

Министерство образования Республики Беларусь
Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ №1-5

Учебная дисциплина "Теория сварочных процессов"

Методические указания

разработал к.т.н., доцент ЛУПАЧЕВ А.Г.

Методические указания одобрены на заседании
кафедры ОиТСП (протокол №__ от «__»_____ 2015
г.)

Могилев 2015

Практическое задание №1. Расчет термодинамических потенциалов для процессов, протекающих при высоких температурах

Цель занятия: научить студентов рассчитывать изменения энтальпии и энергии Гиббса для процессов, протекающих при постоянном давлении, и энергии Гельмогольца F для процессов, протекающих при постоянном объеме.

При анализе учитывается, что при $\Delta G = 0$ ($\Delta F = 0$) процесс (реакция) находится в состоянии равновесия, при $\Delta G < 0$ и $\Delta F < 0$ процесс имеет тенденцию (вероятен) к развитию в предполагаемом направлении (идет вправо), а при $\Delta G > 0$ и $\Delta F > 0$ процесс имеет тенденцию к развитию в предполагаемом направлении, обратном предполагаемому (идет влево).

Поскольку $\Delta G = -A_{\max}$, то отрицательная величина изменения свободной энергии Гиббса и, соответственно, положительная величина максимальной работы процесса реакции показывают, что данная реакция (процесс) возможны при заданной температуре.

Энтальпия связана с термическим эффектом процесса (реакции) простым соотношением

$$\Delta H = -Q_p. \quad (1)$$

По величине ΔH можно судить о термическом эффекте процесса (реакции) делать выводы о ходе процесса в зависимости от температуры. По правилу Бертелло при повышенных температурах сварочных процессов интенсивно протекают эндотермические реакции.

Приводимые в справочной литературе данные о величинах H , S , ΔG или ΔF относятся преимущественно к случаям реакций, протекающих при температурах 298 К. В сварочных процессах реакции обычно протекают при более высоких температурах и поэтому необходимо вносить поправки. Вычисление энтальпии H и энтропии S для реакций, протекающих при любой температуре, производится по формулам:

$$\Delta H_T = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p \cdot dT; \quad (2)$$

$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} \cdot dT. \quad (3)$$

Тогда величину изменения свободной энергии можно подсчитать по выражению

$$\Delta G = \Delta H - \Delta ST \quad (4)$$

Подставив формулы (2) и (3) в (4) получим:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT - T \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT \quad (5)$$

Это уравнение можно решать точно, если известна зависимость теплоемкостей реагирующих веществ от температуры. Часто эта зависимость неизвестна и принимаются приближенные расчеты, при которых величина C_p , принимается постоянной и равной значению $C_{p,298}^0$ для температуры 298 К. При этом уравнение (5) легко приводится к виду:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0 - C_{p,298}^0 T \left(\ln \frac{T}{298} + \frac{298}{T} - 1 \right) \quad (6)$$

Для примера рассчитаем величину изменения энтальпии и энергии Гиббса для реакции:



Из справочной литературы выбираем для данной реакции значения энтальпии, энтропии и теплоемкости (таблица 1).

Таблица 1 – Значения Энтальпии, энтропии теплоемкости

Вещество	$\Delta H_{298}^0, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	$\Delta S_{298}^0, \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	$\Delta C_{p,298}^0, \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$
H ₂	0	134,7	29,8
H	217,9	114,2	20,7

Расчет выполняем по формуле (6). Результаты расчетов сводим в таблицу 2.

Таблица 2 – Влияние температуры на изменения энергии Гиббса

T, К	$\Delta G_T, \text{кДж/ моль}$
298,15	407
1000	337
2000	247
4000	-1,15
6000	-240

Выводы

- 1 При температурах выше 4000 К диссоциация возможна.
- 2 При температуре ниже 4000 К идет обратная реакция.

Рабочее задание

- 1 Получить у преподавателя реакцию взаимодействия веществ в сварочной дуге.
- 2 Определить зависимость $\Delta G(T)$ и построить график.
- 3 Оценить возможность протекания реакции.

Примеры реакций. Диссоциация оксидов: FeO, MnO, SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, CaO.

