

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

СВАРКА И УПРОЧНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

*Методические рекомендации к самостоятельной работе
для студентов специальности
1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного
производства»
заочной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.7
ББК 34.6
С24

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного
производства» «12» января 2023 г., протокол № 8

Составитель канд. техн. наук, доц. А. Г. Лупачев

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Методические рекомендации к самостоятельной работе для студентов
специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного
производства» заочной формы обучения.

Учебное издание

СВАРКА И УПРОЧНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать 10.04.2023 . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,70 . Уч.-изд. л. 0,56 . Тираж 26 экз. Заказ № 433.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Введение.....	4
1 Общие сведения.....	5
2 Индивидуальное задание.....	6
3 Методические указания по выполнению самостоятельной работы	7
3.1 Расчет скорости охлаждения при действии мощного быстродвижущегося источника на поверхности полубесконечного тела	7
3.2 Расчет скорости охлаждения при действии линейного источника в пластине.....	8
4 Пример выполнения индивидуального задания	8
4.1 Расчет скорости охлаждения при действии линейного источника в пластине.....	8
Список литературы	9

Введение

Широко используемые в народном хозяйстве углеродистые стали, обладающие высокими технологическими, но относительно не высокими механическими и специальными свойствами, в ряде отраслей промышленности вытеснены специальными (легированными) сталями.

Легированными называются стали, в состав которых введены специальные (легирующие) добавки с целью придания сталям определенных механических свойств, повышения стойкости против хрупкого разрушения, а также обеспечения специальных свойств (коррозионной стойкости, жаростойкости, жаропрочности). Легирующие элементы образуют с железом и другими элементами твердые растворы и химические соединения, которые и определяют свойства сталей.

Под действием термодетформационного цикла сварки свойства стали существенно изменяются в разных участках зоны термического влияния. Причем скорость охлаждения оказывает основное влияние на изменение этих свойств.

1 Общие сведения

Механические характеристики сварного соединения – прочность и пластичность – в период его формирования определяют вероятность получения бездефектного соединения.

Наиболее сложной задачей при сварке среднелегированных теплоустойчивых сталей является обеспечение отсутствия холодных трещин в сварных соединениях. Под холодными трещинами принято понимать трещины, образующиеся в сварных соединениях при температуре ниже 220 °С как в процессе сварки, так и в течение некоторого времени после сварки.

Холодные трещины в сварных соединениях отсутствуют тогда, когда

$$\omega_{охл} \leq \omega_o , \quad (1)$$

где $\omega_{охл}$ – скорость охлаждения металла шва или зоны термического влияния (ЗТВ) в интервале температур минимальной устойчивости аустенита, К/с;

ω_o – допустимая скорость охлаждения, К/с.

Допустимая скорость охлаждения устанавливается по данным сварки жестких проб, наилучшим образом воспроизводящих тип соединений и уровень напряжений в данной сварной конструкции.

На образование холодных трещин при сварке среднелегированных сталей оказывают влияние пять факторов: структурный, водородный, силовой, температурный и масштабный.

При дуговой сварке термический цикл отличается быстрым нагревом и более медленным охлаждением, что представляет характерную особенность теплового воздействия сварочного процесса на основной металл. Термический цикл на различных расстояниях от источника тепла не одинаков, поэтому сварное соединение представляет собой агрегат с неоднородной структурой и неоднородными свойствами как в околошовной зоне, так и в металле шва.

Зона термического влияния (ЗТВ) улучшаемых сталей имеет ряд структурных участков: участок оплавления; участок крупного зерна (участок перегрева); участок полной перекристаллизации; участок неполной перекристаллизации; участок высокого отпуска.

Свойства металла в различных участках ЗТВ значительно отличаются от исходных свойств основного металла. Наиболее хрупкими участками ЗТВ являются участки оплавления и перегрева. Холодные трещины могут образоваться на участке ЗТВ, нагревавшегося выше точки A_{c1} , но наиболее вероятно они образуются после нагрева выше A_{c3} .

Сформулируем понятия «оптимальная скорость охлаждения» и «допустимая скорость охлаждения». При малой скорости охлаждения в ЗТВ наблюдается значительный рост зерна и в структуре появляется феррит, что приводит к увеличению хрупкости металла ЗТВ при относительно невысокой твердости. При большой скорости охлаждения структура металла ЗТВ и шва получается мартенситной, что приводит к снижению пластических свойств.

Поэтому существует интервал оптимальной скорости охлаждения, в котором обеспечиваются оптимальные механические свойства металла ЗТВ и шва.

