

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина»

Нижнетагильский технологический институт (филиал)

Кафедра металлургических технологий

О. И. Шевченко

Влияние режима сварки на процессы формирования структуры зоны термического влияния

Методические указания к выполнению практических работ по курсам
„Металлургия и технологии процессов сварки“ и „Сварочные процессы
в машиностроении“

*Утверждено методическим советом Нижнетагильского технологического
института (филиал) УрФУ в качестве учебно-методического пособия для
бакалавров направлений 22.03.02- Металлургия и 15.03.02 -
Технологические машины и оборудование*

РАЗМЕЩЕНО В ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ НТИ (филиал) УрФУ

Нижний Тагил
2023

УДК 621.791 (075.8)
ББК Ж616
Ш 37

Рецензент: профессор кафедры общего машиностроения НТИ (ф) УрФУ, д-р. техн. наук Е. Н. Сафонов.

Шевченко О.И.

Ш 37 Влияние режима сварки на процессы формирования структуры зоны термического влияния. Методические указания к выполнению практических работ по курсам „Металлургия и технологии процессов сварки“ и „Сварочные процессы в машиностроении“ [Электронный ресурс]: / М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетаг. технолог. ин-т (фил). – Нижний Тагил : НТИ (ф) УрФУ, 2023. – 24 с.

В пособии содержится теоретический материал, методические указания к выполнению практических занятий по курсу «Металлургия и технология сварочного производства».

Данные методические указания предназначены для бакалавров направления **22.03.02-Металлургия и 15.03.02 - Технологические машины и оборудование.**

УДК 621.791 (075.8)
ББК Ж616

© Шевченко О.И. 2023

© ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
Нижнетагильский технологический институт (филиал), 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СИМВОЛОВ.....	4
1. СХЕМАТИЗАЦИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ПРИ СВАРКЕ.....	5
2. ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ СВАРОЧНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ	6
3. НАГРЕВ ПОЛУБЕСКОНЕЧНОГО ТЕЛА, ПЛОСКОГО СЛОЯ И ПЛАСТИНЫ ПОДВИЖНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ.....	7
4. РАСЧЕТ ШИРИНЫ ЗОНЫ НАГРЕВА.....	10
5. РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА И МГНОВЕННОЙ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	11
6. ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ ЗТВ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ О СВАРИВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ И РЕЖИМЕ СВАРКИ.....	12
7. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ 1	15
8. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ХАРАКТЕРНЫХ УЧАСТКОВ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ.....	16
9. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ 2	18
9. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СВАРКИ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ НА ЗАДАННОМ РЕЖИМЕ.....	20
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	26
ПРИЛОЖЕНИЕ. ОФОРМЛЕНИЕ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА	28

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СИМВОЛОВ

q_0	– полная тепловая мощность источника, Вт;
q	– эффективная тепловая мощность источника, Вт;
η_u	– эффективный к.п.д. нагрева изделия;
T	– температура твердого тела, град.;
T_0	– температура окружающей среды; начальная температура тела, град.;
T_m	– максимальная температура, град.;
t	– время, с;
t_m	– время достижения максимальной температуры, с;
V	– скорость перемещения источника теплоты, см/с;
X_0, Y_0, Z_0	– прямоугольные координаты в неподвижной системе, см;
x, y, z	– прямоугольные координаты в подвижной системе, см;
$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$	– пространственный радиус-вектор точки, см;
$r = \sqrt{x^2 + y^2}$	– плоский радиус-вектор точки, см;
δ	– толщина пластины, см;
λ	– коэффициент теплопроводности, Вт/(см•град);
$c\gamma$ или $c\rho$	– объемная теплоемкость, Вт/(см ³ •град);
$a = \lambda / c\gamma$	– коэффициент температуропроводности, см ² /с;
α	– коэффициент полной поверхностной теплоотдачи, Вт/(см ² •град);
ЗТВ	– зона термического влияния

Ряд обозначений коэффициентов и функций даны непосредственно по тексту пособия.

1. СХЕМАТИЗАЦИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ПРИ СВАРКЕ

Распространение теплоты существенно зависит от формы и размеров тела. Точный учет конфигурации тела может привести к таким усложнениям расчета, что его практическое использование окажется затруднительным. Поэтому во всех тех случаях, когда пренебрежение второстепенными особенностями формы тела не приводит к большим погрешностям расчета, целесообразно упрощать формы рассматриваемых тел, сводя их простейшим. Обычно выбирают одну из следующих основных схем. (Рис. 1)

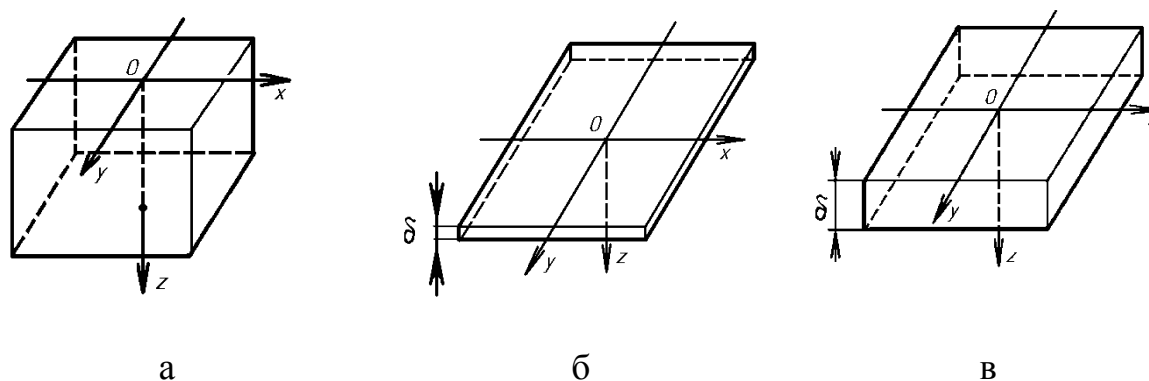


Рис 1. Расчетные схемы

Полубесконечное тело (рис.1 а). Этой схеме соответствует массивная деталь с одной ограничивающей плоскостью $z=0$. Остальные поверхности детали значительно удалены и не влияют на распространение теплоты. Схема используется при расчете температур в случае наплавки валиков и укладки угловых швов с малым проплавлением на листах большой толщины.

Бесконечная пластина (рис.1 ,б) - тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями $z=0$ и $z=\delta$. Температура по толщине листа δ распределена равномерно, и теплота распространяется только в плоскости xOy . Схема соответствует случаю сварки пластины встык или укладки углового шва с полным проплавлением.

Плоский слой (рис.1,в) - пластина, у которой температура точек по толщине не одинакова, а толщина тела не настолько велика, чтобы можно было пренебречь влиянием ограничивающей плоскости $z=\delta$ и считать тело бесконечным.

2. ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ СВАРОЧНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

Эффективная тепловая мощность сварочного источника теплоты, т.е. количество теплоты, вводимой при сварке источником в деталь в единицу времени, если известны параметры режима сварки, определяется по формуле

$$q = \eta IU, \quad (1)$$

где I – сварочный ток; А
 U – напряжение на дуге; В
 η – эффективный к.п.д. процесса нагрева.