Практическое занятие №2. Расчет термических циклов при нагреве

При контактной стыковой сварке нагрев стержней осуществляется проходящим током плотностью j в металле, имеющем удельное сопротивление ρ и контактным сопротивлением R , т.е. на стыке между свариваемыми деталями температура по длине свариваемых стержней распределяется неравномерно. Приращение температуры ΔT представляется как сумма приращений температур от действия объемного и плоского источника:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (1)$$

Где, ΔT_1 , ΔT_2 – равномерная и неравномерная составляющие приращения температуры T соответственно.

Для расчета принимаем сему неограниченного стержня без теплоотдачи в воздух.

Приращение температуры ΔT_1 находится из формулы

$$\Delta T_1 = (e^{\beta \omega_0 t} - 1) / \beta, \quad (2)$$

где ω_0 - начальная скорость нагрева при температуре 273 К, $\omega_0 = [\rho_r / (c\rho)]_{273} \cdot j^2$;

t - время;

β - коэффициент.

Значения величин, необходимых для расчета ΔT_1 , приведены в таблице 1.

Для контактной сварки сопротивлением ток плотностью j пропускают непрерывно. Его плотность при сварке углеродистой стали обычно составляет 20...60 А/мм².

Приращение температур ΔT_2 определяют, предполагая, что контактное сопротивление R существует непродолжительное время. В зоне контакта при этом выделяется суммарное количество теплоты

$$Q_2 = k / j$$

(3)

где k – расчетный коэффициент, зависящий от давления;

j – плотность тока, А/мм².

$$\Delta T_2 = \frac{Q_2}{c\rho\sqrt{4\pi\alpha t}} e^{-x/(4\alpha t) + (\beta\omega_0 t)} \quad (4)$$

Таблица 1 – Численные значения коэффициентов, используемых для расчета нагрева стержней при контактной сварке

Материал	$[\rho_r / (c\rho)]_{273}$, $10^6 \cdot \text{см}^4 \cdot \text{К} / (\text{А}^2 \cdot \text{с})$	β , $10^3 \cdot 1/\text{К}$	$j^2 \cdot t_n$, $10^6 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{с} / \text{см}$	k , $10^6 \cdot \text{Дж} / (\text{А} \cdot \text{см}^4)$
Сталь 10	3,6	3,8	93...89	0,8...1
Сталь 45	5,25	3,0	75...72	0,7...0,9
Сталь 25НЗ	5,6	2,23	78...75	0,9...9
Сталь Х12	8,4	1,36	67...65	0,85...0,95
Сталь Р18	12	0,64	124	0,75...0,9
Сталь аустенитная коррозионностойкая типа 18-8	16,7	0,28	62	0,38...0,5
Алюминий	1,35	2,33	250	0,7...0,75
Медь	0,53	2,8	880...850	0,5...0,55

Пример расчета

Определить, до какой температуры нагреется стык стержней из стали 10, соединяемых сваркой сопротивлением к концу процесс нагрева, а также температуру через 10 с после сварки. Принимается режим нагрева $j = 40 \text{ А} / \text{мм}^2$; длина стержней между токоподводами $l = 15 \text{ мм}$.

Теплофизические коэффициенты выбираем из таблицы 2.

Таблица 2 – Теплофизические свойства металлов

Металл	Коэффициент теплопроводности λ , $\text{Вт} / (\text{см} \cdot \text{К})$	Объемная теплоемкость $c\rho$, $\text{Дж} / (\text{см}^3 \cdot \text{К})$	Коэффициент температуропроводности a , $\text{см}^2 / \text{с}$
Низкоуглеродистые и низколегированные стали	0,38...0,42	4,9...5,2	0,07...0,09
Коррозионно-стойкие аустенитные стали	3,7...3,8	3,85...4,0	0,95...0,96
Медь	3,7...4,0	3,85...4,0	0,95...0,96
Алюминий	2,7	2,7	1,0

$$\lambda = 0,4 \text{ Вт} / (\text{см} \cdot \text{К}); \quad c\rho = 5,0 \text{ Дж} / (\text{см}^3 \cdot \text{К}); \quad a = 0,08 \text{ см}^2 / \text{с} \quad (5)$$

По таблице 2 находим

$$j^2 \cdot t_n = 90 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{см}^4 \quad (6)$$

