

## Экспериментальные исследования распределения температуры в тавровых соединениях при сварке

*В.П.Вершинин<sup>1</sup>, И.К.Дмитриев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, Москва*

<sup>2</sup>*Государственный Университет по землеустройству, Москва*

**Аннотация:** В данной статье исследуется распределение температуры по толщине элементов при сварке тавровых соединений угловыми швами. Измерение температуры производилось термопарами с соответствующей записью показаний на осциллографе. Одновременно производилась запись шести термопар, что позволило проследить весь процесс изменения температуры (процесс нагрева и остывания) и определить максимальную температуру в исследуемых точках.

Результаты эксперимента сравнивались с расчетными значениями температуры. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчета показало вполне удовлетворительное совпадение, что дает возможность использовать теорию распространения тепла при сварке Н.Н. Рыкалина к расчету температуры в тавровых соединениях при сварке угловых швов.

**Ключевые слова:** остаточные сварочные напряжения, распределение температуры при сварке, термопары, тавровое соединение с угловыми швами, распределение температуры по толщине элемента, «малые» толщины, «большие» толщины.

### Введение

Известно, что остаточные сварочные напряжения являются следствием неравномерного нагрева изделия при сварке, а распределение сварочных напряжений по поперечному сечению элементов зависит от распределения температуры при сварке. Так, при значительных толщинах элементов конструкций, температура по толщине элементов при сварке распределяется весьма неравномерно. Расчёт сварочных напряжений в этих случаях следует производить с учётом неравномерности распределения температуры по толщине элементов и напряжённое состояние считать объёмным. Однако при сварке поясных швов в стержнях с элементами большой толщины ( $t_f = 20...40$  мм – колонны нижних этажей многоэтажных зданий, бункерных эстакад, промышленных зданий с кранами большой грузоподъемности и др.) Вопрос распределения температуры по толщине элемента является не

---

изученным до настоящего времени. Исследованию распределения температуры при сварке по толщине элементов посвящена данная работа.

Исследованию распределения температуры при сварке в элементах тавровых соединений посвящены работы [1-3]. В этих работах изучалось распределение температуры по ширине полки и стенки тавра, и даются рекомендации по распределению долей тепла сварочной дуги между полкой и стенкой тавра [4-6]. Исследовалось распределение температуры при сварке по ширине элементов при сварке трением, а также влияние температуры на склонность к локальному разрушению сварных соединений [7,8]. Обзор этих работ показал, что распределение температуры при сварке по толщине элементов изучен недостаточно, что привело к необходимости дополнительно изучить этот вопрос.

Экспериментально температуру в данной работе определяли на тавровых образцах (рис.1) из низкоуглеродистой стали длиной 700...1000 мм, ширина полки  $b_f = 250$  мм, высота стенки  $h_w = 180$  мм. Толщина полки  $t_f$  варьировалась от 15 до 40 мм, толщина стенки  $t_w$  от 5 до 20 мм. Сварка производилась сварочным трактором АДФ-1004 в положении в лодочку под флюсом АН 348А сварочной проволокой 08 ГА диаметром 4 мм (рис.2) Толщины соединяемых элементов и параметры сварки представлены в таблице 1.

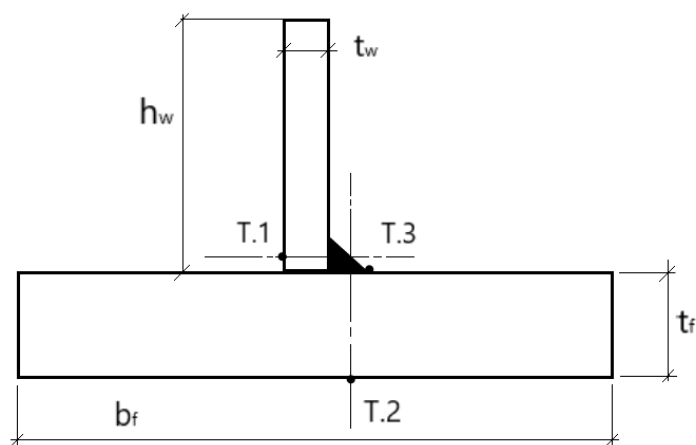


Рисунок 1. Места установки термопар (Т.1, Т.2, Т.3)



Рисунок 2. Общий вид экспериментальной установки

Таблица 1.