Увеличение погонной энергии при сварке приводит к увеличению времени пребывания металла ЗТВ в этом температурном интервале, что приводит к увеличению роста зерна на участке перегрева ЗТВ. Известно, что увеличение величины зерна приводит к уменьшению сопротивляемости стали хрупким разрушениям.

Для увеличения сопротивляемости участка перегрева ЗТВ хрупким разрушениям и уменьшения степени снижения длительной прочности сварных соединений по сравнению с основным металлом сварку теплоустойчивых сталей следует выполнять при малой погонной энергии.

Однако уменьшение погонной энергии приведет к увеличению скорости охлаждения. Поэтому необходимо стремиться сварку выполнять при такой минимальной погонной энергии, при которой, в зависимости от толщины и температуры подогрева, обеспечивается еще и оптимальная скорость охлаждения.

2 Индивидуальное задание

В самостоятельной работе необходимо определить мгновенную скорость охлаждения на участке сварного соединения, нагревавшегося выше критической точки A_{c3} в зависимости от режимов сварки, расчетной схемы источника нагрева, расчетной схемы свариваемого тела, химического состава стали. Исходные данные приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета при действии мощного быстродвижущегося источника на поверхности полубесконечного тела

Показатель	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сила сварочного тока, А	300	400	500	600	700	800	900	950	850	750
Напряжение дуги, В	26	27	28	29	32	33	34	36	33	32
Скорость сварки, см/с	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,7
Эффективный КПД дуги	0,80	0,85	0,78	0,82	0,92	0,90	0,92	0,93	0,90	0,92

Таблица 2 – Исходные данные для расчета при действии линейного источника в пластине

Показатель	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Сила сварочного тока, А	300	400	500	600	700	800	900	950	850	750
Напряжение дуги, В	26	27	28	29	32	33	34	36	33	32
Скорость сварки, см/с	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,7
Эффективный КПД дуги	0,80	0,85	0,78	0,82	0,92	0,90	0,92	0,93	0,90	0,92
Толщина пластины, см	0,8	1,0	1,4	1,6	1,8	1,9	2,0	2,0	1,9	1,6

Таблица 3 – Химический состав сталей

Вариант	Тип стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Cu	Zr	B
1, 13	17ХГ2САФ	0,16	0,52	1,45	0,81	0,2	0,01	0,3	0,1	0,01	0,01	0,1	0,03
2, 14	40Х	0,44	0,22	0,8	1,04	0,2	0,04	0,1	0,1	0,01	0,17	0,1	0,02
3, 15	25ГФА	0,25	0,24	0,92	0,99	0,2	0,01	0,3	0,1	0,01	0,15	0,2	0,01
4, 16	35ХМ	0,36	0,23	0,54	1,03	0,2	0,6	0,1	0,1	0,01	0,17	0,1	0,01
5, 17	35ХМФА	0,36	0,31	0,51	1,13	0,2	0,3	0,1	0,1	0,01	0,01	0,1	0,01
6, 18	30ХГСА	0,30	1,12	0,93	1,03	0,2	0,01	0,1	0,1	0,01	0,01	0,1	0,01
7, 19	11ХЗНВФ	0,11	0,18	0,72	3,04	0,9	0,01	0,2	0,1	0,01	0,01	0,3	0,01
8, 20	12ХЗНВФБ	0,12	0,29	0,63	3,02	0,9	0,01	0,3	0,1	0,01	0,01	0,1	0,01
9	20Х2МФ	0,20	0,13	0,32	2,70	0,2	0,47	0,6	0,1	0,01	0,01	0,1	0,01
10	15Х5М	0,15	0,38	0,44	4,98	0,2	0,55	0,1	0,1	0,01	0,17	0,2	0,01
11	20Х13	0,18	0,29	0,35	13,2	0,2	0,04	0,1	0,1	0,01	0,17	0,1	0,01
12	15Х11МФ	0,15	0,30	0,49	10,6	0,2	0,66	0,3	0,1	0,01	0,17	0,1	0,01

3 Методические указания по выполнению самостоятельной работы

3.1 Расчет скорости охлаждения при действии мощного быстродвижущегося источника на поверхности полубесконечного тела

При движении любого источника теплоты разные точки тела имеют одинаковый, по сути, термический цикл: повышение температуры, достижение ее максимального значения, снижение температуры.

Существует возможность определения мгновенных скоростей охлаждения при сварке. При этом обычно исходят из схемы быстродвижущихся источников теплоты, пренебрегают теплоотдачей с поверхности тела, а в качестве рассматриваемых точек принимают точки на оси шва.

