

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 27.09.2023 12:06:42
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра машиностроительных технологий и оборудования



ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Методические указания к выполнению курсовой работы для
студентов направления подготовки
15.03.01 «Машиностроение»

УДК 621.791

Составители: Ю.А. Артеменко, А.Н. Гречухин

Рецензент

Кандидат технических наук *О.С. Зубкова*

Теория сварочных процессов: методические указания к выполнению курсовой работы для студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение» / Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: Ю.А. Артеменко, А.Н. Гречухин. – Курск, 2019. – 36 с. – Библиогр.: с. 36.

Излагаются методические рекомендации к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория сварочных процессов». Указываются порядок проведения работ, обработки результатов и составления отчетов.

Методические указания соответствуют ФГОС ВО направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение». Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 18.09.2019..Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 1,7. Уч.-изд. л. 1,6. Тираж 30 экз. Заказ 567. Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Оглавление

1. Построение графика термического цикла	4
1.1. Введение.....	4
1.2. Формулировка задачи.....	5
1.3. Сведения из теории	6
1.3.1. Предельное состояние распространения теплоты	6
1.3.2. Учет границ в ограниченных телах	7
1.3.3. Учет периода теплонасыщения.....	8
1.4. Порядок расчета термического цикла	9
1.5. Оформление результатов расчета.....	10
1.6. Пример выполнения расчета.....	11
2. Расчет кинетики внутренних напряжений	14
2.1. Теоретические положения	14
2.2. Исходные данные к расчету.....	17
2.3. Требования к оформлению раздела.....	18
2.4. Пример расчета кинетики внутренних напряжений	18
3. Расчет легирования через шлак	21
3.1. Сведения из теории	21
3.2. Указания к выполнению расчета	23
3.3. Требования к оформлению отчета.....	23
3.4. Пример расчета	23
4. Построение структурных диаграмм	26
4.1 Сведения из теории	26
4.2. Порядок построения структурных диаграмм.....	29
Структурная диаграмма	30
4.3. Оформление результатов расчетов.....	31
Библиографический список	32

1. Построение графика термического цикла

1.1. Введение

В нагретых теплотой сварочной дуги зонах основного металла, прилегающих ко шву, происходят фазовые и структурные изменения – рекристаллизация, рост зерна, аустенизация, превращения аустенита при охлаждении (ферритное, перлитное, бейнитное, мартенситное), отпуск закалочных структур. Для управления этими процессами необходима информация об изменении температуры во времени в заданной точке сварного соединения (термическом цикле сварки).

В процессе сварки источник теплоты перемещается в теле и вместе с ним перемещается температурное поле. Температура всех точек сварного соединения непрерывно меняется. Вначале температура повышается, достигает максимального значения и далее убывает, причем скорость нагрева всегда больше по абсолютной величине скорости охлаждения. При установившемся температурном поле термические циклы точек, расположенные на одинаковом расстоянии от траектории источника, одинаковы, но смещены во времени (рис. 1а). Термические циклы точек, расположенных на разных расстояниях от оси шва, различаются между собой. В более дальних точках позже достигается максимум температуры меньше и достигается он позже, а скорости нагрева и охлаждения меньше по абсолютной величине (рис. 1б).

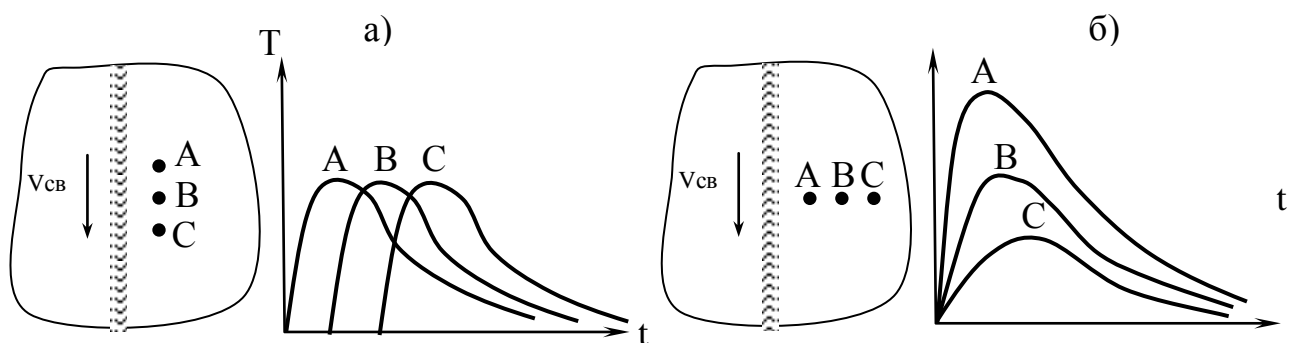


Рис. 1.1. Термические циклы точек сварного соединения

По графику термического цикла, полученному расчетным путем или экспериментально, легко можно определить следующие важные параметры, необходимые для анализа фазо-

вых и структурных превращений в зоне термического влияния (рис. 1.2):

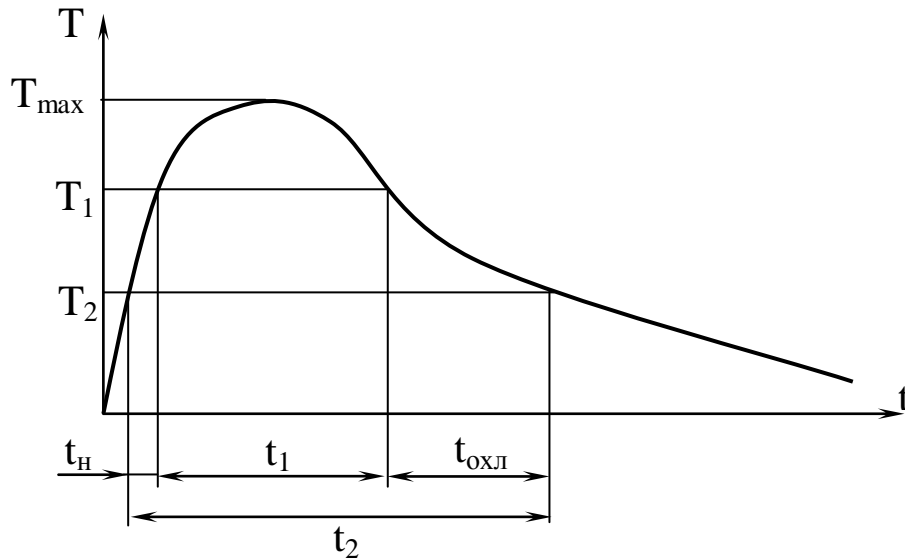


Рис. 1.2. Параметры термического цикла

1. Максимальная температура в точке T_{\max} .
2. Время пребывания t_1 при заданной температуре $T_1 < T_{\max}$.
3. Скорость нагрева ω_H и охлаждения $\omega_{\text{охл}}$ в заданном температурном интервале $T_1 - T_2$.

$$\omega_H = (T_1 - T_2) / t_H ; \quad \omega_{\text{охл}} = (T_2 - T_1) / t_{\text{охл}} .$$

Поэтому построение графика термического цикла является одной из важнейших задач теории тепловых процессов при сварке.

1.2. Формулировка задачи

Свариваются встык пластина неограниченной ширины и полоса шириной 20 мм с одинаковой толщиной δ (рис.1.3). Источник с эффективной мощностью q перемещается по оси OX , направленной вдоль стыка, с постоянной скоростью v из начала неподвижной системы координат в точке O_0 . Требуется построить график термического цикла для точки A , расположенной на полосе с координатами x_A и y_A . Начальному моменту времени соответствует момент прохождения источника через проекцию точки A на оси OX . Необходимо учитывать

период теплонасыщения и влияние внешней границы полосы. Поверхностной теплоотдачей пренебречь

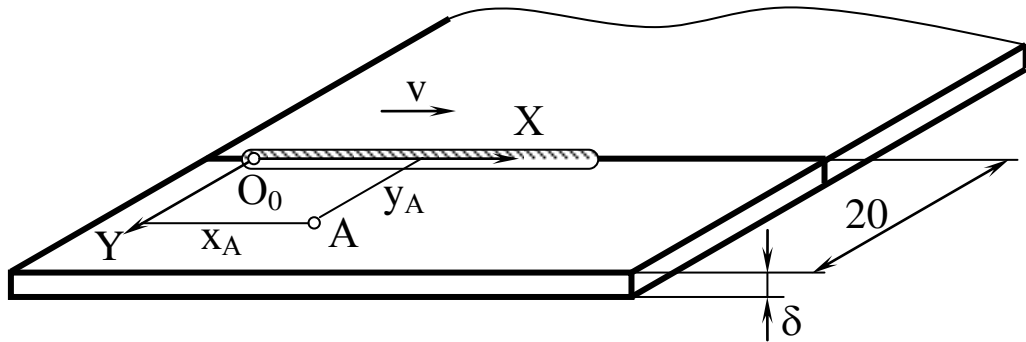


Рис. 1.3. Схема сварки пластины и полосы

1.3. Сведения из теории

1.3.1. Предельное состояние распространения теплоты

Для построения графика термического цикла необходимо рассчитать температурное поле в окрестностях источника нагрева. В большинстве практически важных случаев сварки и наплавки источник нагрева имеет постоянные величины эффективной мощности q и скорости перемещения v , а температурное поле в подвижной системе координат с началом, совпадающим с источником, не зависит от времени действия источника (предельное состояние распространения теплоты). Для линейного источника, равномерно распределенного по толщине δ бесконечной пластины, выражение для температуры в заданной точке с координатами (x, y) относительно подвижной системы координат примет вид

$$T(x, y, z) = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0\left(\frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ab}{v^2}}\right), \quad (1.1)$$

где T_0 – начальная температура, $^{\circ}\text{C}$;

λ, a – соответственно коэффициенты тепло- и температуропроводности, $\text{Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, $\text{м}^2/\text{с}$;

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние заданной точки пластины от источника, м;

$K_0(u)$ – функция Бесселя 2-ого рода нулевого порядка для аргумента u , определяется из таблиц или рассчитывается по приближенной формуле

$$K_0(u) = \sqrt{\frac{\pi}{2u}} e^{-u} \left[1 - \frac{1}{8u} + \frac{1 \cdot 3^2}{2!(8u)^2} - \frac{1 \cdot 3^2 \cdot 5^2}{3!(8u)^3} + \dots \right], \quad (1.2)$$

причем для выражения в квадратных скобках достаточно оставить первые два члена бесконечного ряда;

b – коэффициент температуротдачи, $с^{-1}$; рассчитывается по формуле

$$b = 2\alpha / c\rho\delta, \quad (1.3)$$

где: α – коэффициент поверхностной теплоотдачи, зависит от условий теплоотвода от поверхности листа, $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$;

$c\rho$ – удельная объемная теплоемкость, $Дж/м^3 \cdot ^\circ C$.