Исходные экспериментальные параметры

№ образца	Толщина, мм		Катет шва, $K_f$ , мм	Режим сварки		
	полки $t_f$ , мм	стенки $t_w$ , мм		I св., А	U <sub>г</sub> ., В	v св., см/сек
1	15	5	5-6	600-620	30-32	1,5
2	15	8	5-6	600-620	30-32	1,5
3	20	7	6-7	600-620	30-32	1,33
4	20	10	6-7	680-700	28-30	1,33
5	33	10	7-8	680-700	28-30	0,91
6	33	15	7-8	680-700	28-30	0,91
7	40	15	9-10	750-770	40-42	0,83
8	40	20	9-10	780-800	38-40	0,83
9	33	10	10-11	680-700	38-40	0,83
10	33	15	15-16	800-820	40-42	0,5
11	40	15	15-16	800-820	42-44	0,5
12	40	20	15-16	780-800	40-42	0,5

Температура нагрева элементов таврового соединения определялась при помощи платина-платинородиевых (точка 3) и хромель-алюмелевых (точки 1

и 2) (рис.1) термопар, которые устанавливались в двух сечениях по длине образца на расстоянии 250...300 мм друг от друга (рис.2)

Запись показаний термопар производилась на шлейфовом осциллографе К12-22. Контрольную тарировку термопар производили до и после сварки образцов с соответствующей записью тарировочных кривых на осциллографе. Одновременно производилась запись 6-ти термопар, что позволило проследить весь процесс изменения температуры (процесс нагрева и остывания) и определить максимальную температуру в исследуемых точках.

Для предотвращения влияния электромагнитного поля, возникающего от работы сварочного аппарата, на показания термопар, и работу приборов, термопары закрывались специальными защитными оболочками (экранировались). Защитные оболочки термопар при этом заземлялись.

Теоретически в исследуемых точках была определена температура согласно теории распространения тепла при сварке Н.Н. Рыкалина [9, 10]. Для этого вводимое при сварке таврового соединения тепло сварочной дуги распределяется между стенкой и полкой по формулам (1, 2) [1,11,12].

$$\text{В полку} \quad \frac{q_{\text{Э}f}}{v_{\text{СВ}}} = \frac{q_{\text{Э}}}{v_{\text{СВ}}} \cdot \left( \frac{2t_f}{2t_f + t_w} \right); \quad (1)$$

$$\text{в стенку} \quad \frac{q_{\text{Э}w}}{v_{\text{СВ}}} = \frac{q_{\text{Э}}}{v_{\text{СВ}}} \cdot \left( \frac{t_w}{2t_f + t_w} \right), \quad (2)$$

где  $t_s$  – толщина полки;

$t_w$  – толщина стенки;

$\frac{q_{\text{Э}}}{v_{\text{СВ}}}$  - погонная энергия сварки.

По приближенной формуле для случая быстродвижущегося линейного источника тепла без учета теплоотдачи в окружающую среду температура равна | 9 |:

$$T_{(r;t)} = \frac{q_{\exists}/v_{CB}}{\delta 4\pi \cdot a \cdot c \cdot \gamma \cdot t} \cdot e^{-\frac{r^2}{4at}} \quad (3),$$

где  $r^2 = y^2 + z^2$  – текущая координата,

$\delta$  – толщина свариваемого элемента,

$t$  – период времени после действия источника тепла,

$a$  – коэффициент температуропроводности,

$c\gamma$  – объёмная теплоёмкость.

Толщина свариваемых элементов позволяет не учитывать теплоотдачу в окружающую среду.

