

М. Т. НАДЖАРЯН, М. С. САРКИСЯН

УСКОРЕННОЕ ТАРИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ТЕРМОПАР

В связи с применением метода естественной термопары для измерения температуры резания необходимо иметь зависимость т. э. д. с. Е от температуры θ . Это, однако, связано с определенными трудностями технического и теоретического порядка.

Цель данной работы — определить зависимости $E=f(\theta)$ в явном виде для ряда распространенных пар резец—деталь с применением облегченного аппарата.

В. В. Цоцхадзе [1] показал, что уравнение (1) достаточно точно (с погрешностью не более $1 \div 2\%$ в исследуемом интервале) выражает связь Е с θ :

$$E = B \left[\exp \left(-\frac{b}{\theta_r} \right) - \exp \left(-\frac{b}{\theta_x} \right) \right], \quad (1)$$

здесь E — т. э. д. с. в милливольтгах;

B и b — эмпирические постоянные;

θ_r и θ_x — температуры соответственно горячего и холодного спаев в $^{\circ}\text{K}$.

В работе [2] также подтверждается высокая точность и целесообразность применения (1). Однако ее применение связано с необходимостью громоздкого решения системы двух экспоненциальных уравнений для численного определения постоянных B и b в каждом случае.

Анализ физического смысла постоянной b и рассмотрение соотношений полученных при тарировании различных термопар позволили выразить b в виде эмпирического выражения.

$$b = C (E_1 - E_2)^m \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^n, \quad (2)$$

где E_1 и E_2 — т. э. д. с. в милливольтгах любой термопары при неизменных реперных температурах, соответственно равных θ_{r1} и θ_{r2} в $^{\circ}\text{K}$, причем $\theta_{r1} > \theta_{r2}$;

C, m и n — единичные для всех термопар (при так же θ_{r1} и θ_{r2}) эмпирические постоянные.

Для определения величин C, m и n , входящих в (2), необходимо было получить достаточное число уравнений типа (1) с известными B и b для различных термопар. Тарировались следующие термопары:

T5K10—Ст45; BK8—Ст45; T15K6—Ст45; T5K10—У8А; T15K6—У8А; T15K6—20Х; BK8—IX18H9T; BK8—BT14; BK8—СЧ15-32; T15K6—МЗ. Реперными точками были выбраны: температура плавления химически чистого свинца ($\theta_{\text{г}} = 600^\circ\text{K}$) и температура кипения дистиллированной воды (в наших условиях $\theta_{\text{г}} = 370^\circ\text{K}$). Во всех случаях поддерживалась $\theta_{\text{х}} = 293^\circ\text{K}$.

Металлические ветви термопар имели размеры $2 \times 2 \times 120$ мм с заострением погружаемого на $2 \div 3$ мм в расплав конца, твердосплавные электроды изготовлялись из обычных паяных резцов с сечением державки 32×32 мм; массивная твердосплавная пластинка имела выступающую иглообразную часть длиной $9 \div 10$ мм. Обе ветви и контрольная хромель-алюмелевая термопара закреплялись на изолирующей ручной державке; при этом внедряемые в расплав концы ветвей и ХА-термопара образовывали равносторонний треугольник со сторонами около 2 мм. При погружении термопар в расплав свинца, имеющего температуру около 350°C , начиналась кристаллизация свинца, что немедленно регистрировала ХА-термопара, подключенная к потенциометру ЭПП-15А-МЗ; при этом с милливольтметра с ценой деления шкалы 0,1 мВ, подключенного к естественной термопаре, снимались показания E_1 . После этого термопары с образовавшимся небольшим сгустком свинца переносились в верхний слой кипящей воды; при этом избыток тепла уходил на парообразование, и милливольтметр регистрировал E_2 . Весь процесс измерения E_1 и E_2 происходил за время около $5 \div 6$ секунд вследствие небольших нагреваемых масс. Для улучшения контакта ветви термопар при измерениях слегка вдавливались в свинец. Нагрев свинца производился в фарфоровом тигле посредством внешней бифиллярной нихромовой спирали, подключаемой к ЛАРТу. В некоторых случаях дополнительная ХА-термопара размещалась в зоне спайки твердосплавной пластинки с резцовой державки; при этом сколь-нибудь заметного повышения температуры в этой зоне за время измерения не наблюдалось.