Значение эффективного к.п.д. процесса нагрева для разных способов сварки приведены в табл.1:

Таблица 1. Значение η для основных видов сварки

Процесс	η
Электрическая дуговая сварка и наплавка:	
– графитовым электродом	0,5-0,6
– покрытым электродом на постоянном токе	0,75-0,85
– покрытым электродом на переменном токе	0,65 - 0,75
– в углекислом газе	0,72–0,92
– в аргоне вольфрамовым электродом	0,65 - 0,75
– в аргоне плавящимся электродом	0,70–0,80
– порошковой проволокой (откр. дугой)	0,80–0,90
– под слоем флюсом	0,80–0,95
– лентой под флюсом	0,88–0,93
– лентой открытой дугой и в газе	0,68–0,75
Вибродуговая наплавка	0,60–0,75
Плазменно-дуговой нагрев	0,60–0,75
Нагрев плазменной струей	0,10-0,50
Нагрев газовым пламенем	0,30–0,80
Электрошлаковая наплавка	0,75–0,95
Электронно-лучевой нагрев	0,70–0,90
Нагрев лучом лазера	0,02–0,20

3. НАГРЕВ ПОЛУБЕСКОНЕЧНОГО ТЕЛА, ПЛОСКОГО СЛОЯ И ПЛАСТИНЫ ПОДВИЖНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

При наплавке валика на массивное тело наилучшие результаты дает использование рабочей схемы нагрева подвижным точечным источником поверхности полубесконечного тела.

$$\Delta T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \cdot \exp\left\{-\frac{V}{2a} \cdot (x + R)\right\} \quad (2)$$

В случае же сварки тонких листов встык за один проход используют схему нагрева бесконечной пластины подвижным линейным источником

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \cdot \exp\left\{-\frac{Vx}{2a}\right\} \cdot K_0(u), \quad (3)$$

$$u = r \sqrt{\frac{V^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad (4)$$

где $K_0(u)$ - функция Бесселя,

$b = \frac{2\alpha}{c\gamma\delta}$ - коэффициент, учитывающий интенсивность понижения температуры при теплоотдачи в окружающую среду с двух сторон пластины (при теплоотдачи с одной стороны $b = \frac{\alpha}{c\gamma\delta}$)

Для $0 \leq u \leq 10$ функция $K_0(u)$ табулирована. При больших значениях аргумента ($u \geq 2,5$) вычисление $K_0(u)$ можно производить по формуле:

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

Однако в настоящее время для расчетов целесообразно использовать встроенные функции в математических пакетах рис.4..

Приращение температур в предельном состоянии при расчете по формулам (2) и (3) представлено соответственно на рис. 2 и 3

Для всей области плоского слоя, лежащей вне оси 0Z, температуру предельного состояния определяют по формуле:

$$T(r, x, z) = m(r, z) \cdot \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \exp\left\{-\frac{Vx}{2a}\right\} K_0\left(\frac{Vr}{2a}\right) \quad (6)$$

где $m(r, z)$ - коэффициент, учитывающий сосредоточение источника теплоты на верхней поверхности плоского слоя, который определяется по номограмме рис.5 или из выражения

$$m(r, z) = 1 + \frac{2}{K_0(Vr/2a)} \cdot \sum_1^{\infty} \cos \frac{\pi n z}{\delta} K_0\left[\frac{\pi n r}{\delta} \sqrt{1 + \left(\frac{V\delta}{2a\pi n}\right)^2}\right] \quad (7)$$

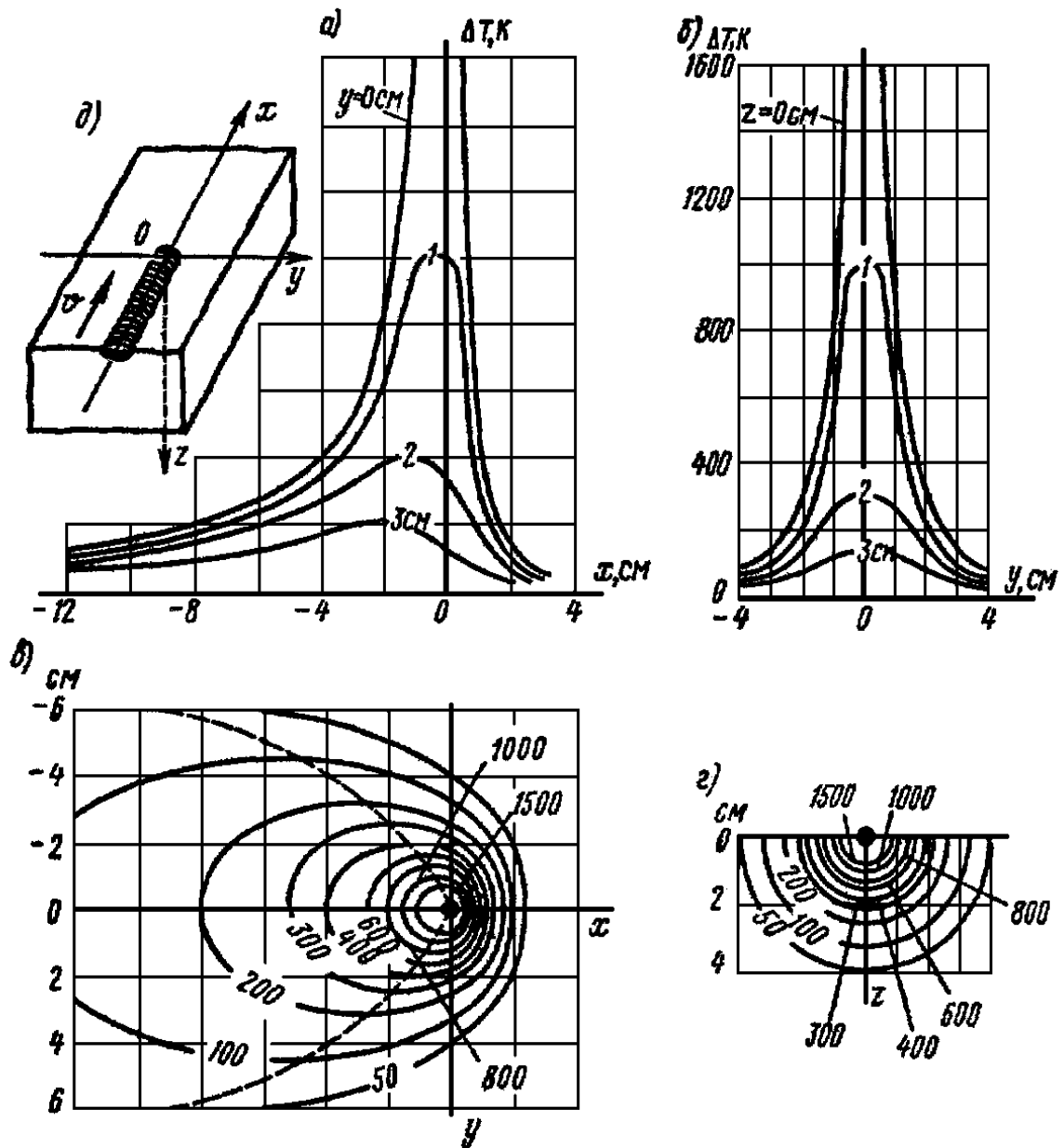


Рис. 2. Приращение температуры в предельном состоянии при движении точечного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела ($q=4000 \text{ Вт}$, $V=0,1 \text{ см}^2/\text{с}$, $a=0,1 \text{ см}^2/\text{с}$, $\lambda=0,4 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$)
 а – распределение приращении температуры по прямым, параллельным оси x и расположенным на поверхности массивного тела; б- распределение приращений температуры по прямым, параллельным оси V и лежащим в поперечной плоскости xOz ; в - изотермы на поверхности xOy (штриховая кривая разделяет область нагрева и область остывания); г- изотермы в поперечной плоскости xOz , проходящей через центр источника; д - схема расположения координатных осей.