Результаты расчета температуры с использованием теории Н.Н. Рыкалина [9, 10], и результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Сопоставление результатов эксперимента с результатами расчёта

№ об раз ца	Толщ ина полки $t_f$ , мм	Толщ ина стенк и $t_w$ , мм	Максимальная температура $T$ в точке 1 и расчетное значение в момент времени $t_1$			Темпера тура в точке 3 в момент времени $t_1$ , $T$ , °C	Максимальная температура $T$ в точке 2 и расчетное значение в момент времени $t_2$			Температ ура в точке 3 в момент времени $t_2$ , $T$ , °C
			$t_1$ , сек	экспер имент $T$ , °C	расчет ное значен ие $T$ , °C		$t_2$ , сек	экспер имент $T$ , °C	расчетное значени е $T$ , °C	
1	15	5	3	570	550	1100	8	320	360	480
2	15	8	3	535	550	1050	12	310	340	480
3	20	7	5	535	470	950	15	250	265	550
4	20	10	6	430	410	750	18	235	250	520
5	33	10	6	600	480	1000	32	135	140	350
6	33	15	12	330	370	800	31	130	135	350
7	40	15	10	500	410	1000	52	130	160	450
8	40	20	20	330	340	700	53	140	145	350
9	33	10	7	650	570	1200	36	145	180	600
10	33	15	13	650	535	1100	38	280	305	750
11	40	15	12	620	530	1000	54	235	270	550
12	40	20	15	360	400	850	51	225	240	420

В таблице 2 приняты следующие обозначения:

- за моменты  $t_1$  и  $t_2$  приняты периоды времени прошедшие от момента времени, соответствующего прохождению источника (сварочной дуги) через расчетное сечение (места установки термопар) до момента времени, когда температура, соответственно, в точках 1 и 2 (рис.1) достигнет максимального значения.

Например, образец №1 (табл.2). Температура в точке 1 (рис.1) достигла своего максимума через  $t_1 = 3$  сек. после прохождения источника через это расчетное сечение (точку), а в точке 2 (рис.1) температура достигла своего максимума через  $t_2 = 8$  сек. после прохождения источника через эту точку.

Из таблицы 2 видно, что результаты расчёта температуры вполне удовлетворительно совпадают с результатами эксперимента, что дает возможность использовать формулу (3) для расчета температуры в тавровых соединениях при сварке. Как эксперимент, так и расчёт показали, что при толщине полки  $t_f > 15...16$  мм и сварке минимально допустимыми катетами полка по толщине прогревается существенно неравномерно. При меньшей толщине полок можно считать, что полка прогревается равномерно по толщине. Таким образом, спектр толщин элементов можно разделить как бы на две группы, в соответствии с распределением температуры в тавровых соединениях при сварке. Первая группа толщин  $t_f \leq 15...16$  мм – «малые» толщины, когда температура по толщине полки при сварке распределена равномерно. Вторая группа толщин  $t_f > 15...16$  мм – «большие» толщины, когда температура по толщине полки распределена неравномерно.

Распределение температуры по толщине стенки  $t_w$  при сварке можно считать равномерным при соотношении  $t_f / t_w > 2$ , для любой толщины полки.

## Выводы

1. Экспериментальные исследования показали возможность использования теории распространения тепла при сварке Н.Н. Рыкалина к расчёту температуры в тавровых соединениях при сварке угловых швов.
2. Спектр толщины листового проката, применяемого в строительстве в соответствии с распределением температуры при сварке тавровых соединений, следует разделить на две группы:
  - в первой группе толщины  $t \leq 15-16$  мм распределение температуры по толщине элементов при сварке тавровых соединений можно считать равномерным.
  - во второй группе толщины  $t > 15-16$  температура распределяется по толщине элементов при сварке тавровых соединений не равномерно. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете сварочных напряжений и деформаций.
3. При отношении  $t_s/t_w \geq 2$ , для любой толщины полки распределение температуры по толщине стенки при сварке тавровых соединений можно считать равномерным.

