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of Welding Processes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 752 p.
4. Shorshorov M.Kh. *Metallovedenie svarki stali i splavov titana* [Physical Metallurgy of Welding Steel and Titanium Alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 336 p.

Received 1 October 2014