Тогда необходимое время нагрева

$$t_n = 90 \cdot 10^6 / 4000^2 = 5,62 \text{ с}; \quad [\rho_r / (c\rho)]_{273} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^4 \cdot \text{К} / (\text{А}^2 \cdot \text{с}); \quad (7)$$

$$\beta = 3,8 \cdot 10^{-3} 1/\text{К}; \quad k = 0,9 \cdot 10^6 \text{ Дж} / \text{см}^4.$$

Начальная скорость нагрева

$$\omega_0 = [\rho_r / (c\rho)]_{273} \cdot j^2 = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 4000^2 = 57,5 K / c, \quad (8)$$

Подставляя полученный результат в формулу (2), получаем

$$\Delta T_1 = 637 K \quad (9)$$

Далее по формуле (3)
находим:

$$Q_2 = 0,9 \cdot 10^6 / 4000 = 2250 \text{ Дж} / \text{см}^2 \quad (10)$$

$$\beta \cdot \omega_0 \cdot t = 1,23 \quad (11)$$

После чего определяем

$$\Delta T_2 = \frac{2250}{5\sqrt{4\pi \cdot 0,8 \cdot 5,62}} \cdot e^{1,23} = 647 K \quad (12)$$

Полное приращение температуры в стыке определится как сумма

$$\Delta T_1 + \Delta T_2 = 637 + 647 = 1284 K \quad (13)$$

Полное время, прошедшее после начала нагрева стержней, равно сумме времени нагрева и выравнивания температур:

$$t = t_H + t_{\text{выр}} = 5,62 + 10 = 15,62 \text{ с.} \quad (14)$$

Приращение температуры ΔT_{1B} в период выравнивания находим по следующей формуле, при этом значение функции Φ для нашего случая равно 0,763:

$$\Delta T_{1B} = \Delta T_{1H} \Phi \left[L / \sqrt{4a(t-t_H)} \right] = 673 \cdot 0,763 = 487 K. \quad (15)$$

Приращение температуры ΔT_{2B} в период выравнивания при $x = 0$ находим по формуле

$$\Delta T_{2B} = \frac{Q_2}{c\rho\sqrt{4\pi at}} \cdot e^{\frac{x^2}{4at} + (\beta\omega_0 t_H)} = \frac{2250}{5\sqrt{4\pi \cdot 0,08 \cdot 15,62}} \cdot e^{1,23} = 388 K. \quad (16)$$

Приращение температур спустя 10 с после сварки равно сумме выражений (15) и (16)

$$\Delta T = 487 + 388 = 875 K.$$

Практическое задание №3. Расчет размеров зоны нагрева и оценка влияния нагрева на свойства сварного соединения

Нагрев металла при сварке вызывает изменение его свойств в зоне термического влияния (ЗТВ). При этом участки ЗТВ, нагретые до разных температур, приобретают различные строение и свойства. При действии мощного быстродействующего точечного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела ширина участка металла, нагретого выше заданной температуры, определяется выражением

$$2L = \sqrt{\frac{8q}{\pi e v c \rho \Delta T}}, \quad (1)$$

где $2L$ – ширина участка нагрева, расположенного по две стороны от оси Ox (ось шва);

q – эффективная тепловая мощность дуги, Вт;

e – основание натуральных логарифмов, $e = 2,718$;

ΔT – приращение температуры, выше значения которого нагреет участок шириной $2L$, $\Delta T = T - T_H$ (T_H – начальная температура тела, К);

v – скорость сварки;

$c\rho$ – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К)

В случае сварки пластины мощным быстродействующим линейным источником ширина зоны термического влияния определяется из выражения

$$2L = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{v c \rho \delta \Delta T}, \quad (2)$$

где δ – толщина металла, см.

Задание 1

Определить ширину зоны термического влияния, ограниченную температурой 475 К, которая представляет собой нижнюю границу участка синеломкости углеродистых сталей при наплавке автоматической сваркой под слоем флюса на массивное тело. Этот случай соответствует вводу теплоты мощным быстродействующим точечным источником в полубесконечное тело. Начальную температуру тела принять равной 295 К. Варианты для индивидуального задания выбирать по таблице 1.