Для точек, расположенных на одинаковом расстоянии от оси ОХ термические циклы будут одинаковыми, но сдвинутыми во времени. Поэтому достаточно построить график термического цикла для одной точки с заданными координатами u и z . Для этого в соответствующую формулу для $T(x, y, z)$ делается подстановка $x = -vt$, при этом нулевому моменту времени соответствует момент прохождения источника через проекцию исследуемой точки на ось ОХ.

1.3.2. Учет границ в ограниченных телах

Допуск о неограниченности размеров свариваемых изделий в большинстве случаев несущественно искажает результаты расчетов. Однако в ряде случаев возникает необходимость учета размеров тела, особенно для металлов с высокой теплопроводностью и для низких температур.

Допустим, что источник O перемещается параллельно краю пластины на расстоянии y_0 (рис. 1.3а)

Если считать границу пластины адиабатической, то тепловой поток отразится от нее (рис. 1.4б). Формально это отражение учитывается путем введения фиктивного источника O_1 , равного по мощности действительному источнику O и симметричному ему относительно границы. Температура в произ-

вольной точке $A(x,y)$ определяется как сумма приращений температур от источников O и O_1 , расположенных на расстояниях r_1 и r_2 .

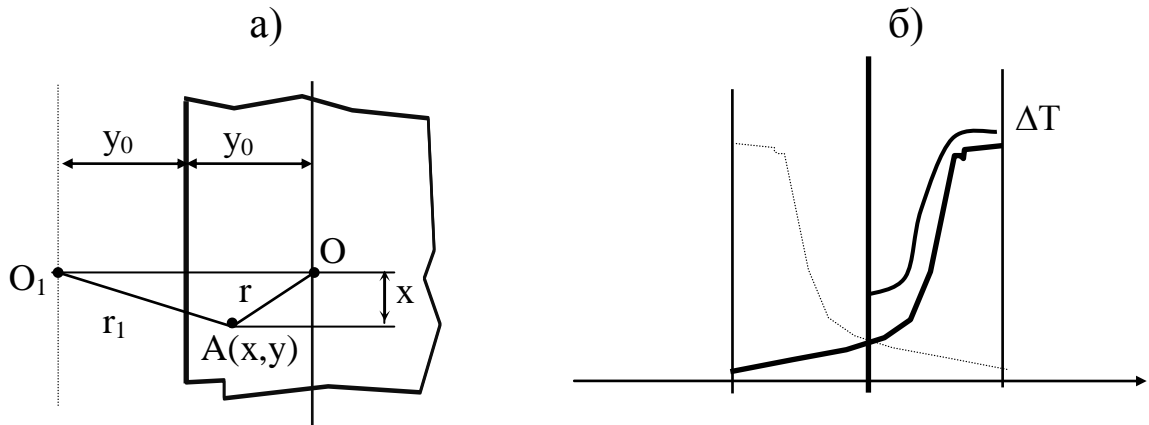


Рис. 1.4. Схема учета границ тела

При отсутствии поверхностной теплоотдачи

$$T = T_0 + \frac{q}{2\pi\pi\lambda} e^{-\frac{vx}{2a}} \left[\text{Ko}\left(\frac{vr}{2a}\right) + \text{Ko}\left(\frac{vr_1}{2a}\right) \right], \quad (1.4)$$

$$\text{где } r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad r_1 = \sqrt{x^2 + (y - 2y_0)^2} \quad (1.5)$$

1.3.3. Учет периода теплонасыщения

В период теплонасыщения, когда величина t_H имеет конечное значение, приращение температуры вычисляется по формуле

$$\Delta T = \psi \Delta T_{\text{пр}}, \quad (1.6)$$

где $\Delta T_{\text{пр}}$ – приращение температуры, вычисленное по формулам (1.1.) и (1.4) для предельного состояния распространения теплоты;

ψ -- коэффициент теплонасыщения, определяется по номограмме на рис. 1.5 в зависимости от безразмерных критериев времени τ и расстояния ρ .

Для пластины (два измерения)

$$\rho = \frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}, \quad \tau = \frac{v^2 t_H}{4a} \left(1 + \frac{4ba}{v^2} \right). \quad (1.7).$$

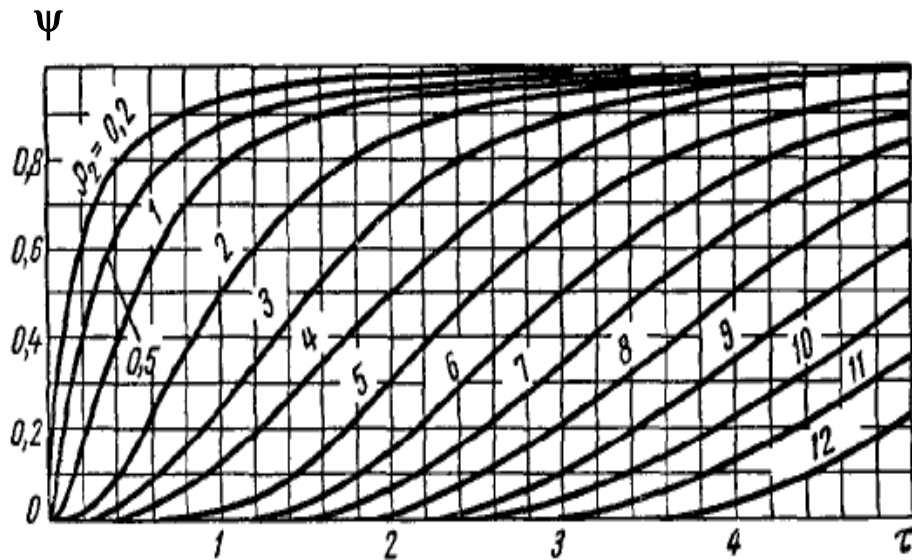


Рис. 1.5 Номограмма для расчета коэффициента теплонасыщения

Из номограммы следует, что чем ближе точка к источнику и больше теплопроводность, тем раньше наступает предельное состояние ($\psi \rightarrow 1$).

Известны приближенные формулы для расчета ψ :

Для двухмерного случая

$$\psi = 0,5 + 0,43 \arctg \left(\frac{2\tau - \rho}{0,57 \sqrt{1 + 8\tau} - 1} \right) \quad (1.8)$$

1.4. Порядок расчета термического цикла

1.4.1. Из приложения I выбираются исходные данные (толщина листа δ , эффективная мощность источника q , скорость сварки v , координаты x_A и y_A). Для всех вариантов принять $T_0 = 0$, $\alpha = 0$, $a = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 39 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ (для углеродистых и низколегированных конструкционных сталей).

1.4.2. Выбирается момент времени $t = 0$ с.

1.4.3. Делается подстановка $x = -vt$.

1.4.4. Вычисляется температура предельного состояния в точке А от действительного источника в точке О на рис. 1.4. В формулу (1.1) подставляются исходные данные и

значение x , определенное по п.1.4.3. При расчете функции $K_0(u)$ использовать формулу (1.2).

- 1.4.5. Аналогично вычисляется температура предельного состояния в точке А от действительного источника в точке O_1 .
- 1.4.6. Определяется температура предельного состояния $T_{пр}$ путем сложения температур от действительного и фиктивного источников.
- 1.4.7. По формуле (1.7) определяются значения безразмерных параметров ρ и τ . Время от начала действия источника определяется по формуле

$$t_H = t + x_A/v \quad (1.9)$$

По номограмме на рис.1.5 или по формуле (1.8) определяется коэффициент теплонасыщения ψ .

- 1.4.8. По формуле (1.6) определяется окончательное значение температуры в точке А с учетом границ и периода теплонасыщения.
- 1.4.9. Полученные результаты расчета температуры наносятся на график $T(t)$. Для контроля правильности вычислений промежуточные результаты расчета заносятся в бланк-алгоритм, представленный ниже в примере расчета (п. 1.6).
- 1.4.10. . Процедуру расчета повторить для моментов времени 1, 2, 4, 6, 10, 20, 40, 70, 100 и 200 с.
- 1.4.11. По полученным точкам строится график термического цикла в равномерной шкале в промежутке времени $(0 \div 20)$ с

1.5. Оформление результатов расчета

В расчетно-пояснительной записке необходимо представить:

1. Таблицу исходных данных к расчету.
2. Заполненный бланк-алгоритм расчета.
3. График термического цикла с расчетными точками.

1.6. Пример выполнения расчета

Таблица 1.1

Исходные данные

Параметр	Обознач.	Ед. измер.	Величина
Материал – Сталь 40Х			
Коэф. теплопроводности	λ	Вт/м·°С	39
Коэф. температуропроводности	a	м ² /с	$8 \cdot 10^{-6}$
Эффективная мощность	q	Вт	10000
Толщина листа	δ	м	0,01
Скорость сварки	v	м/с	0,007
Координаты точки А	x_A	м	0,015
	y_A	м	0,01

Заполненный бланк-алгоритм приведен в таблице 1.2, а график термического цикла – на рис. 1.6.