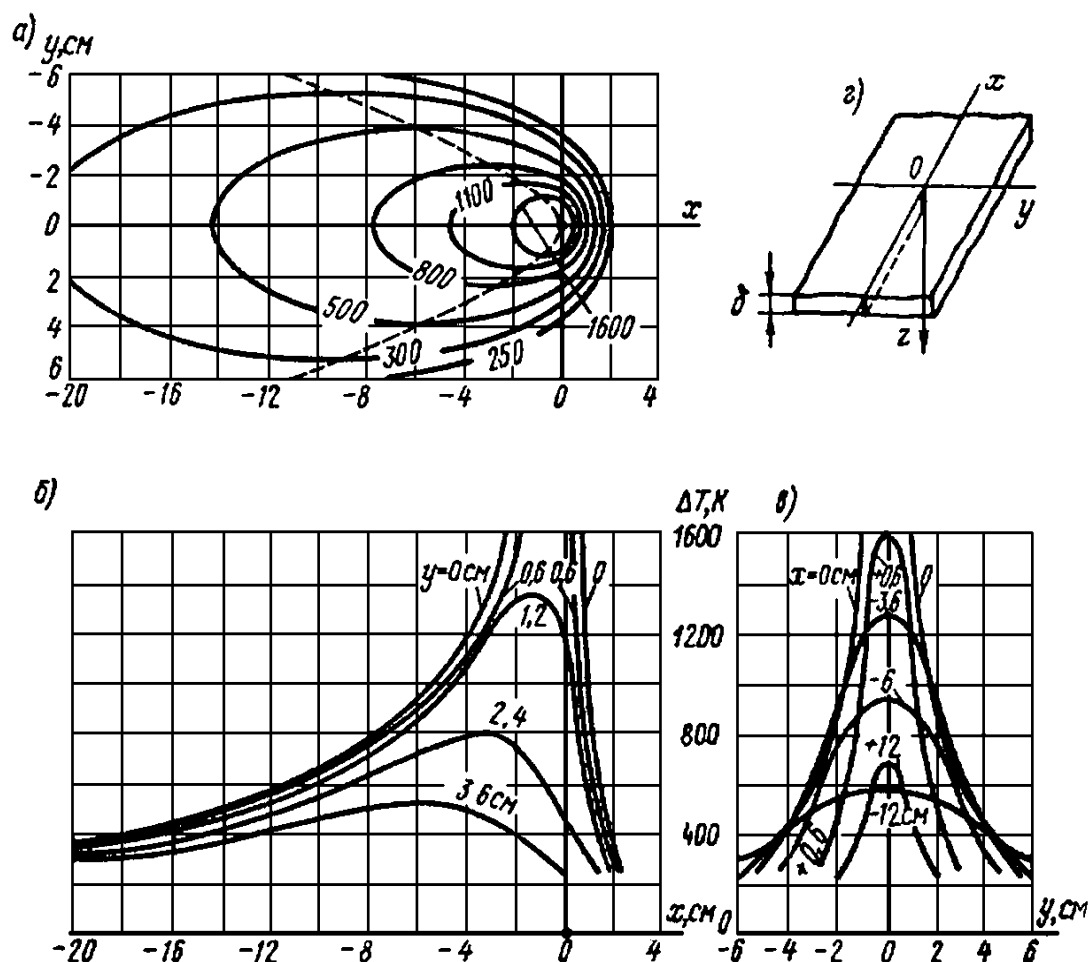


Рис. 3. Приращение температуры в предельном состоянии при движении линейного источника в бесконечной пластине ($q=4000$ Вт, $V=0,1$ см/с, $\delta=1$ см, $a=0,1$ см²/с, $\lambda=0,4$ Вт/(см·К), $b=2,8 \cdot 10^3$ 1/с)

а - изотермы на поверхности xOy (штриховая кривая - точки с максимальными температурами); б - распределение приращений температуры в сечениях, параллельных оси x ; в - распределение приращений температуры в сечениях, параллельных оси y ; г — схема расположения координатных осей.

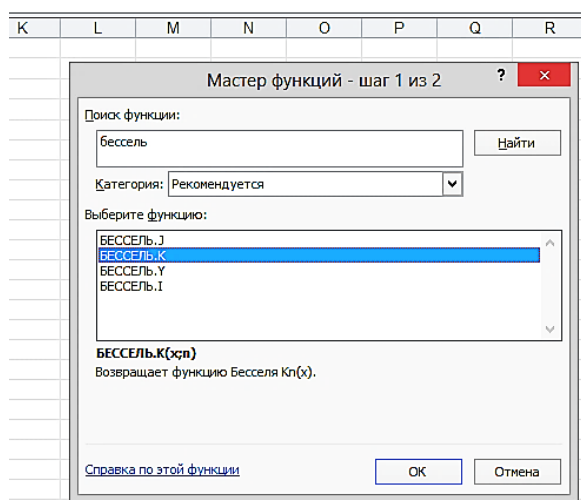


Рис.4. Пример использования встроенной функции в Microsoft Excel, обозначенной как БЕССЕЛЬ.К