Таблица 1 – Индивидуальное задание

Показатель	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сила сварочного тока, А	300	400	500	600	700	750	800	900	1000	1100	1200	1300
Скорость сварки, см/с	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1	1,5
Эффективный КПД дуги	0,80	0,81	0,82	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,88	0,89	0,9	0,88

Задание 2

Определить ширину заданного участка зоны термического влияния для случая сварки с полным проплавлением пластины из низкоуглеродистой стали мощным быстро движущимся линейным источником. Начальная температура пластины – 290 К.

Температурные границы участков ЗТВ следующие:

околошовный участок.....	1720-1400 К
участок нормализации.....	1400-1120 К
участок неполной перекристаллизации.....	1120-995 К
участок рекристаллизации.....	995-733 К
участок синеломкости.....	773-473 К.

Варианты для индивидуального задания необходимо выбирать по таблице 2.

Таблица 2 – Индивидуальное задание

Показатель	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сила сварочного тока, А	300	400	675	700	750	850	950	900	800	750	725	425
Напряжение дуги, В	26	26	27	28	30	33	34	33	32	30	29	26
Скорость сварки, см/с	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9
Эффективный КПД дуги	0,8	0,81	0,83	0,84	0,85	0,87	0,9	0,89	0,88	0,86	0,84	0,82
Толщина пластины, см	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,5
Определяемый участок	Околошовный			Нормализация			Неполной перекристаллизации		Рекристаллизации		Синеломкости	

Практическое занятие №4. Расчет режимов сварки закаливаемых сталей

При нагреве сваркой участков основного металла, прилегающих ко шву выше температуры A_{c1} , в них образуется аустенит. При охлаждении аустенит переходит в различные по равновесности фазы и разные по строению дисперсной структуры мартенсит, бейнит, сорбит, перлит. В металле шва и зоне термического влияния наличие твердых и хрупких структурных составляющих понижает работоспособность сварного соединения и способствует образованию холодных трещин. Вероятность образования этих дефектов особенно велика, если содержание мартенсита в зоне термического влияния превышает 50%.

Для распада аустенита и его превращения в структуры закалки необходимо время. Оно должно быть больше критического и может быть определено из следующих выражений:

$$t_{кр}(50\%M) = 5,32 \cdot 10^{-3} Дз [\%C] (K_{Si} \cdot K_{Mn} \dots K_{П})^2 \quad (1)$$

$$t_{кр}(95\%M) = 1,07 \cdot 10^{-3} Дз [\%C] (K_{Si} \cdot K_{Mn} \dots K_{П})^2 \quad (2)$$

где Дз – коэффициент, учитывающий склонность к закалке стали с разным размером зерна аустенита (таблица 1);

[%C] - процент содержания углерода в стали;

$K_{Si} \cdot K_{Mn} \dots K_{П}$ - коэффициент, учитывающий влияние на прокаливаемость легирующих элементов.

Таблица 1 – Величина аустенитного зерна

Величина зерна аустенита, балл	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дз (при 50%M)	13,9	12,6	11,8	10,95	10,15	9,40	8,65	7,95	7,30	6,75
Дз (при 95%M)	10,4	9,6	8,9	8,2	7,6	7,0	6,5	5,9	5,5	5,1

Коэффициенты, учитывающие влияние легирующих элементов, рассчитываются по формуле

$$Kn = 1 + \alpha [\%Me], \quad (3)$$

где [%Me] - концентрация легирующего элемента в стали;

α - коэффициент, учитывающий влияние данного элемента на прокаливаемость.

Значения коэффициентов α приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Значения коэффициентов α

Легирующий элемент, %	Si		Mn		Cr	Ni	Mo	Cu	B
	<0,65	>1,0	<1,6	>1,6					
α	0,6	1,65	5,0	5,5	2,25	0,42	2,96	0,27	450

Продолжение таблицы 2

Легирующий элемент, %	Co	Zr	V	Ti	W	Be	S	P	As
			<0,2	<0,2					
α	-0,06	2,53	1,73	5,7	1,2	7,57	-0,62	2,83	0,6

Чем больше время распада аустенита, тем хуже свариваемость стали. В зависимости от величины $t_{кр}$ стали по свариваемости можно разделить на четыре группы (таблица 3).