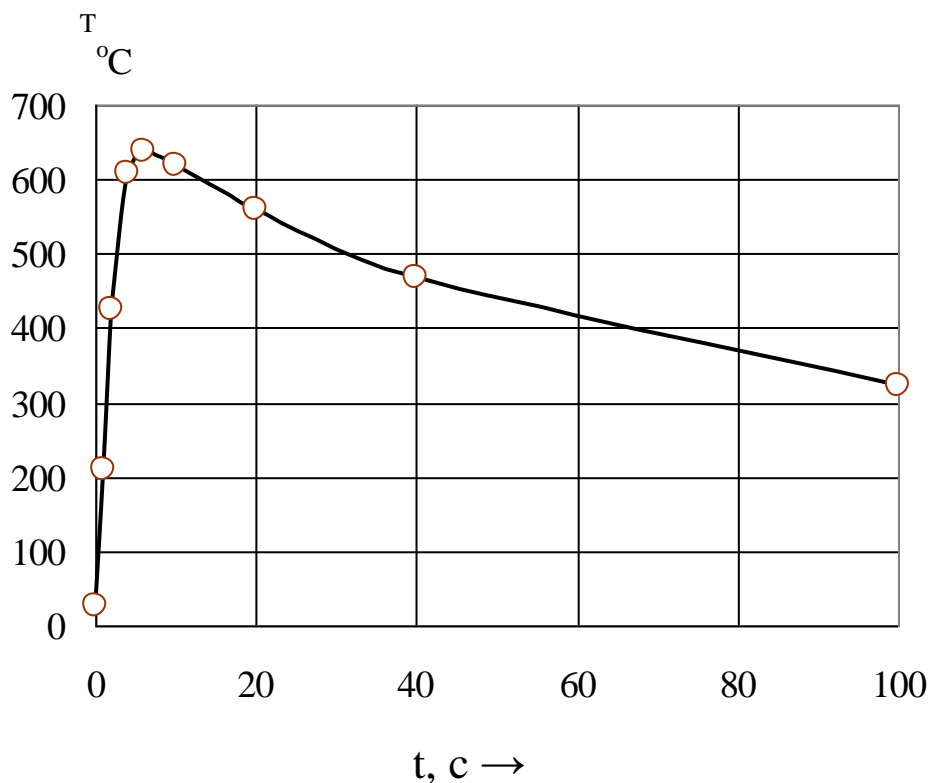


Рис. 1.6. График термического цикла

Таблица 1.3

Пример оформления бланк-алгоритма

t, с	x, м	r, м	r ₁	$u = \frac{vr}{2a}$	$u_1 = \frac{vr_1}{2a}$	$e^{-\frac{vx}{2a}-u}$	$e^{-\frac{vx}{2a}-u_1}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2u}} \left(1 - \frac{1}{8u}\right)$	$\sqrt{\frac{\pi}{2u_1}} \left(1 - \frac{1}{8u_1}\right)$	T _{пр}	ρ	τ	ψ	T, °C
0	0	0,01	0,03	4,38	13,1	0,0126	0	0,582	0,343	30	4,38	3,28	0,86	25,7
1	-0,007	0,012	0,031	5,34	13,5	0,1025	0	0,530	0,338	222	5,34	4,81	9,42	209
2	-0,014	0,017	0,033	7,53	14,5	0,2411	0,0002	0,449	0,326	452	7,53	6,34	9,43	426
4	-0,028	0,029	0,041	13,0	18	0,4690	0,0033	0,344	0,294	662	13,0	9,42	9,17	608
6	-0,042	0,043	0,051	18,9	22,6	0,5983	0,0149	0,286	0,262	716	18,9	12,5	0,89	637
10	-0,07	0,071	0,076	30,9	33,3	0,7327	0,0676	0,224	0,216	731	30,9	18,6	0,847	619
20	-0,20	0,140	0,143	61,4	62,6	0,8555	0,2489	0,160	0,158	718	61,5	33,9	0,780	560
40	-0,28	0,280	0,282	123	123	0,9248	0,4960	0,113	0,113	655	123	64,5	0,714	468
70	-0,49	0,490	0,491	214	215	0,9563	0,6693	0,0855	0,0854	567	214	110	0,667	378
100	-0,7	0,700	0,700	306	307	0,9692	0,7549	0,0716	0,0715	504	306	156	0,641	323
200	-1,4	1,400	1,400	613	613	0,9845	0,8688	0,0506	0,0506	383	613	310	0,601	230
$\frac{q}{2\pi\lambda\delta} = 4083$														

2. Расчет кинетики внутренних напряжений

Целью раздела является усвоение алгоритма расчета кинетики внутренних напряжений при сварке пластин из разнородных материалов. При выполнении расчетов предстоит определить распределение внутренних напряжений по сечению бруса для двух моментов времени. Первый момент соответствует достижению максимальной ширины изотермы 900°C , второй – полному остыванию. Для многих практически важных случаев это позволяет оценить в первом приближении распределение остаточных напряжений.

2.1. Теоретические положения

Расчет кинетики трехосных внутренних напряжений при сварке является сложной математической задачей с привлечением аппарата теорий упругости и пластичности. При этом требуется составление и решение систем уравнений со многими сотнями неизвестных. Применение гипотезы об одноосном напряженном состоянии при сварке во многих практически важных случаях (сварка листов, балочных конструкций и т.п.) упростить процедуру расчета без существенных искажений действительной картины кинетики внутренних напряжений.

Эффективным методом расчета кинетики внутренних напряжений при наложении валика вдоль оси бруса (листа) с произвольным по геометрии и распределению материала сечением является способ разбиения на прямоугольные ячейки. При выводе расчетных формул используется гипотезы плоских сечений и одновременного наложения валика по длине бруса, а также условие равенства нулю сумм внутренних усилий и их моментов во всех ячейках. Если сечение бруса прямоугольное и температура по сечению является функцией одной координаты, то представляется возможным сократить объем вычислений за счет разбиения поперечного сечения бруса на слои одинаковой толщины. В пределах каждого слоя усредняются температура и физико-механические свойства. Расчетные формулы позволяют с высокой степенью достоверности рассчитать кинетику внутренних напряжений при сварке, т.к. они учитывают зависимость физико-механических свойств от температуры и историю нагружения при произвольном распределении материалов по сечению бруса.

Расчет кинетики внутренних напряжений по сечению ведется в следующей последовательности.

1. Задается схема разбиения сечения бруса на n слоев одинаковой толщины. Точность вычислений расчет с ростом n . В пределах каждого слоя материал должен быть однородным.

2. Время термического цикла сварки вплоть до полного остывания разбивается на L моментов времени. Точность расчетов возрастает с увеличением L . В начальный момент времени $\ell = 0$ для всех слоев задаются начальные температура T_{0i} и внутренние напряжения σ_{0i} . Последний момент времени $\ell = L$ соответствует полному остыванию бруса.

3. Для первого момента времени ($\ell = 1$) рассчитывается распределение температуры по сечению бруса. Температура в пределах каждого слоя $T_{\ell i}$ усредняется.

4. В зависимости от $T_{\ell i}$ для каждого слоя определяются расчетные физико-механические свойства, необходимые для расчета кинетики внутренних напряжений – модуль упругости $E_{\ell i} = E(T_{\ell i})$, коэффициент линейного расширения $\alpha_{\ell i} = \alpha(T_{\ell i})$ и предел текучести $\sigma_{s \ell i} = \sigma_s(T_{\ell i})$. Здесь $E(T_{\ell i})$, $\alpha(T_{\ell i})$ и $\sigma_s(T_{\ell i})$ – температурные зависимости соответствующих физико-механических свойств, которые задаются аналитическими функциями или таблично в виде массива данных.

5. Рассчитываются приращения температуры в каждом слое

$$\Delta T_{\ell i} = T_{\ell i} - T_{(\ell-1)i} . \quad (2.1)$$

4. Вычисляются интегральные характеристики R , вводимые для сокращения записи

$$\begin{aligned} R_0 &= \sum_{i=1}^n E_{\ell i}; & R_1 &= \sum_{i=1}^n i \cdot E_{\ell i}; & R_2 &= \sum_{i=1}^n i^2 \cdot E_{\ell i}; \\ R_a &= \sum_{i=1}^n \alpha_{\ell i} \Delta T_{\ell i} E_{\ell i}; & R_{a1} &= \sum_{i=1}^n \alpha_{\ell i} \Delta T_{\ell i} E_{\ell i} \cdot i . \end{aligned} \quad (2.2)$$

5. Определяются приращения деформаций $\Delta \varepsilon_{\ell i}$ в каждом слое

$$\Delta \varepsilon_{\ell i} = -\alpha_{\ell i} \Delta T_{\ell i} + \frac{R_a}{R_0} + \left(\frac{R_1}{R_0} - i \right) \beta, \quad (2.3)$$

где β – коэффициент, пропорциональный угловой деформации поперечного сечения бруса в результате неравномерного нагрева.

$$\beta = \frac{R_{a1} R_0 - R_a R_1}{R_1^2 - R_2 R_0}. \quad (2.4)$$

8. Определяются приращения внутренних напряжений в каждом слое

$$\Delta \sigma_{\ell i} = \Delta \varepsilon_{\ell i} E_{\ell i}. \quad (2.5)$$

9. Вычисляется напряжения в каждом слое

$$\sigma_{\ell i} = \sigma_{(\ell-1)i} + \Delta \sigma_{\ell i}. \quad (2.6)$$

10. Для всех слоев делается проверка на условие пластического течения $K_{\ell i} = |\sigma_s(T_{\ell i}) / \sigma_{\ell i}| < 1$.

11. Из тех слоев, где выполняется это неравенство, выбирают слой с минимальным значением $K_{\ell i}$, т. к. именно с этого слоя начинается пластического течения. Для этого слоя принимается:

а) Напряжение равно пределу текучести $\sigma_s(T_{\ell i})$. Знак напряжения соответствует знаку, полученному при упругом расчете.

