

# ОБЪЕМНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СХЕМЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПО ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ НАПЛАВКЕ ШЕЙКИ ОСИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ



А.В. Людаговский



В.А. Полухин

Проведено изучение объемной картины соответствия выбранной схемы разложения заданного сплошного цилиндра на эквивалентную пластину. Рассчитаны температурные поля, образовавшиеся от действия движущегося точечного источника тепла на поверхности заданного сплошного цилиндра по винтовой линии заданного шага и эквивалентной пластины в зависимости от глубины исследуемого слоя.

*Ключевые слова:* электромагнитная наплавка, температура, эквивалентная пластина, источник тепла

Для изучения объемной картины соответствия выбранной схемы разложения заданного сплошного цилиндра на эквивалентную пластину [1–3], проведем исследование температурных полей, образовавшихся от действия движущегося точечного источника тепла на поверхности заданного сплошного цилиндра по винтовой линии заданного шага и, соответственно, согласно схеме разложения, эквивалентной пластины в зависимости от глубины исследуемого слоя.

Рассмотрим задачу определения температур предельного состояния точек заданного сплошного цилиндра, при наплавке шагом  $h=10$  мм, находящихся на глубине в диапазоне  $0...30$  мм от поверхности и на расстоянии  $x_0$  в диапазоне  $0,10...170$  мм позади источника теплоты при установившемся процессе. Источник теплоты, в рассматриваемый момент времени, переместился за плоскость  $I-I$ , где находятся

исследуемые точки, на угол  $\varphi=\pi/2$  (четверть окружности) (рис. 1).

Рассмотреть поставленную задачу необходимо на заданном сплошном цилиндре и эквивалентной пластине, а затем сравнить полученные результаты.

Согласно продольному размеру наплавочной поверхности (размер шейки стандартной оси вагонов широкой колеи типа РУ1) [4] и принятому шагу наплавки  $h$  получим число оборотов (проходов) (рис. 2):

$$N=L/h=170\text{мм}/10\text{мм}=17. \quad (1)$$

Теплофизические параметры и параметры наплавки, размеры, принимаем соответственно ранее изученному случаю.

При движении быстродвижущегося точечного источника теплоты на поверхности заданного сплошного цилиндра по винтовой линии малого шага  $h$ , температура исследуемой точки  $B$ , выразится суммой

**Людаговский Андрей Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: технологии разработки и применения композиционных материалов различных классов на транспорте, методы соединения, восстановления и изучения износа деталей, узлов и механизмов на транспорте. Автор 93 научных работ.

**Полухин Владимир Анатольевич**, начальник Брестского цеха производственного унитарного предприятия «Брествторчермет» ОАО «Белвторчермет». Область научных интересов: разработка технологических методов и установок для нанесения износостойких покрытий, изучение термических и деформационных явлений при нанесении покрытий. Автор 18 научных работ.

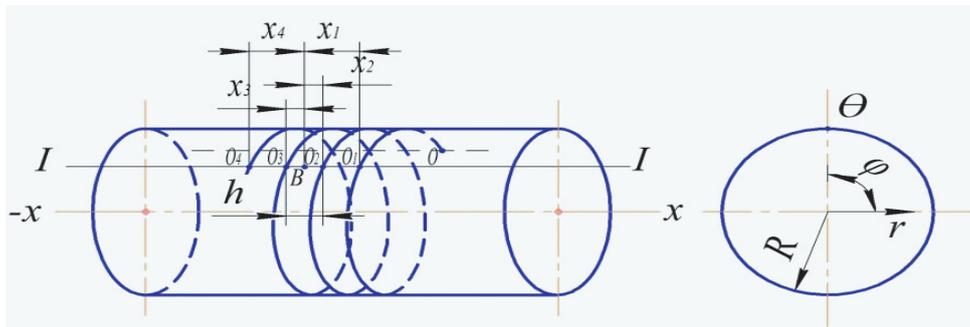


Рис. 1. Схема движения и расположения точечного источника теплоты при нагреве сплошного цилиндра

температур от мгновенных кольцевых источников, а в случае эквивалентной пластины – проходов, расположенных на различных расстояниях  $x$  от данной точки, имеющих, соответственно, различное время  $t$ , прошедшее с момента их выделения при пересечении плоскости  $I-I$ .