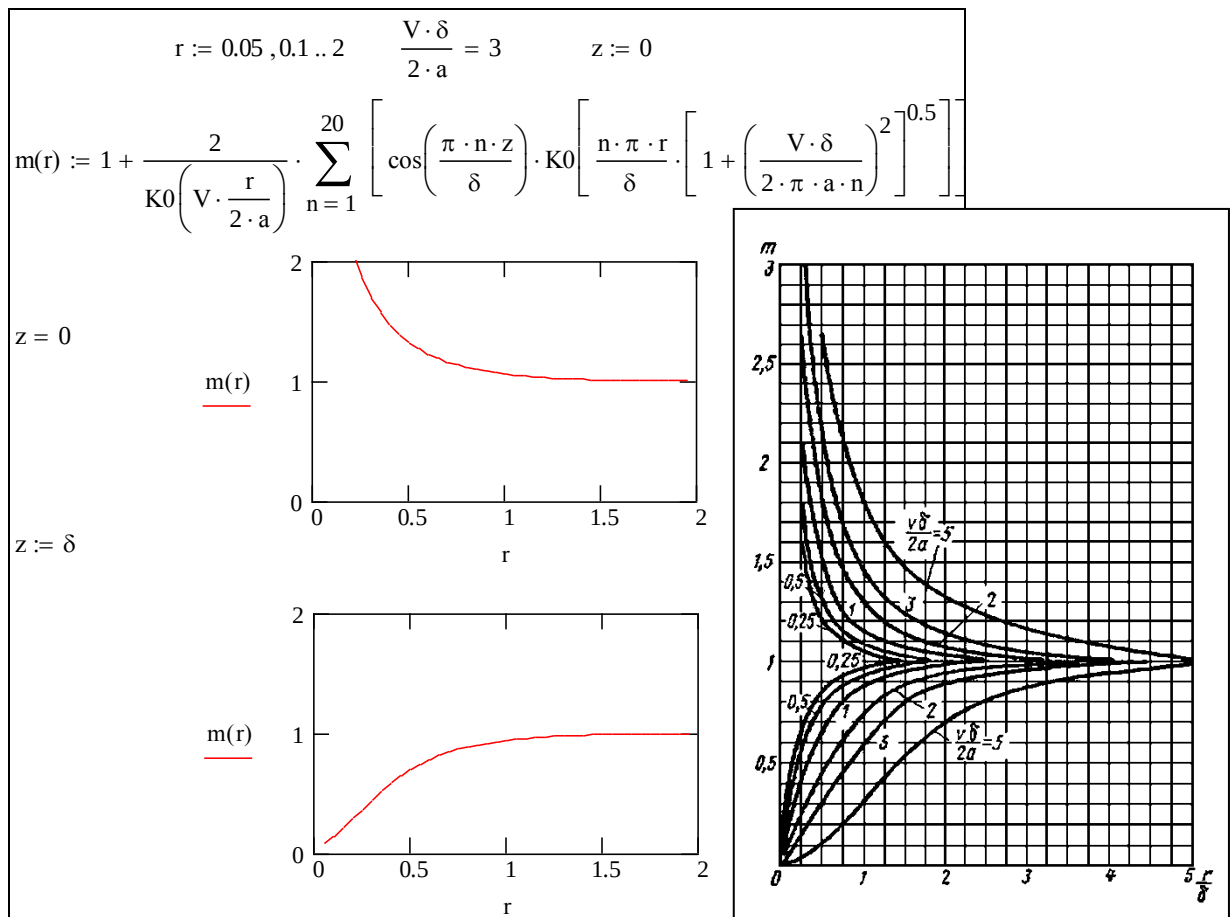


Рис. 5. Коэффициент m , выражающий отношение на поверхностях плоского слоя к температуре пластины: фрагмент листа MathCAD и «классическая» номограмма.

4. РАСЧЕТ ШИРИНЫ ЗОНЫ НАГРЕВА

Нагрев металла при сварке вызывает изменение его свойств в зоне термического влияния. 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

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

где

$2L$ – ширина участка нагрева, расположенного по две стороны от оси шва;

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 т.е. температура

подогрева или окружающей среды, К)

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

$$2L = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{v c \rho \delta \Delta T}, \quad (9)$$

5. РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА И МГНОВЕННОЙ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ

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

$$T_{\max} - T_H = \frac{2q}{\pi e v c \rho r_0^2}, \quad (10)$$

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

Для быстродвижущегося линейного источника в пластинке используют выражение

$$T_{\max} - T_H = \frac{q}{\sqrt{2\pi e v c \delta} y_0} \left(1 - \frac{b y_0}{2a} \right), \quad (11)$$

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 ω охлаждения при воздействии мощного быстродвижущегося источника теплоты на поверхности полубесконечного тела определяют по выражению

$$\omega = -2\pi\lambda \frac{(T - T_H)^2}{\frac{q}{v}}, \quad (12)$$

Для быстродвижущегося линейного источника теплоты в пластине

$$\omega = -2\pi\lambda c\rho \frac{(T - T_H)^3}{\left(\frac{q}{v\delta}\right)^2} \quad (13)$$

6. ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ ЗТВ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ О СВАРИВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ И РЕЖИМЕ СВАРКИ

1. Оформить в виде таблицы задание к практической работе, данные взять из табл.7 . Ознакомится с материалом разделов 1...3 данного пособия.

Таблица 2. Исходные данные

Марка стали	I, А	U, В	η	V см/с	y, см
					1

Примечание. Если максимальные температуры цикла сварке в точке удалённой на $y = 1$ см от оси шва не превышают 900°C координату «у» принять равной 0,5 см.

2. Руководствуясь заданием выбрать расчетную формулу (2), (3) или (6). При необходимости **привести аналитические зависимости** для расчета коэффициентов входящих в основную расчетную формулу (для q , a , b , m и др.)

Например:

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \cdot \exp\left\{-\frac{Vx}{2a}\right\} \cdot K_0(u),$$

где

T - приращение температуры расчетной точки тела, град;

q - эффективная тепловая мощность источника, Вт;

λ - и т.д.

3. Используя [4, 5, 6 или др.] выписать значения коэффициента теплопроводности, плотности, удельной теплоемкости для заданной марки стали в таблицу 3. Если необходимые данные для заданной марки стали в указанных источниках отсутствуют, следует взять эти параметры для стали **близкой по химическому составу** (по содержанию углерода и наиболее важных легирующих элементов). Об использовании данных другой стали необходимо указать в таблице 3.

Рассчитать значения объемной теплоемкости (c_v) и коэффициента температуропроводности (a). Для расчетной схемы «пластина» рассчитать коэффициент (b), учитывающий интенсивность понижения температуры при теплоотдачи в окружающую среду, приняв $\alpha = 0,008$ Вт/(см²К). Данные представить в виде таблицы. **Особое внимание следует уделить размерности выбираемых и рассчитываемых величин.**

Таблица 3. Данные для расчета термического цикла сварки на стали 20Г

λ , Вт/(см·К)	γ г/см ³	C Дж/(кг·град)	$c\gamma$, Вт/(см ³ ·град)	a , см ² /с	b , 1/с	α , Вт/(см ² ·К)
0,78	7,83 взято для стали 20Х	0,525	4,11	0,18	0,019	0,008

4. Используя [7 или 8 (в зависимости от Вашего задания в табл. 7)] выписать в таблицу значения критических точек для заданной марки стали. Скопировать, необходимую для дальнейшей работы, диаграмму распада переохлаждённого аустенита.

Таблица 4. Критические точки стали

$A_{сз}$, °С	$A_{с1}$, °С	M_n , °С
870	730	410

5. Произвести расчет термического цикла сварки для точки расположенной в зоне термического влияния. Данные привести в виде **таблицы и графика.**

Например:

Таблица 5. Расчет термического цикла сварки для точки с координатой $y=1$ см.

x , см	τ , с	R , см	$\frac{q}{2\pi\lambda R}$	$\exp\left\{-\frac{V}{2a} \cdot (x + R)\right\}$	$\Delta T(R, x)$
-10	39,6	10,05	1079,14	0,85121	918,58
-9,5	37,8	9,55	1135,33	0,844061	958,29
-9	36	9,06	1197,66	0,836196	1001,48
-8,5	34,2	8,56	1267,17	0,827501	1048,58
-8	32,4	8,06	1345,19	0,817838	1100,14
-7,5	30,6	7,57	1433,35	0,807039	1156,77
-7	28,8	7,07	1533,75	0,794893	1219,17
-6,5	27	6,58	1649,10	0,781136	1288,17
-6	25,2	6,08	1782,95	0,765427	1364,72
-5,5	23,4	5,59	1940,06	0,747331	1449,86
-5	21,6	5,10	2126,93	0,726272	1544,73
-4,5	19,8	4,61	2352,66	0,701481	1650,35
-4	18	4,12	2630,36	0,671912	1767,37
-3,5	16,2	3,64	2979,42	0,636116	1895,26
-3	14,4	3,16	3429,57	0,592057	2030,50
-2,5	12,6	2,69	4027,82	0,53685	2162,34
-2	10,8	2,24	4850,14	0,466502	2262,60
-1,5	9	1,80	6015,86	0,376078	2262,43
-1	7,2	1,41	7668,74	0,262396	2012,25
-0,5	5,4	1,12	9700,28	0,135846	1317,74
0,1	3,24	1,00	10791,42	0,028182	304,12
0,5	1,8	1,12	9700,28	0,005374	52,13
1	0	1,41	7668,74	0,000411	3,15