б) Расчетный модуль упругости $E_{\ell i} = 0$.

12. С учетом условий п.11 делается перерасчет интегральных характеристик R и β , причем интегральные выражения R_a и R_{a1} принимают более общие значения:

$$R_a = \sum_{i=1}^n E_{\ell i} \alpha_{\ell i} \Delta T_{\ell i} - \sum_{i=1}^n \left\{ (\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \cdot \left[1 - \frac{E_{\ell i}}{E(T_{\ell i})} \right] \right\}$$

$$R_a = \sum_{i=1}^n i \cdot E_{\ell i} \alpha_{\ell i} \Delta T_{\ell i} - \sum_{i=1}^n i \cdot \left\{ (\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \cdot \left[1 - \frac{E_{\ell i}}{E(T_{\ell i})} \right] \right\} \quad (2.7)$$

Следует отметить равенство 0 правых суммарных выражений для упруго деформируемых слоев и левых – для слоев с пластическим течением.

13. Для упруго деформируемых слоев расчет повторяется от п.7 до п.10.

14. При выполнении условия $K_{\ell i} \geq 1$ во всех слоях расчет заканчивается и делается переход к другому моменту времени (индекс ℓ увеличивается на единицу). Расчет повторяется от п. 3. При невыполнении этого условия расчет продолжается от п. 11.

15. Расчет заканчивается при полном остывании бруса ($\ell = L$).

2.2. Исходные данные к расчету

Выбор исходных данных производится в следующей последовательности.

1. Число слоев в бруске для всех вариантов равно 10.
2. Распределение материалов и гипотетических средних температур по слоям выбирается из приложения II. Номер материала соответствует таблице 2.1.

Таблица 2.1

Физико-механические свойства материалов

№	Материал	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Модуль упругости $E \cdot 10^5,$ МПа	$\sigma_s(T), \text{МПа}$ в интервале температур		
				0÷ 350°С	350÷ 700°С	700÷ 1000°С
1	Медь	16	1,1	120	60	0
2	Титан	8	1,1	380	200	50
3	Ст.3	12	2,0	250	100	0
4	Сталь X18H9T	16	2,0	600	300	100

3. Для всех слоев начальные температуры и внутренние напряжения равны нулю.

Для контроля за расчетом кинетики внутренних напряжений требуется заполнять бланк-алгоритм, в который заносятся промежуточные вычисления. Форма бланк-алгоритма приведена в примере расчета в таблицах 2.2–2.5.

2.3. Требования к оформлению раздела

При оформлении результатов необходимо представить:

1. Исходные данные.
2. Последовательность расчета.
3. Заполненные бланк-алгоритмы расчета.
4. Эпюры распределения по слоям напряжений – внутренних для первого и остаточных для второго этапов расчета.
- 5.

2.4. Пример расчета кинетики внутренних напряжений

В качестве примера рассмотрим вариант № 32 (Приложение II). На первом этапе производился упругий расчет (табл. 2.2), в котором выясняется, что полученные данные не удовлетворяют условию текучести и требуется упруго-пластический расчет. В таблице 2.3 представлены результаты упруго-пластического расчета для исходного распределения температуры по слоям, причем промежуточные бланк-алгоритмы для сокращения объема текста не приводятся. В таблицах 2.4 и 2.5 в колонку $\sigma_{(l-1)i}$ заносятся напряжения, рассчитанные в таблице 2.3. Расчет производится для полного остывания бруса ($T_{2i} = 0$).

На рис. 2.1 приводятся эпюры распределения напряжений .

Эпюра напряжений по сечению бруса

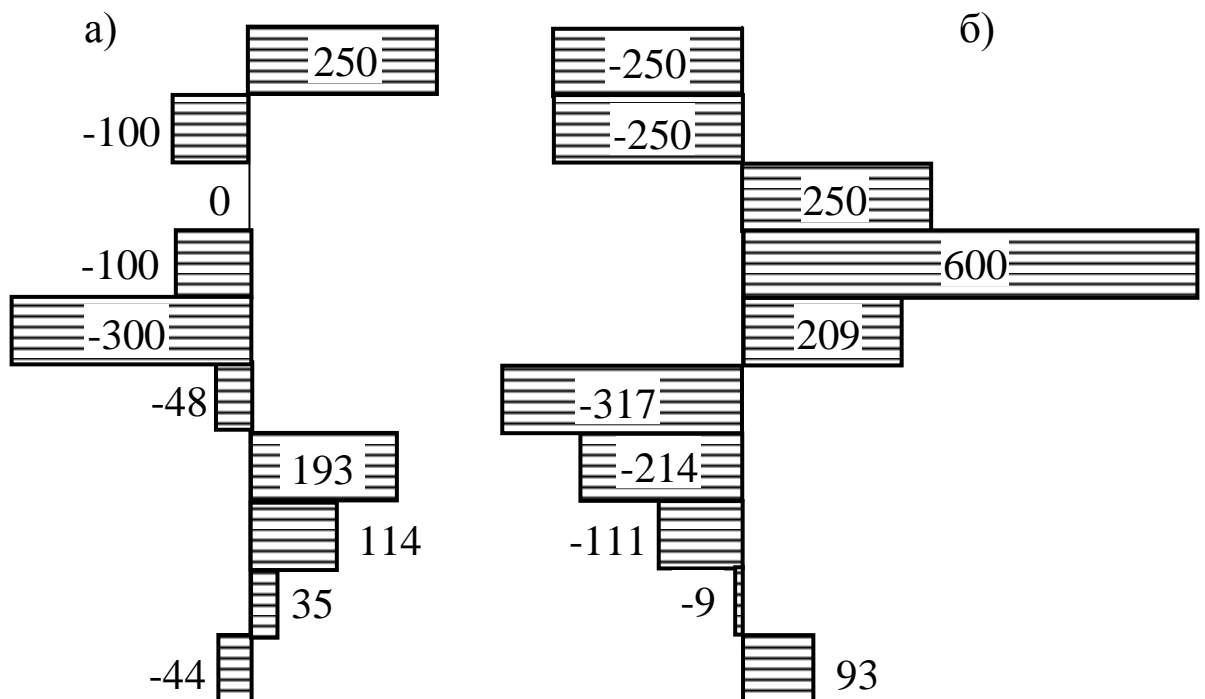


Рис.2.1

а) – внутренние напряжения; б) – остаточные напряжения

Таблица 2.2

Бланк-алгоритм №1 (упругий расчет)

№ слоя	$\sigma_{(\ell-1)i}$	$\Delta T_{\ell i}$	$E_{\ell i} \times 10^5$	$i \cdot E_{\ell i} \times 10^5$	$i^2 \cdot E_{\ell i} \times 10^5$	$\alpha_{\ell i} \cdot \Delta T_{\ell i} \cdot E_{\ell i}$	$-(\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \times [1 - E_{\ell i} / E(T_{\ell i})]$	$\alpha_{\ell i} \cdot \Delta T_{\ell i} \cdot E_{\ell i}$	$-1 \cdot (\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \times [1 - E_{\ell i} / E(T_{\ell i})]$	$\sigma_{\ell i}$	$K_{\ell i}$
1	0	100	2,0	2,0	2,0	240	0	240	0	1342	0,186
2	0	400	2,0	4,0	8,0	960	0	1920	0	445	0,224
3	0	900	2,0	6,0	18,0	2160	0	6480	0	-932	0
4	0	900	2,0	8,0	32,0	2880	0	11520	0	-1829	0,055
5	0	400	2,0	10,0	50,0	1280	0	6400	0	-407	0,737
6	0	100	2,0	12,0	72,0	320	0	1920	0	375	>1
7	0	0	2,0	14,0	98,0	0	0	0	0	517	>1
8	0	0	2,0	16,0	128,0	0	0	0	0	340	>1
9	0	0	2,0	18,0	162,0	0	0	0	0	162	>1
10	0	0	2,0	20,0	200,0	0	0	0	0	-14	>1
$\ell = 1$			$R_0 \cdot 10^6$	$R_1 \cdot 10^6$	$R_2 \cdot 10^6$	R_a		R_{a1}		β	
			2,0	11,0	77,0	7840		28480		$8,87 \cdot 10^{-4}$	

Таблица 2.3

Бланк-алгоритм №2 (упруго-пластический расчет)

№ слоя	$\sigma_{(\ell-1)i}$	$\Delta T_{\ell i}$	$E_{\ell i} \times 10^5$	$i \cdot E_{\ell i} \times 10^5$	$i^2 \cdot E_{\ell i} \times 10^5$	$\alpha_{\ell i} \cdot \Delta T_{\ell i} \cdot E_{\ell i}$	$-(\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \times [1 - E_{\ell i} / E(T_{\ell i})]$	$\alpha_{\ell i} \cdot \Delta T_{\ell i} \cdot E_{\ell i}$	$-1 \cdot (\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \times [1 - E_{\ell i} / E(T_{\ell i})]$	$\sigma_{\ell i}$	$K_{\ell i}$
1	0	100	0	0	0	0	-250	0	-250	250	$K \geq 1$
2	0	400	0	0	0	0	100	0	200	-100	
3	0	900	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	900	0	0	0	0	100	0	400	-100	
5	0	400	0	0	0	0	300	0	1500	-300	
6	0	100	2,0	12,0	72,0	320	0	1920	0	-48	
7	0	0	2,0	14,0	98,0	0	0	0	0	193	
8	0	0	2,0	16,0	128,0	0	0	0	0	114	
9	0	0	2,0	18,0	162,0	0	0	0	0	35	
10	0	0	2,0	20,0	200,0	0	0	0	0	-44	
$\ell = 1$			$R_0 \cdot 10^6$	$R_1 \cdot 10^6$	$R_2 \cdot 10^6$	R_a		R_{a1}		β	
			1,0	8,0	66,0	570		3770		$3,95 \cdot 10^{-4}$	

Таблица 2.4

Бланк-алгоритм №1 (упругий расчет)