Мгновенную скорость охлаждения при воздействии мощного быстродвижущегося источника теплоты на поверхности полубесконечного тела (варианты 1–10) определяют по выражению

$$\omega = -2\pi\lambda \frac{(T - T_H)^2}{\frac{q}{v}}, \quad (2)$$

где λ – температуропроводность, $\lambda = 0,39$ Вт/(см·К);

v – скорость сварки, см/с;

q – эффективная тепловая мощность дуги, Вт; $q = \eta \cdot I \cdot U$;

T – критическая температура A_{c3} , К;

T_H – температура окружающей среды, $T_H = 293$ и 543 К.

Критическую температуру A_{c3} можно определить по эмпирической зависимости

$$A_{c_3} = 1210,2 - 476,5 \%C + 56 \%Si - 19,7 \%Mn - 16,3 \%Cu - 26,6 \%Ni - 4,9 \%Cr + 38,1 \%Mo + 124,8 \%V + 136,3 \%Ti + 35,0 \%Zr - 19,1 \%Nb + 198,4 \%Al + 331,59 \%B. \quad (3)$$

3.2 Расчет скорости охлаждения при действии линейного источника в пластине

Для быстродвижущегося линейного источника теплоты в пластине (варианты 11–20) скорость охлаждения определяется по формуле

$$\omega = -2\pi\lambda c_p \frac{(T - T_H)^3}{\left(\frac{q}{v\delta}\right)^2}, \quad (4)$$

где δ – толщина металла, см;
 c_p – объемная теплоемкость, $c_p = 4,9 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{К})$.

4 Пример выполнения индивидуального задания

4.1 Расчет скорости охлаждения при действии линейного источника в пластине

Исходные данные для выполнения расчета.

Сила сварочного тока $I = 275 \text{ А}$.

Напряжение на дуге $U = 32 \text{ В}$.

Скорость сварки $v = 0,9 \text{ см/с}$.

Температуропроводность $\lambda = 0,39 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$.

Объемная теплоемкость $c_p = 4,9 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{К})$.

Толщина пластины $\delta = 0,8 \text{ см}$.

Эффективный КПД дуги $\eta = 0,8$.

Определить скорость охлаждения стали 15Х11МФ при предварительном нагреве свариваемого тела до температур $T_H = 293 \text{ К}$ и $T_H = 543 \text{ К}$.

Решение

Используя формулу (4), рассчитаем эффективную тепловую мощность дуги

$$q = \eta \cdot I \cdot U = 0,8 \cdot 275 \cdot 32 = 7040 \text{ Вт}.$$

Находим значение температуры точки A_{c_3} , используя формулу (3):

$$\begin{aligned}
Ac_3 = & 1210,2 - 476,5\%C + 56\%Si - 19,7\%Mn - 16,3\%Cu - \\
& - 26,6\%Ni - 4,9\%Cr + 38,1\%Mo + 124,8\%V + 136,3\%Ti + \\
& + 35,0\%Zr - 19,1\%Nb + 198,4\%Al + 331,59\%B = 1210,2 - \\
& - 476,5 \cdot 0,15 + 56 \cdot 0,3 - 19,7 \cdot 0,49 - 16,3 \cdot 0,17 - 26,6 \cdot 0,29 - \\
& - 4,9 \cdot 10,6 \cdot 38,1 \cdot 0,66 + 124,8 \cdot 0,3 + 136,3 \cdot 0,002 + \\
& + 35,0 \cdot 0,002 - 19,1 \cdot 0,003 + 198,4 \cdot 0,002 + 331,59 \cdot 0,001 = 1146 \text{ К} .
\end{aligned}$$

Расчет ведем для температуры предварительного подогрева $T_H = 293 \text{ К}$.
Определим разность температур

$$\Delta T = T - T_H = 1146 - 293 = 853 \text{ К}.$$

Тогда

$$\omega = -2\pi\lambda_{cp} \frac{(T - T_H)^3}{\left(\frac{q}{v\delta}\right)^2} = -2 \cdot 3,14 \cdot 0,39 \cdot 4,9 \frac{(1146 - 293)^3}{\left(\frac{7040}{0,9 \cdot 0,8}\right)^2} = -77,9 \text{ град/с}.$$

Расчет ведем для температуры предварительного подогрева $T_H = 543 \text{ К}$.

$$\omega = -2\pi\lambda_{cp} \frac{(T - T_H)^3}{\left(\frac{q}{v\delta}\right)^2} = -2 \cdot 3,14 \cdot 0,39 \cdot 4,9 \frac{(1146 - 543)^3}{\left(\frac{7040}{0,9 \cdot 0,8}\right)^2} = -27,5 \text{ град/с} .$$

Список литературы

1 Теория сварочных процессов: учебник / В. М. Неровный [и др.]; под ред. В. М. Неровного. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 702 с.