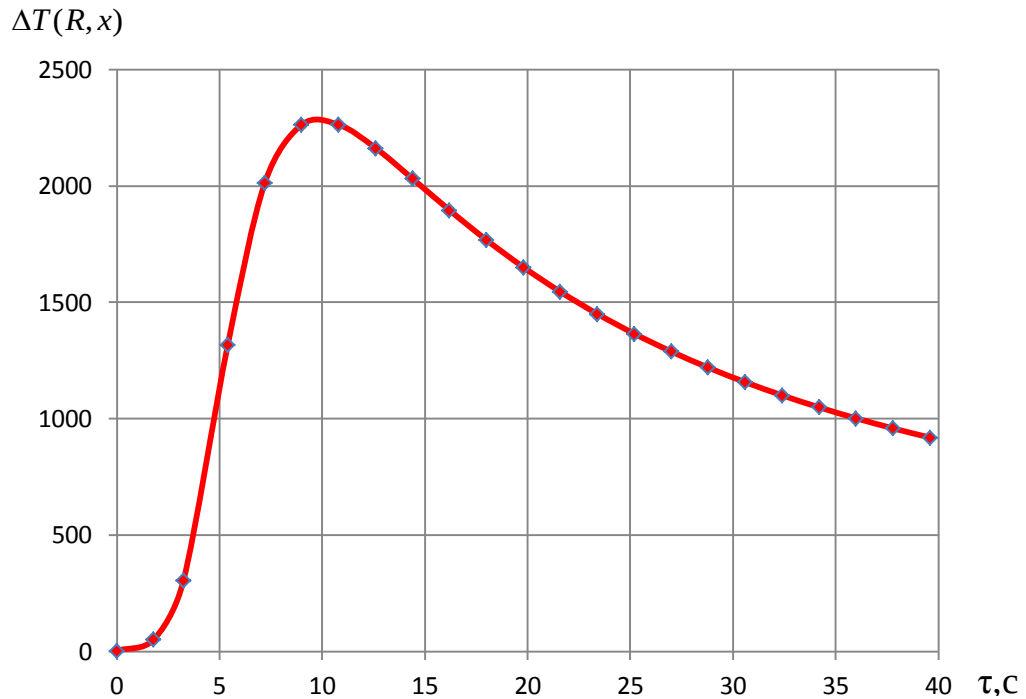


Рис.6 Термический цикл сварки в точке удаленной на 1 см от оси шва

6. Рассчитать время достижения критических точек на кривой охлаждения. Рекомендуется использовать функцию **подбора параметра** (MS Excel: Данные → Анализ «что если» → Подбор параметра)

Таблица 6.

Температура	Время
870	42.02
730	50.75
410	92.74

7. Построить ветвь охлаждения термического цикла сварки в диапазоне температур $A_{с3} \rightarrow M_n$ (-50...100°). Ось времени представить на логарифмической шкале. Поскольку логарифм нуля не определен ось времени следует начать со значения 1 секунда. Значению 1 сек принять температуру от охлаждения ниже точки $A_{с3}$ (в рассмотренном примере это **42.02 с** от начала сварки).

Рядом с расчетными данными привести изображение диаграммы распада переохлаждённого аустенита. Используя масштабирование изображения **добиться одинакового масштаба на осях температуры и времени** на расчетных и справочных данных, как показано на рис.7.

8. Сделать выводы по структуре и твердости в расчетной точке зоны термического влияния. Оформить отчет о проделанной работе.

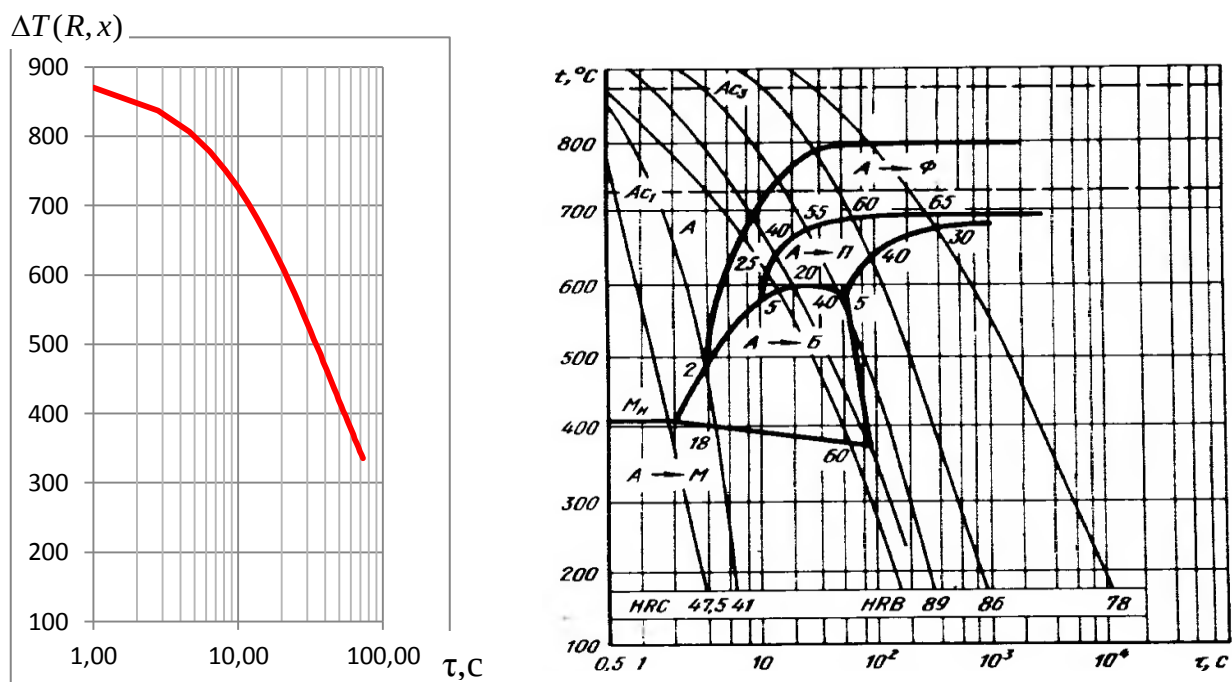


Рис.7 Термический цикл сварки и диаграмма распада переохлажденного аустенита.

7.ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ 1

Таблица 7.

№	I, A	U, B	η	V, м/ч	Материал	Расчетная схема	Ф.И.О.
1	330	30	0.7	30	Сталь 10 [7, рис.105]	полубесконечное тело	Архипов Денис Алексеевич
2	350	28	0.7	32	Сталь 10 [7, рис.106]	пластина $\delta=5$ мм	Бобров Василий Витальевич
3	270	25	0.7	25	Сталь 15 [8, стр. 153 рис.V.1]	полубесконечное тело	Бронских Иван Алексеевич
4	250	21	0.7	20	Сталь 15 [8, стр. 153 рис.V.1]	пластина $\delta=6$ мм	Булаев Иван Сергеевич
5	330	30	0.7	30	Сталь 20Г [8, стр. 153 рис.V.2]	полубесконечное тело	Воронин Иван Владимирович
6	260	24	0.7	23	Сталь 20Г [8, стр. 153 рис.V.2]	пластина $\delta=5$ мм	Гаёв Максим Васильевич
7	300	28	0.7	22	Сталь 10Г2 [8, стр. 166 рис.V.4]	полубесконечное тело	Гартман Александр Александрович
8	280	24	0.7	22	Сталь 10Г2 [8, стр. 166 рис.V.4]	пластина $\delta=4$ мм	Голубев Максим Артёмович
9	350	30	0.7	30	Сталь 18ХГ [8, стр. 167 рис.V.6]	полубесконечное тело	Ершов Никита Владимирович
10	330	28	0.7	29	Сталь 18ХГ [8, стр. 167 рис.V.6]	пластина $\delta=4$ мм	Жарков Михаил Сергеевич
11	370	27	0.6	28	Сталь 20ХМ [8, стр. 167 рис.V.8]	полубесконечное тело	Живущих Данил Алексеевич