№ слоя	$\sigma_{(\ell-1)i}$	$\Delta T_{\ell i}$	$E_{\ell i} \times 10^5$	$i \cdot E_{\ell i} \times 10^5$	$i^2 \cdot E_{\ell i} \times 10^5$	$\alpha_{\ell i} \cdot \Delta T_{\ell i} \cdot E_{\ell i}$	$-(\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \times [1 - E_{\ell i} / E(T_{\ell i})]$	$\alpha_{\ell i} \cdot \Delta T_{\ell i} \cdot E_{\ell i}$	$-i^2(\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \times [1 - E_{\ell i} / E(T_{\ell i})]$	$\sigma_{\ell i}$	$K_{\ell i}$
1	250	-100	2,0	2,0	2,0	-240	0	-240	0	-1092	0,228
2	-100	-400	2,0	4,0	8,0	-960	0	-1920	0	-545	0,550
3	0	-900	2,0	6,0	18,0	-2160	0	-6480	0	932	0,321
4	-100	-900	2,0	8,0	32,0	-2880	0	-11520	0	1729	0,347
5	-300	-400	2,0	10,0	50,0	-1280	0	-6400	0	107	>1
6	375	-100	2,0	12,0	72,0	-320	0	-1920	0	-423	>1
7	517	0	2,0	14,0	98,0	0	0	0	0	-324	>1
8	340	0	2,0	16,0	128,0	0	0	0	0	-226	>1
9	162	0	2,0	18,0	162,0	0	0	0	0	-127	>1
10	-14	0	2,0	20,0	200,0	0	0	0	0	-29	>1
$\ell = 1$			$R_0 \cdot 10^6$	$R_1 \cdot 10^6$	$R_2 \cdot 10^6$	R_a		R_{a1}		β	
			2,0	11,0	77,0	-7840		-28480		$-8,87 \cdot 10^{-4}$	

Таблица 2.5

Бланк-алгоритм №2 (упруго-пластический расчет)

№ слоя	$\sigma_{(\ell-1)i}$	$\Delta T_{\ell i}$	$E_{\ell i} \times 10^5$	$i \cdot E_{\ell i} \times 10^5$	$i^2 \cdot E_{\ell i} \times 10^5$	$\alpha_{\ell i} \cdot \Delta T_{\ell i} \cdot E_{\ell i}$	$-(\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \times [1 - E_{\ell i} / E(T_{\ell i})]$	$\alpha_{\ell i} \cdot \Delta T_{\ell i} \cdot E_{\ell i}$	$-i^2(\sigma_{\ell i} - \sigma_{(\ell-1)i}) \times [1 - E_{\ell i} / E(T_{\ell i})]$	$\sigma_{\ell i}$	$K_{\ell i}$
1	250	100	0	0	0	0	500	0	500	-250	$K \geq 1$
2	-100	400	0	0	0	0	150	0	300	-250	
3	0	900	0	0	0	0	-250	0	-750	250	
4	-100	900	0	0	0	0	-700	0	-2800	600	
5	-300	400	2,0	10,0	50,0	-1280	0	-6400	0	209	
6	375	100	2,0	12,0	72,0	-320	0	-1920	0	-317	
7	517	0	2,0	14,0	98,0	0	0	0	0	-214	
8	340	0	2,0	16,0	128,0	0	0	0	0	-111	
9	162	0	2,0	18,0	162,0	0	0	0	0	-9	
10	-14	0	2,0	20,0	200,0	0	0	0	0	93	
$\ell = 1$			$R_0 \cdot 10^6$	$R_1 \cdot 10^6$	$R_2 \cdot 10^6$	R_a		R_{a1}		β	

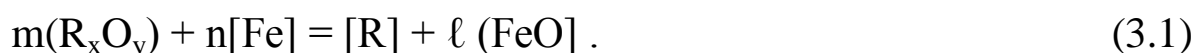
	1,2	9,0	71,0	-1900	-11070	$-9,09 \cdot 10^{-4}$
--	-----	-----	------	-------	--------	-----------------------

3. Расчет легирования через шлак

3.1. Сведения из теории

Легирование металла шва при сварке может быть осуществлено различными способами и, в частности, восстановлением легирующего элемента из окислов, находящихся в шлаке. Восстановителем в этом процессе служит металл-основа сплава. Таким путем при сварке низколегированных и углеродистых сталей под слоем плавящихся флюсов легируют металл шва кремнием и марганцем. Легирование другими элементами до 1- 2 % возможно, но экономически нецелесообразно.

Легирование сталей элементом R происходит в результате окислительно-восстановительной реакции



При термодинамическом равновесии справедливо равенство

$$\begin{aligned} \lg[\%R_0 + \%R] = \frac{1}{2,3RT} [m\Delta G_{R_xO_y}^0 - l\Delta G_{FeO}^0 - \Delta G_{1\%R}] + \\ + l \cdot \lg[\%O]_{\text{нас}} + m \cdot \lg a_{R_xO_y} - l \cdot \lg[\%O] \end{aligned} , \quad (3.2)$$

где:

$[\%R_0 + \%R]$ – сумма начальной концентрации легирующего элемента R_0 и приращения концентрации ΔR , выраженная в процентах по массе;

$R = 8,31 \text{ Дж/}^\circ\text{К} \cdot \text{моль}$ – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура, при которой идет реакция;

$\Delta G_{R_xO_y}^0, \Delta G_{FeO}^0$ – стандартные изобарные потенциалы образования окислов R_xO_y и FeO , выражаются через эмпирические функции от T , приведенные в табл.3.1;

$\Delta G_{1\%R}$ – приращение изобарного потенциала при получении 1%-ого по массе раствора элемента R в железе, выражается через эмпирическую функции от T , приведенную в табл.3.1;

$[\%O]$ – исходная концентрация кислорода в железе в процентах по массе;

$[\%O]_{\text{нас}}$ – концентрация насыщенного раствора кислорода в железе в процентах по массе, выражается через эмпирическую функцию от T

$$\lg [\%O]_{\text{нас}} = -6320/T + 2,734 \quad (3.3)$$

$a_{R_xO_y}$ – активность окисла легирующего элемента в шлаке, является функцией состава флюса.

Для марганца и кремния известны эмпирические формулы для вычисления активности их окислов во флюсе:

$$a_{\text{MnO}} = 0,036 + 6 \cdot 10^{-4} (\text{MnO}) \cdot B,$$

$$a_{\text{SiO}_2} = 0,018 + \frac{0,008(\text{SiO}_2)}{B}, \quad (3.4)$$

где (MnO) , (SiO_2) – содержание окислов во флюсе в процентах по массе;

B – коэффициент основности флюса.

Величина B при известном составе флюса вычисляется по эмпирической формуле

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{CaF}_2 + 0,5(\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + 0,5(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)}, \quad (3.5)$$

Здесь химическая формула компонента означает его содержание в процентах по массе.

Таблица 3.1

Эмпирические формулы для приращения изобарного потенциала

Реакция	Эмпирическая формула
$\text{Mn} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \leftrightarrow \text{MnO}$	$\Delta G_{\text{MnO}}^0 = -353000 + 62,5T$
$\text{Si} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{SiO}_2$	$\Delta G_{\text{SiO}_2}^0 = -935000 + 192,5T$
$\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \leftrightarrow \text{FeO}$	$\Delta G_{\text{FeO}}^0 = -237000 + 49,5T$
$[\text{Mn}]_{\text{Fe}}$	$\Delta G_{1\% \text{Mn}} = -38,2 T$
$[\text{Si}]_{\text{Fe}}$	$\Delta G_{1\% \text{Si}} = -152000 + 19,25 T$

3.2. Указания к выполнению расчета

Целью расчета является построение графика зависимости усвоения легирующего элемента из шлака от температуры. График строится путем вычисления равновесных концентраций элемента R для пяти значений температур в интервале $1900 \div 2500$ °К (1900 °К, 2050 °К, 2200 °К, 2350 °К, 2500 °К). Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Из приложения 3 в соответствии с номером варианта из приложения 3 выбирается состав флюса и легирующий элемент.

2. По формуле (3.5) определяется коэффициент основности В и далее активность $a_{R_xO_y}$ по формуле (3.4).

3. Полученное значение $a_{R_xO_y}$, а также значения изобарных потенциалов из табл.3., концентрации насыщенного раствора кислорода из уравнения (3.3) и заданной концентрации кислорода в железе подставляются в уравнение (3.2), которое решается относительно Т.

4. Поочередно подставляя заданные значения Т, получают точки на графике $[\%R_0 + \% \Delta R](T)$.

3.3. Требования к оформлению отчета

При оформлении пояснительной записки требуется записать исходные данные к расчету, взятые из приложения 3, уравнение реакции легирования, результаты вычисления В и $a_{R_xO_y}$ и последовательность решения уравнения (3.2). Необходимо также представить график зависимости $[\%R_0 + \% \Delta R](T)$.

3.4. Пример расчета

Исходные данные:

Легирующий элемент – кремний.

Содержание кислорода в металле $[O] = 0,03\%$.

Состав флюса:

MnO – 30 %;

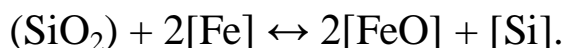
SiO₂ – 30 %;

CaO – 16 %;

Al₂O₃ – 12 %;

CaF₂ – 12 %.