Таблица 3 – Классификация сталей по прокаливаемости

Название группы	Критическое время распада аустенита, с	Характеристика свариваемости стали
Непрокаляющиеся стали	1,5	Не закаляются при любых режимах дуговой сварки
Слабопрокаливающиеся стали	1,5...5	Требуется выбор оптимальных режимов сварки
Прокаливающиеся стали	5...50	Закаляются во многих режимах дуговой сварки, могут образовываться трещины, при дуговой сварке необходимы специальные технологические приемы (подогрев)
Сильнопрокаливающиеся стали	50	При любых режимах дуговой сварки закаляются на мартенсит, подогрев не гарантирует отсутствие трещин. Необходима специальная технология сварки (наплавки)

По расчетным значениям $t_{кр}$ 50%М можно отнести сталь к соответствующей группе. Для слабопрокаливающихся сталей оптимизировать режим сварки, а для прокаливающихся – определить температуру подогрева при сварке.

При оптимизации режима сварки необходимо выбирать такой же термический цикл, при котором время распада аустенита в ЗТВ будет больше критической длительности его распада для данной стали. Время распада аустенита зависит от режимов сварки.

При сварке пластины с проплавлением на всю толщину длительность пребывания металла зоны термического влияния в интервале температур от начала распада, до температуры наименьшей его устойчивости определяется по формуле

$$t_{3pa} = 4,62 \cdot 10^{-3} Ku \left(\frac{q}{V\delta} \right), \quad (4)$$

а для случая дуговой наплавки валика на массивное тело

$$t_{3pa} = 15,96 \cdot 10^{-4} Ku \left(\frac{q}{V} \right), \quad (5)$$

где q – эффективная тепловая мощность дуги, Вт;

V – скорость сварки, см/с;

δ – толщина, см;

Ku – поправочный коэффициент, учитывающий геометрические условия теплоотвода (таблица 4).

Таблица 4 – Значения коэффициента Ku

Тип свариваемого соединения	Однопроходная сварка пластины в стык	Сварка правого слоя многослойного шва	Сварка нахлесточного соединения	Сварка таврового соединения	Сварка крестового соединения
Расчетная толщина	δ	$3\delta/2$	δ	δ	δ
Коэффициент K_u	1	3/2	2/3	2/3	1/2

Расчетные значения длительности пребывания металла при температурах аустенитного превращения рассчитывают для предварительного намеченного режима сварки и сравнивают с критическим временем распада аустенита $t_{кр}$ 50%M тем самым проверяют выполнения условия

$$t_{pa} > t_{кр} 50\%M . \quad (6)$$

В случае невыполнения этого условия корректируют режимы сварки (погонную энергию).

Полученное значение погонной энергии необходимо проверить на условие роста зерна:

$$t_{pa} > t_{pa.кр} , \quad (7)$$

где t_{pa} – время пребывания материала при $T > T$ роста зерна;

$t_{pa.кр}$ – критическое время роста зерна.

Время пребывания металла при температуре роста зерна определяется по формулам:

$$t_{2pa} = k_2 \frac{8}{\lambda c \rho} \left[\frac{q}{\delta(T_{max} - T_H)} \right] ; \quad (8)$$

$$t_{3pa} = k_1 \frac{2q}{v\lambda(T_{max} - T_H)} , \quad (9)$$

где q – эффективная тепловая мощность дуги, Вт;

v – скорость сварки, см/с;

λ - коэффициент температуропроводности, Вт/(см·К);

k_1, k_2 – коэффициенты, определяемые по монограмме;

T_H – температура металла перед сваркой;

T_{max} – температура роста зерна аустенита.

Формулы (4) и (5) относятся к случаю сварки массивного тела соответственно.

Склонность сталей к росту зерна в ЗТВ препятствует использованию режимов с высокими значениями погонной энергии.

Применение предварительного подогрева является в этом случае основным методом получения качественного соединения закаливающих сталей.

Предварительный подогрев увеличивает длительность распада аустенита в большей степени, чем время роста зерна.

Оптимальную температуру подогрева можно выбрать по величине K_n :

$$K_n = \frac{t_{pa.кр} \cdot 50\%M}{t_{pa}}, \quad (10)$$

В случае, когда $K_n > 1$, подогрев изделия обязателен.