12	370	27	0.6	28	Сталь 20ХМ [8, стр. 167 рис.V.8]	пластина $\delta=5$ мм	Журавлев Антон Александрович
13	320	26	0.7	16	Сталь 15ХФ [8, стр. 168 рис.V.10)	полубесконечное тело	Забелин Максим Сергеевич
14	320	26	0.7	18	Сталь 15ХФ [8, стр. 168 рис.V.10)	пластина $\delta=5$ мм	Караев Владислав Сергеевич
15	500	28	0.7	25	Сталь 45 [8, стр. 177 рис.V.27)	полубесконечное тело	Киселев Андрей Анатольевич
16	500	28	0.9	25	Сталь 45 [8, стр. 177 рис.V.27)	пластина $\delta=6$ мм	Комаровский Владимир Владимирович
17	450	30	0.8	12	Сталь 45Х [8, стр. 197 рис.V.37)	полубесконечное тело	Коршунов Игорь Юрьевич
18	430	30	0.8	12	Сталь 45Х [8, стр. 197 рис.V.37)	пластина $\delta=8$ мм	Косачев Михаил Андреевич
19	400	25	0.8	15	Сталь 35ХМ [8, стр. 197 рис.V.39)	полубесконечное тело	Костяев Данил Алексеевич
20	420	28	0.8	15	Сталь 35ХМ [8, стр. 197 рис.V.39)	пластина $\delta=8$ мм	Кузьмич Кирилл Станиславович
21	450	30	0.8	12	Сталь 40 [7, рис.117]	полубесконечное тело	Перевалов Сергей Андреевич
22	500	32	0.9	34	Сталь 20Г [7, рис.125]	пластина $\delta=6$ мм	Полунов Николай Викторович
23	500	32	0.7	34	Сталь 08Г [7, рис.123]	полубесконечное тело	Пронина Кристина Владимировна
24	300	30	0.7	30	Сталь 20Г2 [7, рис.138]	полубесконечное тело	Савчук Антон Викторович
25	420	28	0.7	32	Сталь 40Г2 [7, рис.143]	пластина $\delta=12$ мм	Сергеев Никита Сергеевич
26	450	30	0,75	10	Сталь 35Х [7, рис.159]	полубесконечное тело	Фокин Илья Вячеславович
27	300	30	0.7	30	Сталь 45Х [7, рис.164]	пластина $\delta=4$ мм	Шабалин Данил Валерьевич
28	300	30	0.7	30	Сталь 20М [7, рис.201]	полубесконечное тело	Шляпников Евгений Юрьевич
29	560	30	0.75	10	Сталь 25Н3 [7, рис.185]	пластина $\delta=10$ мм	
30	250	22	0.7	23	Сталь 15М [7, рис.198]	пластина $\delta=6$ мм	

8. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ХАРАКТЕРНЫХ УЧАСТКОВ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ

1.Оформить в виде таблицы задание к практической работе, данные режима сварки и материала взять из табл. 10 . Ознакомится с материалом раздела 4 данного пособия.

Таблица 8. Исходные данные

I, А	U, В	η	V, м/ч	Материал

2. Рассчитать значения $c\gamma$ ($c\sigma$) и q

3. Определить ширину зоны термического влияния, ограниченную температурой 473 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 293 К.

Определить размеры остальных участков зоны термического влияния для данного случая мощного быстродействующего точечного источника на полубесконечном теле.

Температурные границы участков ЗТВ принять следующие:
 сварной шов..... ограничен изотермой 1793 К;
 околошовный участок (участок крупного зерна).....1793-1273 К;
 участок полной перекристаллизации (нормализации).....1273 - A_{c3} К;
 участок неполной перекристаллизации..... A_{c3} - A_{c1} К;
 участок рекристаллизации..... A_{c1} -773 К;
 участок синеломкости.....773-473 К.

На рисунке указать рассчитанные размеры шва и ЗТВ (см. рис.8) для первого способа схематизации.

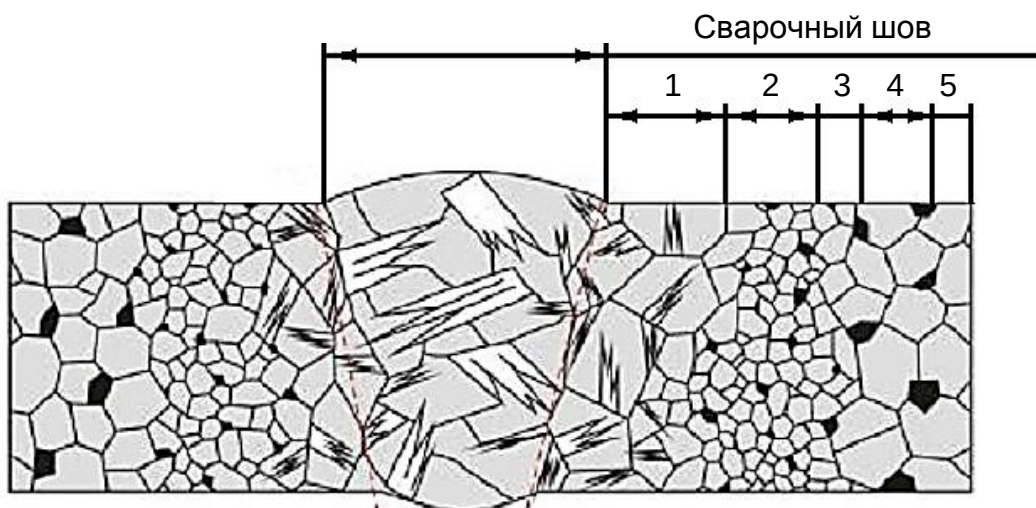


Рис.8 Схематическое изображение сварного шва и участков зоны термического влияния. (1 - околошовный участок; 2- участок полной перекристаллизации; 3 - участок неполной перекристаллизации; 4 - участок рекристаллизации; 5 - участок синеломкости)

4. Определить размеры шва и участков зоны термического влияния для случая сварки с полным проплавлением пластины из низкоуглеродистой

стали мощным быстродвижущимся линейным источником. Начальная температура пластины – 293 К, **толщина пластины $\delta=5$ мм**

Выполнить аналогичный рисунок с новыми рассчитанные размеры шва и ЗТВ (см. рис.8) для второго способа схематизации.

5. Полученные данные представить в виде таблицы. Сделать выводы по влиянию выбора расчетной схемы на расчетные размеры зоны термического влияния. Сделать выводы необходимости обоснованного выбора расчетных схем при сварке в части погрешности оценки размеров ЗТВ. Оформить отчет о проделанной работе.

Таблица 9. Сравнение результатов расчетов по разным схемам.

№	Название участка	Размеры сварного шва и зоны термического влияния, мм		Разность
		Расчетная схема 1. Мощный быстродвижущийся точечный источник на массивном теле	Расчетная схема 2. Мощный быстродвижущийся линейный источник в пластине	
1.	Сварной шов			
2.	Околошовный участок			
3.	Участок полной перекристаллизации			
4.	Участок неполной перекристаллизации			
5.	Участок рекристаллизации			
6.	Участок синеломкости			

9. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ 2

Таблица 10.