Уравнение реакции легирования



Коэффициент основности определяется по ф-ле (3.5):

$$B = \frac{30 + 15 + 0,5 \cdot 30}{30 + 15 \cdot 0,5} = 1,600.$$

Активность окисла легирующего элемента определяется по ф-ле (3.4):

$$a_{\text{SiO}_2} = 0,018 + \frac{0,008 \cdot 30}{1,6} = 0,168.$$

Делаем необходимые подстановки в уравнение (3.2):

$$\begin{aligned} \lg[\text{Si}] &= \frac{1}{2,3 \cdot 8,31 \cdot T} [-935000 + 192,5T - 2 \cdot (-237000 + 49,5T) - (-152000 + 19,25T)] + \\ &+ 2 \cdot \left(-\frac{6320}{T} + 2,734\right) + \lg 0,168 - 2 \cdot \lg 0,03 = \\ &= -\frac{48919}{T} + 10,071 + \frac{24800}{T} - 5,180 + \frac{7953}{T} - 1,007 - \frac{12640}{T} + 5,468 - 0,7747 + 3,0457 = \\ &= -\frac{28806}{T} + 11,6230. \end{aligned}$$

Делаем подстановки значений T . Результаты вычислений заносим в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Результаты вычислений

$T, ^\circ\text{K}$	$\lg[\text{Si}]$	$[\text{Si}], \%$
1900	-3,5380	0,0003
2050	-2,4287	0,0037
2200	-1,4706	0,034
2350	-0,6349	0,232
2500	0,1006	1,260

Далее строится график зависимости концентрации кремния в металле шва от абсолютной температуры (рис. 3.1).

Зависимость концентрации кремния от температуры

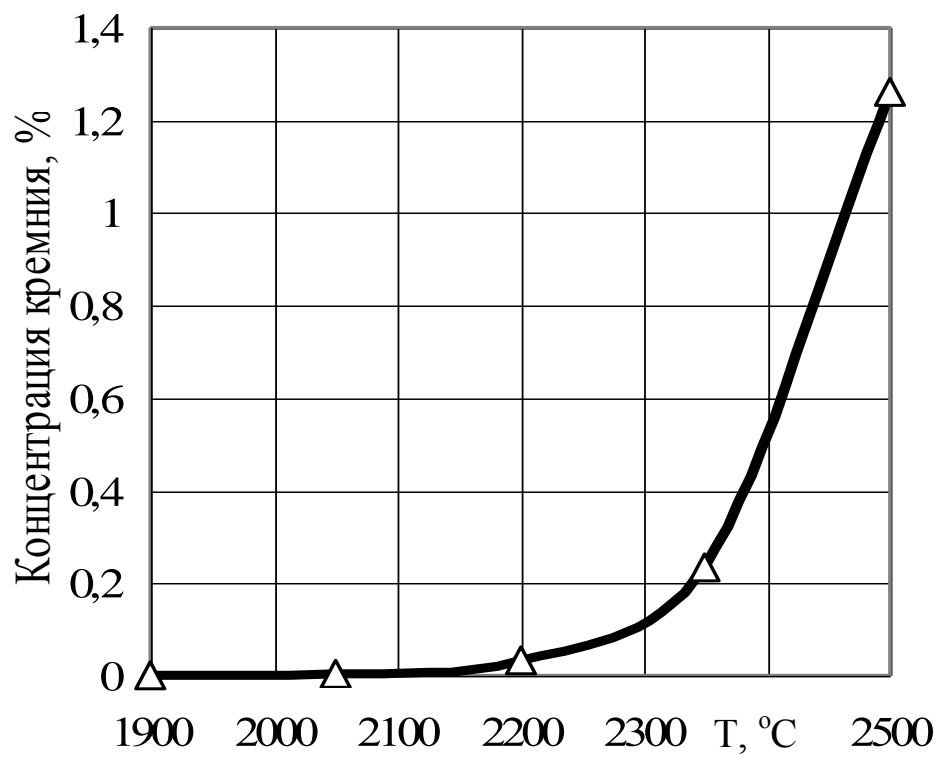


Рис. 3.1

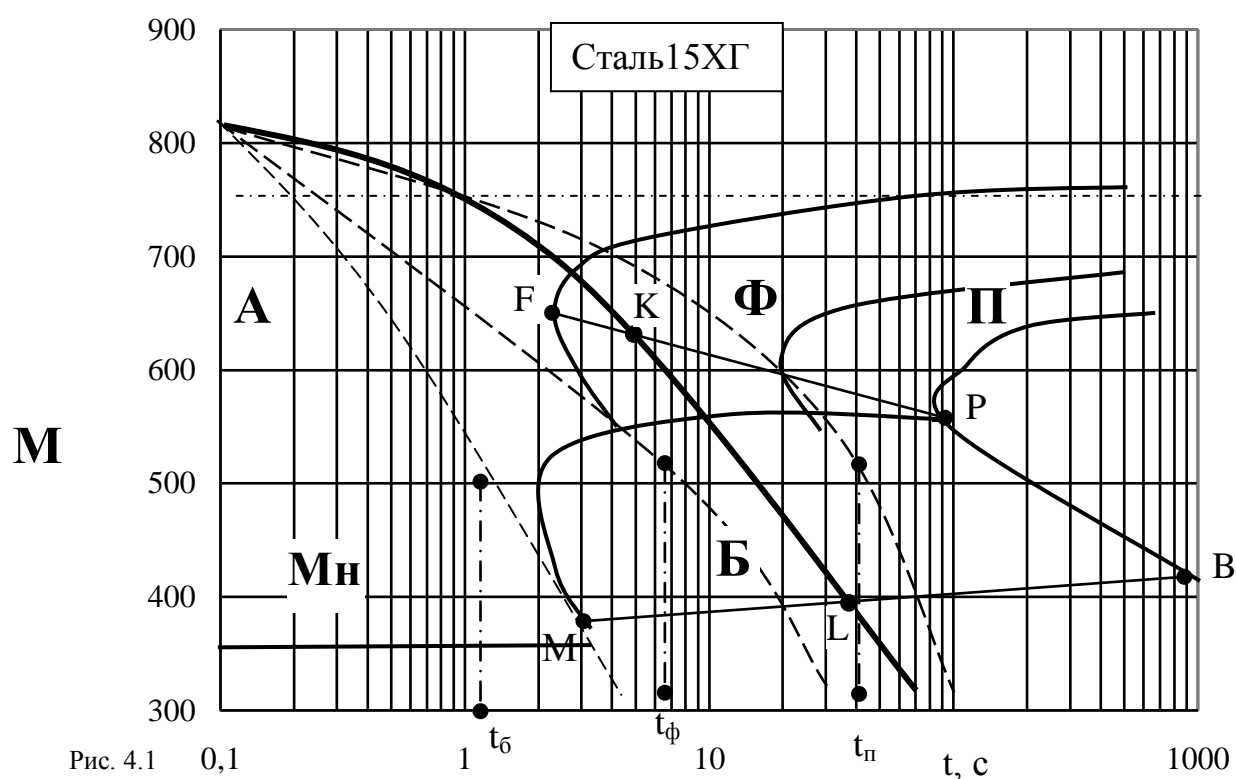
4. Построение структурных диаграмм

4.1 Сведения из теории

Значительная роль в современных исследованиях свариваемости отводится изучению кинетики фазовых превращений с построением структурных диаграмм превращения аустенита в зависимости от параметров сварочного процесса (температура подогрева, скорость сварки и т.п.). Такие диаграммы позволяют прогнозировать структуру и свойства сварных соединений с учетом возможных изменений условий сварки и выбрать рациональные параметры сварочной технологии.

Для построения структурной диаграмм необходим анализ термокинетических диаграмм превращений аустенита. Пример такой диаграммы с обозначением характеристических длительностей охлаждения для феррита $t_{\text{ф}}$, перлита $t_{\text{п}}$ и бейнита $t_{\text{б}}$ и температур начала превращения аустенита представлен на рис. 4.1.

Т
Т
°С Анизотермическая диаграмма превращений аустенита



При распаде аустенита различают нормальный (диффузионный), сдвиговый (мартенситный) и промежуточный (бейнитный) типы превращения. При диффузионном превращении, характерном для фер-

ритного и перлитного $\gamma \rightarrow \alpha$ переходов, кристаллы новой фазы образуются в результате неупорядоченных процессов перемещения атомов через границы исходной и новой фаз.

Ферритное превращение. Характеризует начало распада переохлаждённого аустенита с выделением структурно-свободного феррита. Феррит представляет собой твёрдый раствор углерода в α -железе. Растворимость углерода в α -железе максимальна при 723°C и достигает 0,02%, а при комнатной температуре снижается до $10^{-6} - 10^{-7} \%$ (по массе).

В зависимости от температуры аустенизации, а, следовательно, от размера исходного зерна аустенита и условий его охлаждения, возникают различные разновидности феррита. При медленном охлаждении аустенит распадается с образованием полиэдрического феррита, а при быстром – игольчатого феррита. Местом зарождения полиэдрического феррита являются преимущественно границы исходного аустенитного зерна.

В отличие от этого «нормального» механизма образования феррита крупнозернистый аустенит при относительно быстром охлаждении распадается с образованием видманштеттового феррита, имеющего четко выраженную крупноигольчатую структуру. Для видманштеттового феррита характерна повышенная плотность дислокации и отсутствие карбидных включений внутри кристаллов.

Выделение структурно-свободного феррита предшествует перлитному превращению аустенита. При дальнейшем охлаждении аустенита образуется ферритно-цементитная смесь – перлит. Составляющие этой смеси имеют пластинчатую форму. С увеличением интенсивности охлаждения (уменьшением длительности пребывания в интервале температур $800-500^\circ\text{C}$ t_{8-5}) содержание перлита в структуре вначале увеличивается до максимального значения, а затем уменьшается.

По мере снижения температурного интервала превращения принято различать собственно перлит (межпластиночное расстояние $5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4}$ мм), сорбит (межпластиночное расстояние $3 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}$ мм) и троостит (межпластиночное расстояние $1 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-4}$ мм).

Скорость роста перлита соответствует примерно $2 \cdot 10^{-6}$ см/с. Ускорению перлитного превращения способствует пластическая деформация аустенита.

Мартенсит является пересыщенным твёрдым раствором углерода в α -железе. Концентрация в нём растворённого углерода и легирующих элементов такая же, как и в исходном аустените. Превращение аустенита в мартенсит начинается при переохлаждении ниже критической температуры начала мартенситного превращения M_n и завершается при температуре M_k . Превращение носит сдвиговый характер – атомы в кристаллической решетке смещаются на расстояние меньше межатомного вследствие блокирования диффузии атомов железа и углерода. Степень завершенности мартенситного превращения зависит от переохлаждения ниже M_n и не зависит от скорости охлаждения. На температуры начала и конца мартенситного превращения значительное влияние оказывает углерод и некоторые другие химические элементы.