Для выбора температуры подогрева необходимо воспользоваться сведениями, приведенными в таблице 5.

Таблица 5 – Выбор температуры подогрева

Значения коэффициента K_n	Полное проплавление	1	1,7	2,4	3,0	5,2	8,6	16,2	-
	Неполное проплавление	1	1,4	1,8	2,2	2,9	4,0	5,9	10,3
Температура подогрева, °С		0	100	150	200	250	300	350	400

Относительно небольшой подогрев уже существенно увеличивает время распада аустенита. Подогрев является эффективным средством улучшения структуры и свойств сварного соединения, а также предотвращения образования холодных трещин. По техническим и экономическим соображениям его температуру необходимо вбирать минимальной в соответствии с рекомендациями таблицы 5.

Рабочее задание

1 Выбрать одну из марок сталей, восприимчивых к закалке при сварке, - 30ХГСА, 36СГНА, 40Х, 18Х2ВФ.

2 Задать исходный размер зерна этой стали.

3 Для мелкозернистых сталей принять $t_{pa.кр}$ равное 10 с, для крупнозернистых сталей размер зерна не более 4 баллов. Для легированных сталей $t_{pa.кр}$ принять равным 5 с.

4 Провести оптимизацию режимов сварки.

Практическое занятие № 5. Расчет максимальной температуры нагрева

При движении любого источника теплоты разные точки тела имеют одинаковый, по сути, термический цикл: повышение температуры, достижение ее максимального значения, снижение температуры. Существует уравнение для определения максимальных температур нагрева любых точек тела. Для быстродвижущегося точечного источника нагрева на поверхности полубесконечного тела пользуются выражением

$$T_{max} - T_H = \frac{2q}{\pi v c \rho r_0^2}, \quad (1)$$

где r_0 – расстояние до рассматриваемой точки, $r_0^2 = y_0^2 + z_0^2$ (y_0 – координата у рассматриваемой точки, см); z_0 – координата z рассматриваемой точки, см);

q – эффективная тепловая мощность дуги, Вт;

v – скорость сварки;

$c\rho$ – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К)

Для быстродвижущегося линейного источника в пластинке используют выражение

$$T_{max} - T_H = \frac{q}{\sqrt{2\pi v c \delta y_0}} \left(1 - \frac{b y_0}{2a}\right), \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности, см³/с;

b – коэффициент температуропроводности, $b = 2\alpha / (c\rho\delta)$ (α – коэффициент полной теплоотдачи, Вт/(см³/К));

δ – толщина пластины, см.

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 определяют по выражению

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

где λ – температуропроводность, Вт/(см·К);

T – температура точки Ас₃, К.

Для быстродвижущегося линейного источника теплоты в пластине

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

Длительность пребывания металла выше заданной температуры определяется без учета теплоотдачи. Для полубесконечного (массивного) тела при наплавке валика быстродвижущимся источником уравнение выглядит так:

$$t_{zn} = k_1 \frac{2q}{v_x (T_{max} - T_H)}; \quad (5)$$

где t_{3H} – длительность пребывания выше заданной температуры, с;
 k_1 – коэффициент, определяемый по монограмме в зависимости от значения безразмерного критерия $\frac{T - T_H}{T_{max} - T_H}$; (T – температура, выше которой определяется длительность пребывания металла, К; T_{max} – максимальная температура нагрева металла, у границы сплавления $T_{max} = 1800$ К; T_H – температура металла перед сваркой, К).

При однопроходной сварке пластины встык мощным быстродействующим линейным источником длительность пребывания металла выше заданной температуры можно определить из выражения

$$t_{2H} = k_2 \frac{8}{\lambda c \rho} \left[\frac{q}{v \delta (T_{max} - T_H)} \right]^2, \quad (6)$$

где k_2 - коэффициент, определяемый по монограмме в зависимости от безразмерного критерия $\frac{T - T_H}{T_{max} - T_H}$.

Задание

Определить максимальную температуру нагрева точек тела, мгновенную скорость охлаждения, длительность пребывания выше заданной температуры. Данные для расчета взять из практического задания № 4.