№	I, А	U, В	η	V, м/ч	Материал	Ф.И.О.
1	330	30	0.7	30	Сталь 10 [7, рис.105]	Архипов Денис Алексеевич
2	350	28	0.7	32	Сталь 10 [7, рис.106]	Бобров Василий Витальевич
3	270	25	0.7	25	Сталь 15 [8, стр. 153 рис.V.1]	Бронских Иван Алексеевич
4	250	21	0.7	20	Сталь 15 [8, стр. 153 рис.V.1]	Булаев Иван Сергеевич
5	330	30	0.7	30	Сталь 20Г [8, стр. 153 рис.V.2]	Воронин Иван Владимирович
6	260	24	0.7	23	Сталь 20Г [8, стр. 153 рис.V.2]	Гаёв Максим Васильевич
7	300	28	0.7	22	Сталь 10Г2 [8, стр. 166 рис.V.4]	Гартман Александр Александрович
8	280	24	0.7	22	Сталь 10Г2	Голубев Максим

					[8, стр. 166 рис.V.4]	Артёмович
9	350	30	0.7	30	Сталь 18ХГ [8, стр. 167 рис.V.6]	Ершов Никита Владимирович
10	330	28	0.7	29	Сталь 18ХГ [8, стр. 167 рис.V.6]	Жарков Михаил Сергеевич
11	370	27	0.6	28	Сталь 20ХМ [8, стр. 167 рис.V.8]	Живущих Данил Алексеевич
12	370	27	0.6	28	Сталь 20ХМ [8, стр. 167 рис.V.8]	Журавлев Антон Александрович
13	320	26	0.7	16	Сталь 15ХФ [8, стр. 168 рис.V.10]	Забелин Максим Сергеевич
14	320	26	0.7	18	Сталь 15ХФ [8, стр. 168 рис.V.10]	Караев Владислав Сергеевич
15	500	28	0.7	25	Сталь 45 [8, стр. 177 рис.V.27]	Киселев Андрей Анатольевич
16	500	28	0.9	25	Сталь 45 [8, стр. 177 рис.V.27]	Комаровский Владимир Владимирович
17	450	30	0.8	12	Сталь 45Х [8, стр. 197 рис.V.37]	Коршунов Игорь Юрьевич
18	430	30	0.8	12	Сталь 45Х [8, стр. 197 рис.V.37]	Косачев Михаил Андреевич
19	400	25	0.8	15	Сталь 35ХМ [8, стр. 197 рис.V.39]	Костяев Данил Алексеевич
20	420	28	0.8	15	Сталь 35ХМ [8, стр. 197 рис.V.39]	Кузьмич Кирилл Станиславович
21	450	30	0.8	12	Сталь 40 [7, рис.117]	Перевалов Сергей Андреевич
22	500	32	0.9	34	Сталь 20Г [7, рис.125]	Полунов Николай Викторович
23	500	32	0.7	34	Сталь 08Г [7, рис.123]	Пронина Кристина Владимировна
24	300	30	0.7	30	Сталь 20Г2 [7, рис.138]	Савчук Антон Викторович
25	420	28	0.7	32	Сталь 40Г2 [7, рис.143]	Сергеев Никита Сергеевич
26	450	30	0,75	10	Сталь 35Х [7, рис.159]	Фокин Илья Вячеславович
27	300	30	0.7	30	Сталь 45Х [7, рис.164]	Шабалин Данил Валерьевич
28	300	30	0.7	30	Сталь 20М [7, рис.201]	Шляпников Евгений Юрьевич
29	560	30	0.75	10	Сталь 25Н3 [7, рис.185]	
30	250	22	0.7	23	Сталь 15М [7, рис.198]	

9. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СВАРКИ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ НА ЗАДАННОМ РЕЖИМЕ

При нагреве сваркой участков основного металла, прилегающих ко шву выше температуры A_{c1} , в них образуется аустенит. При охлаждении аустенит распадается с образованием различных фаз: мартенсита, бейнита, троостита, сорбита или перлита. Мартенсит и бейнит обладают повышенной твердостью и хрупкостью. 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 продукты распада необходимо время. Оно должно быть больше критического и может быть определено из следующих эмпирических выражений:

$$t_{кр}(50\%M) = 5,32 \cdot 10^{-3} Дз [\%C] (K_{Si} \cdot K_{Mn} \dots K_{П})^2 \quad (14)$$

$$t_{кр}(95\%M) = 1,07 \cdot 10^{-3} Дз [\%C] (K_{Si} \cdot K_{Mn} \dots K_{П})^2 \quad (15)$$

где $Дз$ – коэффициент, учитывающий склонность к закалке стали с разным размером зерна аустенита (таблица 11);

$[\%C]$ – содержание углерода в стали, % масс.

$K_{Si}, K_{Mn} \dots K_{П}$ – коэффициенты, учитывающие влияние легирующих элементов на прокаливаемость стали.

Таблица 11. Коэффициенты для учета влияние зерна аустенита на прокаливаемость стали при сварке

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

$$K_{П} = 1 + \alpha [\%Me] \quad (16)$$

где – $[\%Me]$ концентрация легирующего элемента в стали, %масс.,

α – коэффициент, учитывающий влияние данного элемента на прокаливаемость (таблица 12).

Таблица 12. Значения коэффициентов, учитывающих влияние химических элементов на прокаливаемость стали при сварке

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

Таблица 12. Продолжение

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 13). $t_{кр}$

Таблица 13. Группы стали по прокаливаемости

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

По расчетным значениям $t_{кр}$ (50%M) можно отнести сталь к соответствующей группе. Для слабопрокаливающихся сталей оптимизировать режим сварки, а для прокаливающихся – определить температуру подогрева при сварке (если это не достаточно – оптимизировать режим – изменить, в разумных пределах, параметры теплового воздействия). 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

$$t_{2pa} = 4,62 \cdot 10^{-3} K_u \left(\frac{q}{V\delta} \right) \quad (17)$$

Для случая дуговой наплавки валика на массивное тело

$$t_{3pa} = 15,96 \cdot 10^{-4} Ku \left(\frac{q}{V} \right) \quad (18)$$

где Ku – поправочный коэффициент, учитывающий геометрические условия теплоотвода (таблица 14).

Таблица 14 – 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 Ku	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

$$t_{pa} > t_{кр} 50\%M \quad (19)$$

В случае невыполнения этого условия корректируют режимы сварки (погонную энергию). Полученное значение погонной энергии необходимо проверить на условие роста зерна:

$$t_{pa} > t_{pa.кр} \quad (20)$$

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:

$$t_{2pa} = k_2 \frac{8}{\lambda c \rho} \left[\frac{q/v}{\delta(T_{нпрз} - T_H)} \right]^2 \quad (21)$$

$$t_{3pa} = k_1 \frac{2q/v}{\lambda(T_{нпрз} - T_H)} \quad (22)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, определяемые по номограмме;
 T_H – температура металла перед сваркой;
 $T_{нирз}$ – температура начала интенсивного роста зерна аустенита.

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 закаливающихся сталей. Предварительный подогрев увеличивает длительность распада аустенита в большей степени, чем время роста зерна. Оптимальную температуру подогрева можно выбрать по величине K_n :

$$K_n = \frac{t_{pa, xp} \cdot 50\%M}{t_{pa}} \quad (23)$$

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

Для выбора температуры подогрева необходимо воспользоваться сведениями, приведенными в таблице 15.

Таблица 15 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, °C		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 15.