Кристаллическая решетка мартенсита является объёмно-центрированной, тетрагональной. Тетрагональность возрастает с увеличением содержания углерода в твёрдом растворе. С увеличением тетрагональности растёт твердость и хрупкость мартенсита. Мартенсит является одной из основной причин зарождения холодных трещин во шве и ЗТВ.

Бейнит представляет собой смесь игольчатого феррита и карбидов. При бейнитном превращении атомы железа блокированы, а диффузия углерода существенно замедлена. Различают две морфологические разновидности бейнита – верхний и нижний. В температурном интервале превращения, близком к перлитному, образуется структура верхнего бейнита, характеризующаяся перистым строением. Бейнит, образовавшийся при температуре, незначительно превышающей M_n , имеет игольчатое строение и называется нижним. В первом приближении температурная граница между областями образования этих разновидностей бейнита может быть принята равной 500-550°C.

Верхний бейнит имеет пониженную прочность и вязкость из-за относительно больших размеров структурных составляющих. Нижний бейнит имеет тонкодисперсное строение и благоприятное сочетание механических свойств.

Результатом влияния легирующих химических элементов является смещение температурной области промежуточного превращения в область более низких температур, при которых резко замедляется

диффузионная подвижность углерода. В связи с этим содержание углерода в α -фазе возрастает. Впоследствии углерод отводится на образование карбидов.

Структура стали в результате превращения в интервале длительностей охлаждения, превышающих характеристическую длительность t_6 , состоит из продуктов мартенситного превращения, бейнита и ферритно-перлитной смеси.

4.2. Порядок построения структурных диаграмм

Структурная диаграмма для заданного сплава в зависимости от температуры предварительного подогрева строится в следующей последовательности.

1. На термокинетическую диаграмму сплава, взятую из приложения IV в соответствии с заданием, наносятся кривая охлаждения от $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, определенная из полученного ранее графика термического цикла для $T_0 = 0$.

2. Определяется точка К пересечения кривой охлаждения с отрезком FP. Точки F и P соответствуют экстремумам на кривых начала и конца ферритно-перлитного превращения. Далее оценивается процент ферритно-перлитной смеси в структуре по приближенной интерполяционной формуле

$$V_{\text{ФП}} = \frac{FK}{FP} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Если кривая охлаждения проходит слева от точки F, то $V_{\text{ФП}} = 0$, а если справа от точки P – то $V_{\text{ФП}} = 100\%$.

Для многих термокинетических диаграмм имеются промежуточные кривые, соответствующие определенной (в большинстве случаев 50 %) степени превращения аустенита. В этом случае точность оценки можно повысить, применяя линейную интерполяцию на меньших отрезках.

3. Определяется точка L пресечения кривой охлаждения с отрезком MB, соответствующего началу и концу бейнитного превращения. С учетом результата предшествующего ферритно-перлитного превращения количество бейнита в структуре определится по интерполяционной формуле

$$V_{\text{Б}} = (100 - V_{\text{ФП}}) \frac{ML}{MB} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Если кривая охлаждения проходит левее точки М, то оставшийся после ферритно-перлитного превращения аустенит практически полностью превратится в мартенсит, а если правее точки В – в бейнит.

4. Определяется количество мартенсита в структуре

$$V_M = 100 - (V_{ФП} + V_B) \quad (4.3)$$

5. Вычисления по пп. 2–4 повторяются для кривых охлаждения от 800 °С, соответствующих термическим циклам для температур предварительно подогрева 100, 200 и 300 °С.

6. С использованием данных о составе микроструктуры для всех температур предварительного подогрева строится структурная диаграмма сплава для заданного режима сварки в зависимости от T_0 , образец которой приведен на рис. 4.2 (данные взяты произвольно). Для ее построения на прямых $T_0 = 0$, $T_0 = 100$, $T_0 = 200$ и $T_0 = 300$ от оси абсцисс откладываются отрезки, соответствующие величине $V_{ФП}$. Концы отрезков соединяются прямыми, которые ограничивают на диаграмме область ферритно-перлитной структуры. При построении областей бейнитой и мартенситной структур отрезки, пропорциональные V_B и V_M , строятся от границ ранее построенных областей.

Структурная диаграмма

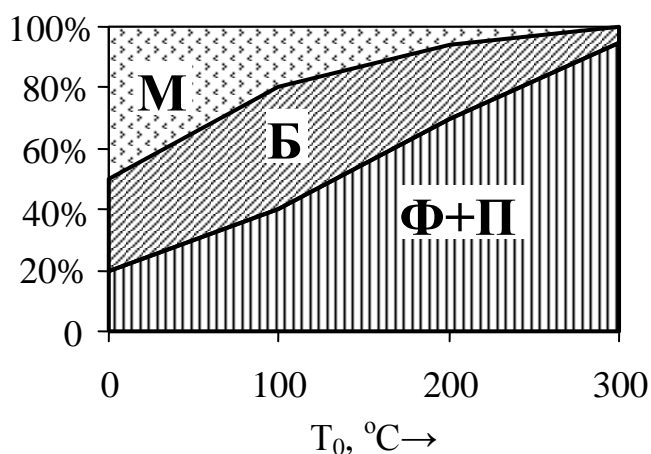


Рис. 4.2

Структурные диаграммы от других переменных (скорость сварки, погонная энергия и т.п.) строятся аналогичным образом.

4.3. Оформление результатов расчетов

В расчетно-пояснительной записке представляются:

1. Термокинетическая диаграмма с расчетными кривыми термических циклов .
2. Промежуточные расчеты по формулам (4.1) – (4.3).
3. Структурная диаграмма.

Библиографический список

1. Теория сварочных процессов /А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007 г. – 752 с.
2. Теория сварочных процессов/ В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др. Под ред. В.В. Фролова. — М.: Высшая школа 1988. 559 с.
3. Сварка и свариваемые материалы. В 3-х т. Т.І.– Свариваемость материалов. Справ. Изд. / Под ред. Э.Л. Макарова.– М: Металлургия, 1991. - 528 с.

Приложение I

Исходные данные к расчету термического цикла

№ вар.	Марка стали	Толщина листа, δ, мм	Эф. мощность источника, q, кВт	Скорость сварки, v, мм/с	Координаты точки А	
					xА, мм	yА, мм
1	Сталь 40	5	4	5	15	5
2	Сталь 40	5	5	7	10	10
3	Сталь 40	5	6	10	15	5
4	Сталь 40	5	4	10	10	10
5	Сталь 40	5	5	5	15	5
6	Сталь 40	5	6	7	10	10
7	Сталь 40Х	6	4	5	15	5
8	Сталь 40Х	6	5	7	10	10
9	Сталь 40Х	6	6	10	15	5
10	Сталь 40Х	6	4	10	10	10
11	Сталь 40Х	6	5	5	15	5
12	Сталь 40Х	6	6	7	10	10
13	Сталь 60С2	8	5	5	15	5
14	Сталь 60С2	8	6	7	10	10
15	Сталь 60С2	8	8	10	15	5
16	Сталь 60С2	8	5	10	10	10
17	Сталь 60С2	8	6	5	15	5
18	Сталь 60С2	8	8	7	10	10
19	Сталь 15ГС	10	6	5	15	5
20	Сталь 15ГС	10	8	7	10	10
21	Сталь 15ГС	10	10	10	15	5
22	Сталь 15ГС	10	6	10	10	10
23	Сталь 15ГС	10	8	5	15	5
24	Сталь 15ГС	10	10	7	10	10

Приложение II
Исходные данные к расчету кинетики внутренних напряжений
(№ материала/ температура слоя, оС)