Для сплошного цилиндра с учетом уравнения (2):

$$T = \frac{2q}{\nu R c \rho} \Phi(r, t) e^{-\frac{x^2}{4at} - bt}, \quad (2)$$

имеем

$$T_{N_0 \text{ ц}} = \frac{2q}{\nu R c \rho} \sum_{n=1}^N \Phi(r, t_n) e^{-\frac{x_n^2}{4at_n} - bt_n}, \quad (3)$$

где  $x_n$  – расстояние до точки  $B$  в плоскости  $I-I$  при различных оборотах (проходах), соответственно  $x_1, x_2, x_3$  и т.д.;

$t_n$  – время, прошедшее с момента пересечения источника теплоты плоскости  $I-I$  при соответствующих оборотах (проходах), нумерация ведется от последнего;

$N$  – число оборотов (проходов);

$n$  – номер оборота (прохода).

Для эквивалентной пластины [5] с учетом уравнения (4):

$$T_{\text{пл}} = \frac{q}{\nu \delta c \rho} F(z, t) e^{-\frac{x^2}{4at} - bt}, \quad (4)$$

имеем

$$T_{N_0 \text{ пл}} = \frac{q}{\nu \delta c \rho} \sum_{n=1}^N F(z, t_n) e^{-\frac{x^2}{4at_n} - bt_n}. \quad (5)$$

Предельная температура  $T_{\text{пр}}$  находится в подвижных координатах, начало которых совпадает с источником теплоты и вычисляется согласно [5]:

• для заданного сплошного цилиндра:

$$T_{\text{пр ц}} = \frac{q}{c \rho \nu x \pi R^2 \sqrt{1 + \frac{4ba}{\nu^2}}} e^{\frac{\nu x x_0}{2a} - \frac{\nu x |x_0|}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{\nu^2}}}; \quad (6)$$

• для эквивалентной пластины:

$$T_{\text{пр пл}} = \frac{q}{c \rho \nu x F \sqrt{1 + \frac{4ba}{\nu^2}}} e^{\frac{\nu x x_0}{2a} - \frac{\nu x |x_0|}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{\nu^2}}}, \quad (7)$$

где  $\nu x$  – продольная скорость наплавки:

$$\nu x = \frac{h}{t_{\text{об}}} \left( \frac{\text{мм}}{\text{с}} \right). \quad (8)$$

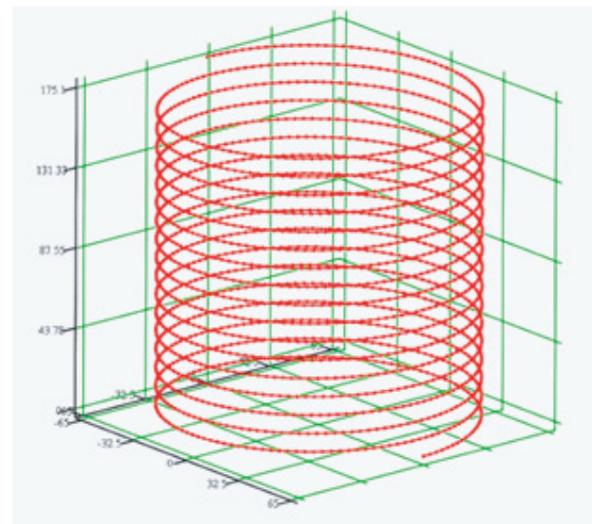


Рис. 2. Винтовые линии заданного сплошного цилиндра при принятом шаге наплавки

Температура исследуемых координатных точек с учетом значений предельной температуры, суммой температур от всех мгновенных источников и учетом начальной температуры составит:

- для заданного сплошного цилиндра:

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{пр ц}} + T_{N_0 \text{ ц}} + T_0 ; \quad (9)$$

- для эквивалентной пластины:

$$T_{\text{пл}} = T_{\text{пр пл}} + T_{N_0 \text{ пл}} + T_0 . \quad (10)$$

Результаты расчета тепловых полей исследуемых координатных точек заданного сплошного цилиндра и эквивалентной пластины сведены в табл. 1, 2 и представлены на графиках (рис. 3, 4).

После исследования и сравнения температур координатных точек рассматриваемых случаев, полученных от действия точечного источника по винтовой линии заданного шага, определено, что результаты отличаются немногим более 5,5% от точки действия

источника на поверхности по окончании наплавки и убывает по оси  $x$  от начала наплавки до 0,06%.

При глубине исследования 30 мм, соответственно от точки действия окончания наплавки не многим более 0,8%, убывает по оси  $x$  от начала наплавки до 0,06%.

Распространение теплоты в сплошном круглом цилиндре при воздействии по его поверхности нормально-кругового или линейного источника теплоты, каким является процесс электромагнитной наплавки (далее – ЭМН) описывается сложными зависимостями. С целью упрощения расчетов, предложена схема разложения сплошного цилиндра на эквивалентную пластину, т.к. математические модели расчета тепловых полей в пластине намного проще. Данные исследования в полной мере обосновывают возможности применения схемы разложения для расчета температурных полей по воздействию процесса ЭМН на заданный сплошной цилиндр соответствующий размеру восстановления шейки оси колесной пары. 

Таблица 1

**Данные исследования температур рассматриваемых координатных точек  
сплошного цилиндра и эквивалентной пластины, полученных  
от действия точечного источника теплоты.  $x=x_0, z=0$  мм**

Расстояние по оси $x$ (мм) от последнего кольцевого источника (прохода)	Температура координатной точки заданного сплошного цилиндра, К	Температура координатной точки эквивалентной пластины, К	Отличие, %
0	543,73	513,59	5,54
10	492,74	469,80	4,66
20	427,52	413,63	3,25
30	381,59	373,74	2,06
40	356,09	351,19	1,38
50	340,60	337,19	1,00
60	329,37	326,90	0,75
70	320,74	318,91	0,57
80	314,12	312,73	0,44
90	309,08	308,01	0,35
100	305,26	304,42	0,28
110	302,36	301,69	0,22
120	300,16	299,62	0,18
130	298,49	298,05	0,15
140	297,22	296,86	0,12
150	296,25	295,97	0,09
160	295,52	295,29	0,08
170	294,96	294,78	0,06

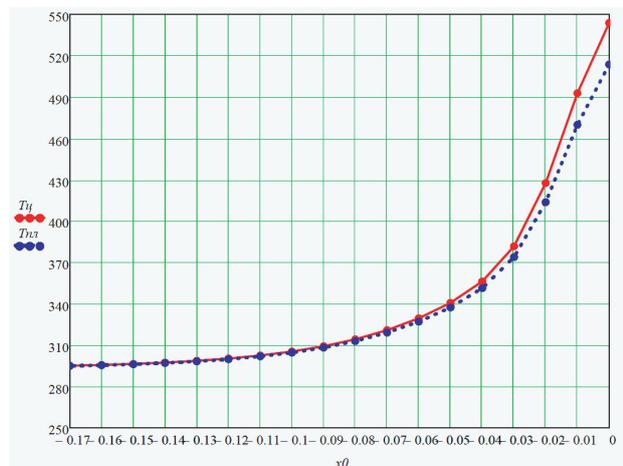


Рис. 3. График сравнения температурных полей исследуемых координатных точек сплошного цилиндра и эквивалентной пластины, согласно табл. 1