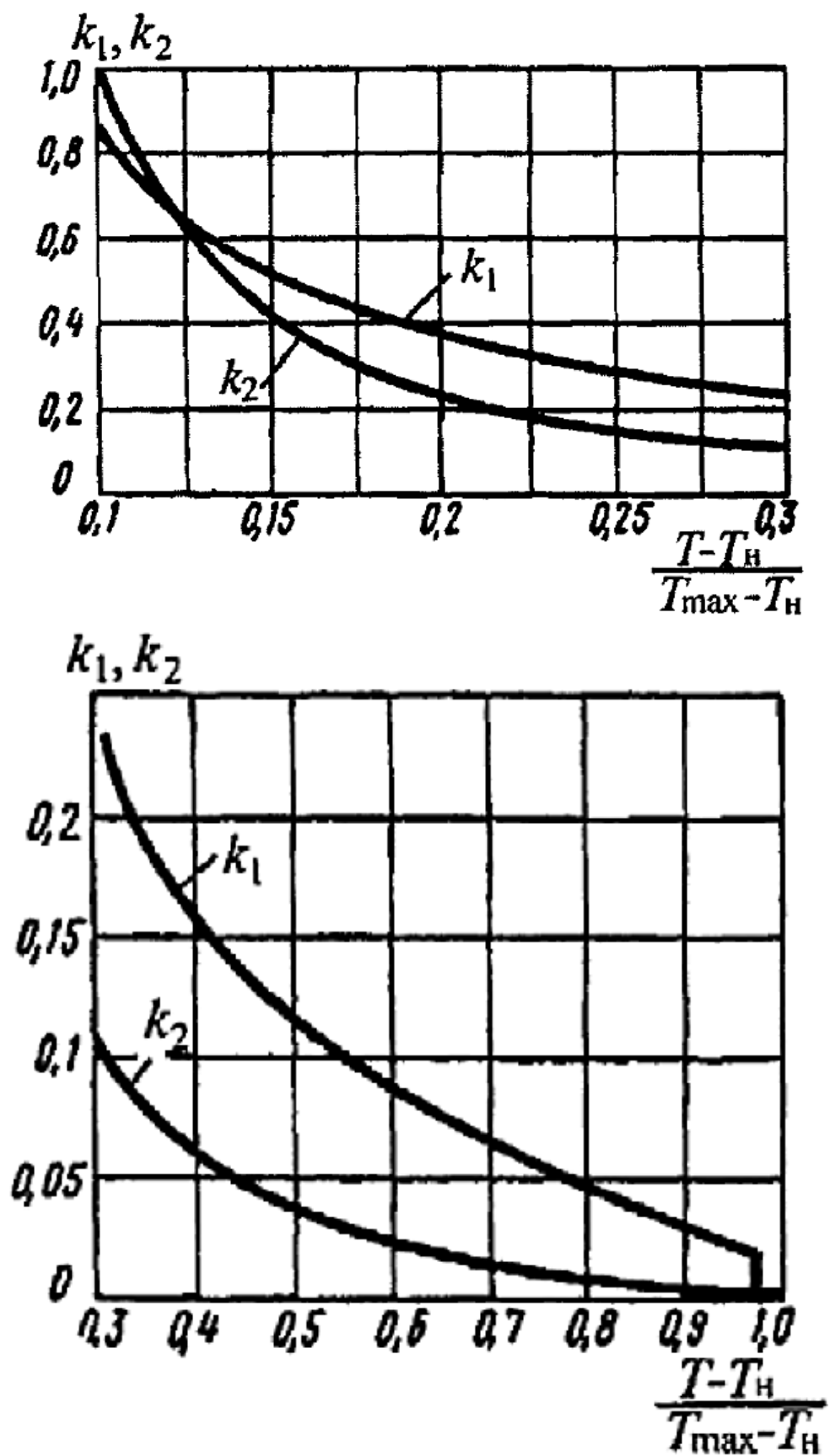


Рис. 9 – Номограммы для определения k_1 и k_2 при однократной сварке

Порядок выполнения задания

1. Оформить в виде таблицы задание к практической работе, данные режима сварки взять из табл.10. Ознакомиться с материалом раздела 9 данного пособия.

Таблица 16. Исходные данные

I, A	U, В	η	V, м/ч

2. В соответствии с номером задания см. табл. 10 выбрать материал из табл. 17

Таблица 17. Стали, восприимчивые к закалке при воздействии нагрева сварочным источником теплоты

№	Сталь	№	Сталь	№	Сталь
1	30ХГСА	11	14Х2Н3МА	21	35ХМ
2	38ХА	12	4ХМФС	22	12Х13
3	30ХН3А	13	30Х2ГМТ	23	40ХФА
4	5ХНМ	14	25Х2М1Ф	24	У8
5	40Х	15	55Х	25	45ХН
6	34ХН3МА	16	38ХС	26	9ХС
7	5ХГМ	17	50ХФА	27	4Х5ФМС
8	40Г2	18	60ХН	28	У10А
9	65Г	19	38Х2МЮА	29	40ХН2МА
10	60С2	20	70	30	У12

3. Используя [4...6] выписать химический состав и значения коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости для заданной марки стали. Если необходимые данные для заданной марки стали в указанных источниках отсутствуют, следует взять эти параметры для стали **близкой по химическому составу** (по содержанию углерода и наиболее важных легирующих элементов). Об использовании данных другой стали необходимо указать.

4. Задать исходный размер зерна стали (2...6 балл). Используя формулы (14...16) рассчитать значения $t_{кр}$ (50%М) и $t_{кр}$ (95%М). Определить к какой группе по прокаливаемости относится сталь.

5. Рассчитать значения $t_{ра}$ для условий пластины и полубесконечного тела. При необходимости предложить корректировку режима сварки, добившись выполнения соотношений (19...20) Для мелкозернистых

низколегированных и углеродистых сталей принять $t_{ра.кр}$ равное 10 с. Для легированных сталей $t_{ра.кр}$ принять равным 5 с.

6. Используя формулы (21...22) рассчитать время пребывания металла при температуре роста зерна.

При расчете безразмерного критерия $(T_{нурз} - T_n)/(T_{max} - T_n)$, за T_{max} принять температуру ликвидус T_l для заданной стали, $T_{нурз}$ принять 1000°C .

$$T_l = 1534 - t_{сн}, ^\circ\text{C} \quad (24)$$

где $t_{сн}$ – снижение температуры плавления железа из-за присутствия в нем примесей которое определяется по формуле:

$$t_{сн} = K_C [\%C] + K_{Mn} [\%Mn] + K_{Si} [\%Si] + \dots + K_n [\%n], ^\circ\text{C} \quad (25)$$

Таблица 18. Значения эмпирических коэффициентов для соответствующих химических элементов, позволяющих приближенно определить температуру ликвидус стали

Элемент	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	W	V	Cu	Al	Co
K_n	73	12	3	30	30	3,5	1,3	3	1	2	4.7	3.6	2.3

7. Назначьте температуру подогрева по данным таблицы 15.

8. Полученные данные представить в виде таблицы. Сделать выводы по влиянию схематизации источника нагрева на расчетные параметры. Оформить отчет о проделанной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

2. Шевченко О.И. Тепловые расчеты при сварке: методическое руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Теория сварочных процессов» / Шевченко О.И. - Нижний Тагил: НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2014. — 40.

3. Лупачев А.Г Теория сварочных процессов. Методические указания к практическим заданиям №1-5 / М-во образования и науки РФ, ГОУ ВПО «Белорусско-Российский университет» – Могилев: Белорус.- Рос. ун-т, 2015. – 14 с.

4. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др; Под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.

5. Сорокин В.Г., Гervasьев М.А., Палеев В.С. и др. Стали и сплавы. Под ред. В. Г. Сорокина и М.А. Гervasьева Марочник. М: Интермет инжиниринг, 2001, — 608 с.

6. Марочник сталей и сплавов. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко – М.: Машиностроение 2014. — 1216 с.

7. Попова Л.Е, Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана. Справочник, М.: "Металлургия", 1991. - 503 с.

8. Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы. Справочник, М.: "Металлургия", 1991. - 648 с.

Оценка _____

Дата защиты _____

ОТЧЕТ о практической работе

(тема)

по дисциплине _____

Преподаватель:
доцент, д-р техн. наук

Шевченко О.И: _____
Подпись

Студент:

Фамилия И.О.

Подпись

Группа: _____

Нижний Тагил
20__