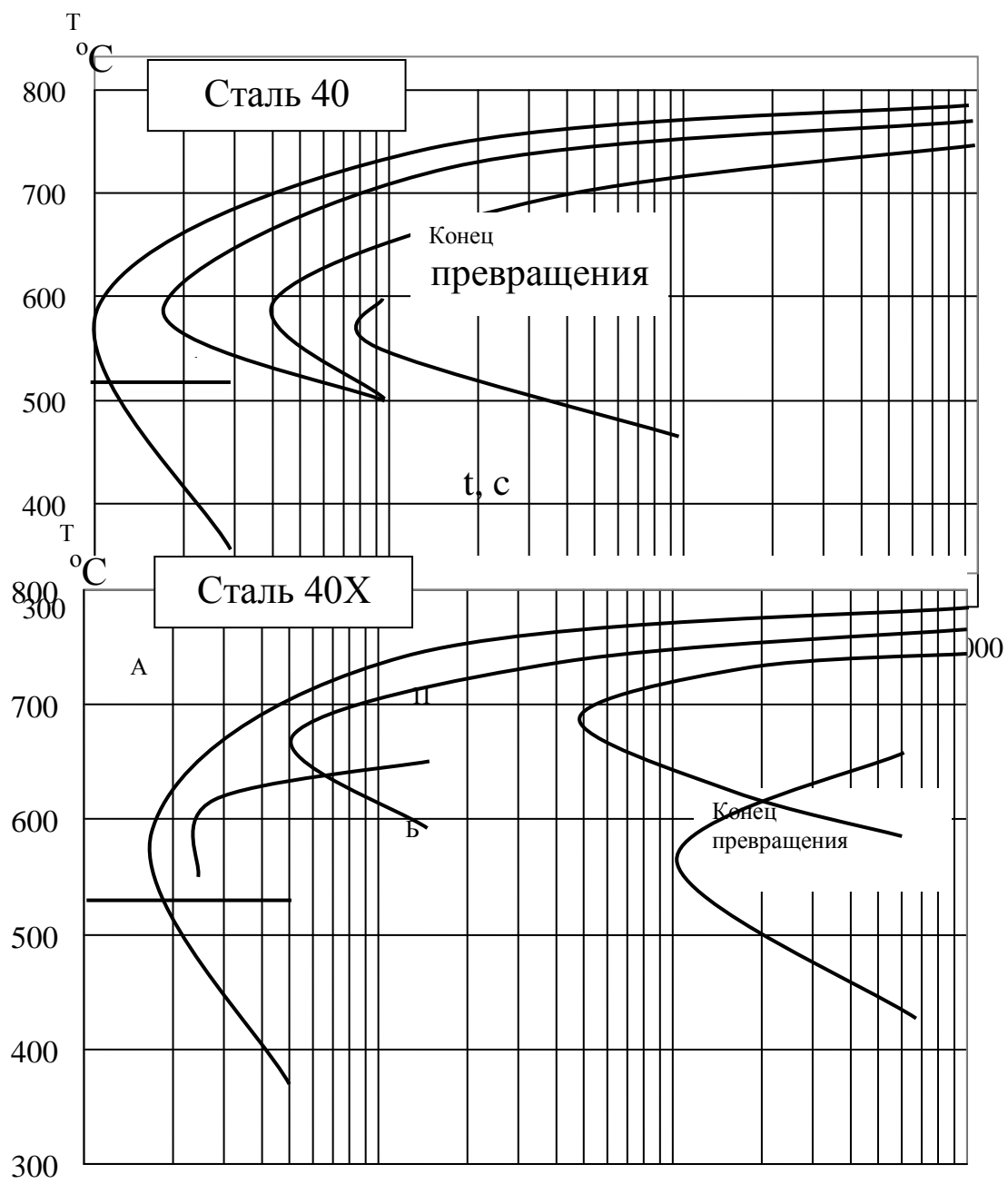
№ вар.	Номер слоя									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1/400	1/900	2/900	2/400	2/100	2/0	2/0	2/0	2/0	2/0
2	1/100	1/400	1/900	2/900	2/400	2/100	2/0	2/0	2/0	2/0
3	1/0	1/100	1/400	1/900	2/900	2/400	2/100	2/0	2/0	2/0
4	1/0	1/0	1/100	1/400	1/900	2/900	2/400	2/100	2/0	2/0
5	1/0	1/0	1/0	1/100	1/400	1/900	2/900	2/400	2/100	2/0
6	1/0	1/0	1/0	1/0	1/100	1/400	1/900	2/900	2/400	2/100
7	1/400	1/900	3/900	3/400	3/100	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0
8	1/100	1/400	1/900	3/900	3/400	3/100	3/0	3/0	3/0	3/0
9	1/0	1/100	1/400	1/900	3/900	3/400	3/100	3/0	3/0	3/0
10	1/0	1/0	1/100	1/400	1/900	3/900	3/400	3/100	3/0	3/0
11	1/0	1/0	1/0	1/100	1/400	1/900	3/900	3/400	3/100	3/0
12	1/0	1/0	1/0	1/0	1/100	1/400	1/900	3/900	3/400	3/100
13	1/400	1/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0	4/0	4/0	4/0
14	1/100	1/400	1/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0	4/0	4/0
15	1/0	1/100	1/400	1/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0	4/0
16	1/0	1/0	1/100	1/400	1/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0
17	1/0	1/0	1/0	1/100	1/400	1/900	4/900	4/400	4/100	4/0
18	1/0	1/0	1/0	1/0	1/100	1/400	1/900	4/900	4/400	4/100
19	2/400	2/900	3/900	3/400	3/100	3/0	3/0	3/0	3/0	3/0
20	2/100	2/400	2/900	3/900	3/400	3/100	3/0	3/0	3/0	3/0
21	2/0	2/100	2/400	2/900	3/900	3/400	3/100	3/0	3/0	3/0
22	2/0	2/0	2/100	2/400	2/900	3/900	3/400	3/100	3/0	3/0
23	2/0	2/0	2/0	2/100	2/400	2/900	3/900	3/400	3/100	3/0
24	2/0	2/0	2/0	2/0	2/100	2/400	2/900	3/900	3/400	3/100
25	2/400	2/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0	4/0	4/0	4/0
26	2/100	2/400	2/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0	4/0	4/0
27	2/0	2/100	2/400	2/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0	4/0
28	2/0	2/0	2/100	2/400	2/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0
29	2/0	2/0	2/0	2/100	2/400	2/900	4/900	4/400	4/100	4/0
30	2/0	2/0	2/0	2/0	2/100	2/400	2/900	4/900	4/400	4/100
31	3/400	3/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0	4/0	4/0	4/0
32	3/100	3/400	3/900	4/900	4/400	4/100	4/0	4/0	4/0	4/0

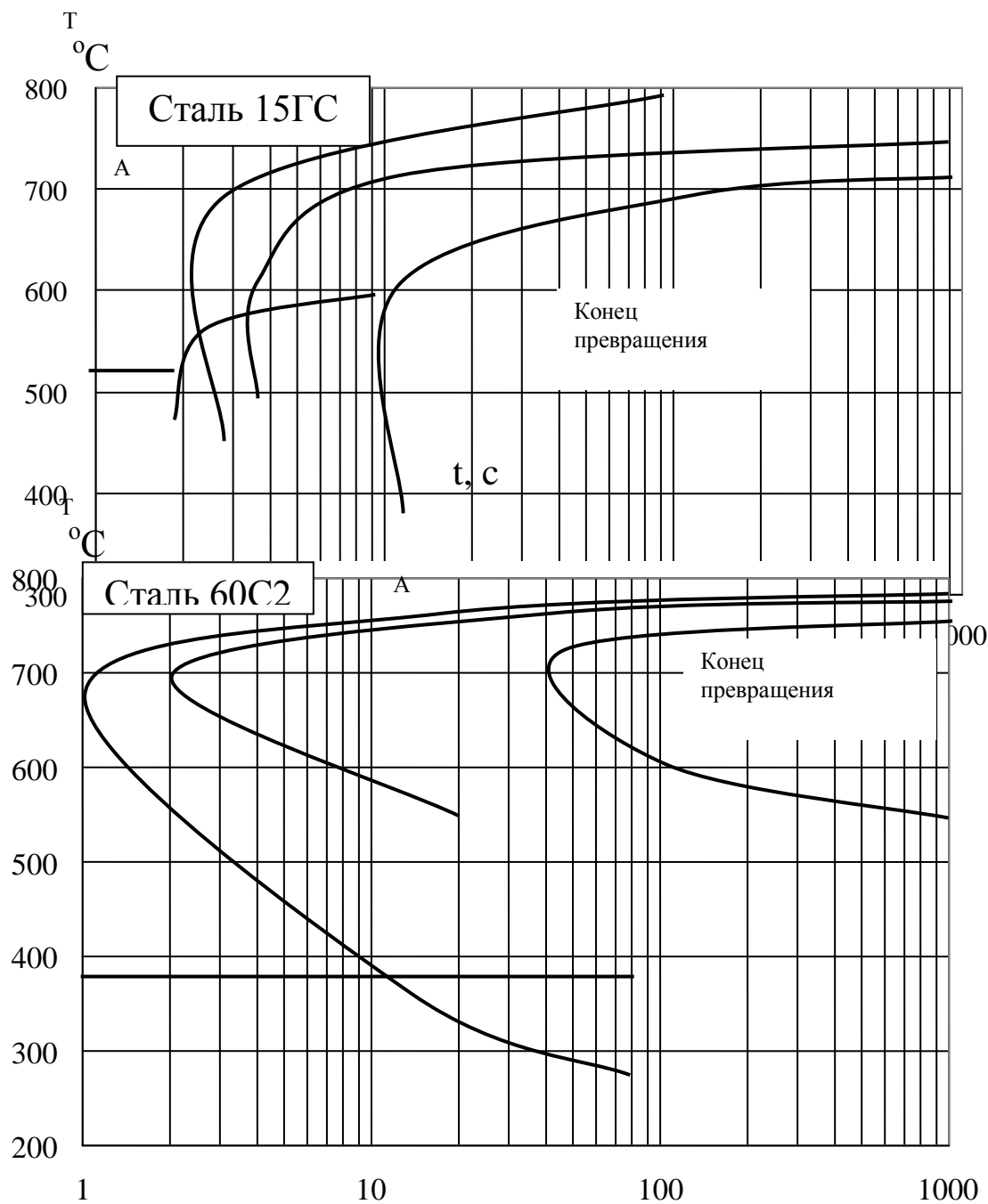
Приложение III
Исходные данные к расчету легирования металла через шлак

№ варианта	Легированный элемент	Содержание компонентов, % по массе					[%O]
		MnO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	
1	Mn	15	50	24	6	5	0,02
2		20	45	24	6	5	0,02
3		25	40	24	6	5	0,03
4		30	35	24	6	5	0,03
5		35	30	24	6	5	0,04
6		40	25	24	6	5	0,04
7		15	50	18	8	9	0,05
8		20	45	18	8	9	0,05
9		25	40	18	8	9	0,06
10		30	35	18	8	9	0,06
11		35	30	18	8	9	0,07
12		40	25	18	8	9	0,07
13		15	50	12	10	13	0,08
14		20	45	12	10	13	0,08

15		25	40	12	10	13	0,09
16		30	35	12	10	13	0,09
17	Si	15	50	24	6	5	0,02
18		20	45	24	6	5	0,02
19		25	40	24	6	5	0,03
20		30	35	24	6	5	0,03
21		35	30	24	6	5	0,04
22		40	25	24	6	5	0,04
23		15	50	18	8	9	0,05
24		20	45	18	8	9	0,05
25		25	40	18	8	9	0,06
26		30	35	18	8	9	0,06
27		35	30	18	8	9	0,07
28		40	25	18	8	9	0,07
29		15	50	12	10	13	0,08
30		20	45	12	10	13	0,08
31		25	40	12	10	13	0,09
32		30	35	12	10	13	0,09

Приложение IV
Термокинетические диаграммы превращений аустенита





$t, c \longrightarrow$