## Литература

1. Бельчук Г.А. О распределении тепла в элементах тавровых соединений при дуговой сварке // Сварочное производство. – 2019. – №9(3). – С. 13-15.
  2. Казимиров А.А., Терещенко В.Н. Распределение тепла дуги между полкой и стенкой таврового соединения при сварке под флюсом // Автоматическая сварка. – 2010. – №10(6). – С. 23-27.
  3. Киселев С.Н., Григорьянц А.Г., Воронин Н.Н. Температурные поля при многослойной сварке стыковых и тавровых соединений // Сварочное производство. – М. – 2015. – №5/2. – С. 12-20.
  4. Das Gupta B., Gupta O.P. Temperature distribution in fillet welds. // Inst. Eng. (India) Mech. Eng. Div., 2008. – №2. – p. 87-92.
-

5. Полетаев Ю.В. Влияние температуры и частоты малоциклового нагружения на склонность к локальному разрушению сварных соединений стали 12X18H12T // Инженерный вестник Дона, 2011, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/587](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/587).
6. Лившиц А.В. Влияние термоизоляторов на нагрев полимеров при высокочастотной электротермии // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2348](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2348).
7. Трошин С.С., Трифонова А.Ю., Коваленко И.А. Напряжения и деформации металла при дуговой сварке. Исследование режима распределения температуры // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. – 2017. с. 340-343.
8. Perret W., Schwenk C., Rethmeier M. Comparison of analytical and numerical welding temperature field control. Computational Materials Science. 2010. V.47. №4. p. 1005-1015.
9. Рыкалин Н.Н. Расчёты тепловых процессов при сварке. – Москва: Машгиз, 1951. – 296 с.
10. Хаустов С.В., Харламов В.О., Кузьмин С.В. Численное моделирование тепловых процессов при сварке. – Волгоград: ВолгГТУ, 2016. – 60 с.
11. Окерблом Н.О. Расчёт деформаций металлоконструкций при сварке. – Москва: АСВ, 2005. – 212 с.
12. Полишко Г.Ю. Распространение тепла в пластике с ребром жесткости // Технология и сварка в судовом корпусостроении и судовом машиностроении. – 1977. – №118. – с. 43-46.



## References

1. Bel'chuk G.A. Svarochnoe proizvodstvo. 2019. №5. pp. 13-15.
2. Kazimirov A.A., Tereshchenko V.N. Avtomaticheskaya svarka. 2010. №10(6). pp. 23-27.
3. Kiselev S.N., Grigor'yanc A.G., Voronin N.N. Svarochnoe proizvodstvo. 2015. №5/2. pp. 12-20.
4. Das Gupta B., Gupta O.P. Engineering Mechanics. 2008. №2. pp. 87-92.
5. Poletaev Yu.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/587](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/587).
6. Livshic A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2348](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2348).
7. Troshin S.S., Trifonova A.Yu., Kovalenko I.A. Sbornik tezisov dokladov nauchnoj konferencii studentov i aspirantov Lipeckogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. pp. 340-343.
8. Perret W., Schwenk C., Rethmeier M. Computational Materials Science. 2010. Vol.47, №4. pp. 1005-1015.
9. Rykalin N.N. Raschyoty teplovyh processov pri svarke [Design of thermal processes during welding]. Moskva : Mashgiz, 2001. 296 p.
10. Haustov S.V., Harlamov V.O., Kuz'min S.V. Chislennoe modelirovanie teplovyh processov pri svarke [Numerical modeling of welding heat process]. Volgograd: VolgGTU, 2016. 60 p.
11. Okerblom N.O. Raschyot deformatsij metallokonstrukcij pri svarke [Design of metal structures' deformations during welding]. Moskva: ASV, 2005. 212 p.
12. Polishko G.Yu. Tekhnologiya i svarka v sudovom korpuso-stroenii i sudovom mashinostroenii. 1977. №118. pp. 43-46.