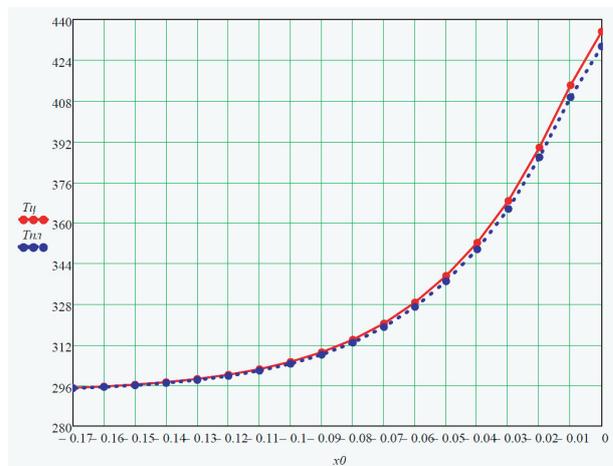


Рис. 4. График сравнения температурных полей исследуемых координатных точек сплошного цилиндра и эквивалентной пластины, согласно табл. 2.

Таблица 2

**Данные исследования температур рассматриваемых координатных точек сплошного цилиндра и эквивалентной пластины, полученных от действия точечного источника теплоты при заданном количестве оборотов (проходов) в исследуемом диапазоне по оси  $x$  на расстоянии  $x_0$  позади источника теплоты, глубиной исследования  $z=30$  мм, при установившемся процессе.  $x=x_0, z=30$  мм**

Расстояние по оси $x$ (мм) от последнего кольцевого источника (прохода)	Температура координатной точки заданного сплошного цилиндра, К	Температура координатной точки эквивалентной пластины, К	Отличие, %
0	435,25	429,39	1,35
10	414,13	409,39	1,14
20	389,63	385,73	1,00
30	368,59	365,37	0,87
40	352,14	349,50	0,75
50	339,07	336,91	0,64
60	328,60	326,83	0,54
70	320,32	318,88	0,45
80	313,90	312,72	0,38
90	308,98	308,01	0,31
100	305,21	304,42	0,26
110	302,34	301,69	0,21
120	300,15	299,62	0,18
130	298,48	298,05	0,14
140	297,22	296,87	0,12
150	296,25	295,97	0,09
160	295,52	295,29	0,08
170	294,96	294,78	0,06

## Литература

1. Распределение температур на границе раздела «материал-покрытие» от быстродвижущегося источника тепловыделения при электромагнитной наплавке/ Х.А. Дианов, А.В. Людаговский, А.А. Локтев, В.А. Полухин, В.Г. Дмитриев, Г.В. Москвитин// Проблемы машиностроения и надёжности машин. Ин-т машиноведения им. А.А.Благонравова. —Изд-во РАН. —2019. —№3. —С. 85–95.
2. Расчетные параметры температурных полей в поверхностном слое деталей в процессе электромагнитной наплавки/ Х.А. Дианов, А.В. Людаговский, А.А. Локтев, В.А. Полухин, В.С. Соколов //Наука и техника транспорта. —2018. —№1. —С. 73–78.
3. Построение математической модели температурного поля при наплавке/ А.В. Людаговский, А.А. Локтев, В.А. Полухин, В.С. Соколов, К.Д. Степанов// Сборник вопросов прикладной математики и проблема взаимодействия твердых тел с жидкой и газовой средой. Москва 16–18.10.2017 г. ИПМех РАН.
4. Техническая информация «Регионального Центра Инновационных Технологий». Классификатор неисправностей вагонных колесных пар и их элементов 1.20.002-2007.
5. Теоретические основы сварки [Текст ]: уч. пос. /В.В. Фролов, В.А. Винокуров, В.Н. Волченко, В.А. Парухин, И.А. Арутюнова; Под ред. проф. В.В. Фролова. —М.: Высшая школа, 1970. —592 с.