Каждое измерение E_1 и E_2 было повторено 5 раз; в табл. 1 приводятся их среднеарифметические величины. Разброс результатов измерений не превышал $4 \div 8\%$ от приводимых величин. Указанные в табл. 1 значения B и b получены в результате решения на ЭВМ для каждой естественной термопары системы уравнений:

$$\begin{cases} E_1 = B \left[\exp \left(-\frac{b}{600} \right) - \exp \left(-\frac{b}{293} \right) \right] \\ E_2 = B \left[\exp \left(-\frac{b}{370} \right) - \exp \left(-\frac{b}{293} \right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

Обработка полученных данных способом наименьших квадратов привела к следующим результатам: $C = 96,236$ (или $\lg C = 1,98334$); $m = 0,13585$; $n = 1,41145$. С достаточным приближением можно считать, что

Естественная термопара	$E_{1мв}$	$E_{2мв}$	B	b	B_p	b_p	$E_{1рмв}$	$E_{2рмв}$
T5K10 —Ст45	5,37	1,15	1028,3	35,74	1030,5	35,80	5,37	1,15
BK8 —Ст45	5,64	1,18	1060,4	39,17	1072,9	39,73	5,63	1,17
T15K6 —Ст45	4,42	0,80	1254,7	40,28	1190,8	37,15	8,32	0,70
T5K10 —У8А	4,73	0,78	1375,4	51,48	1475,5	58,99	4,66	0,71
T15K6 —У8А	4,00	0,70	1298,7	38,86	1323,5	40,15	3,98	0,68
T15K6 —20Х	5,00	0,95	1190,5	41,56	1212,3	42,74	4,98	0,93
BK8 —1Х18Н9Т	3,80	0,70	1231,5	33,49	1064,9	27,38	3,92	0,82
BK8 —ВТ14	2,72	0,39	1551,4	38,68	1672,9	45,99	2,68	0,35
BK8 —СЧ15—32	2,40	0,40	1361,7	25,59	1326,3	24,43	2,41	0,41
T15K6 —СЧ40*	4,26	0,87	1101,0	31,3	1070,6	30,12	4,28	0,89
T30K4 —Ст40*	2,77	0,50	1273,3	26,0	1203,5	23,73	2,79	0,52
BK8 —СЧ40*	5,62	1,16	1083,3	40,23	1091,9	40,64	5,61	1,15
T15K6 —МЗ	4,62	1,02	1000,1	29,7	966,0	28,42	4,61	1,01

* — данные приводятся по [1].

$$b_p = 96,24 (E_1 - E_2)^{0,136} \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{1,4114} \quad (4)$$

Величина B_p определялась из системы (3):

$$B_p = \frac{E_1 - E_2}{\exp \left(-\frac{b}{600} \right) - \exp \left(-\frac{b}{370} \right)} \quad (5)$$

С целью определения расхождений между кривыми связи $E = f(\theta)$, полученных непосредственным решением (3) и с применением (4), с помощью формул системы (3) при замене B на B_p и b на b_p , были получены значения $E_{1р}$ и $E_{2р}$. Буквенный индекс у b_p , B_p , $E_{1р}$, $E_{2р}$ указывает на метод их получения, основанный на расчете по формуле (4); величины их приводятся в табл. 1. Для построения графика $E = f(\theta)$ по этим данным достаточно при данных b_p и B_p и формуле:

$$E = B_p \left[\exp \left(-\frac{b_p}{\theta_r} \right) - \exp \left(-\frac{b_p}{\theta_x} \right) \right] \quad (6)$$

придавать значения θ_r в °К через интервалы в 20°.

Следует отметить, что применение (2) приводит к более верным результатам, чем при обычном тарировании по всему интервалу температур. Для проверки этого вывода было проведено тарирование пар P18-M3 и P12-M3 по всему интервалу возможных температур резания (до 400°C).

Полученные результаты для принятых реперных точек были пересчитаны с помощью (4); экспериментальные и расчетные данные приводятся в табл. 2.

Различие техники тарирования в этом случае состояло в том, что ветви P18 и P12 были тех же размеров, что и меди M3, т. е. 2×2×120 мм, а вместо милливольтметра был применен самописец ЭАПП-15-M3 с

повышенной чувствительностью и протарированной в милливольт-шкалой. Температура холодного спая θ_x в этом случае достигла 300°K вместо 293°K из-за длительного нагревания при тарировании, что и явилось причиной уменьшения E_1 и E_2 относительно E_{1p} и E_{2p} в связи с изменением техники тарирования.

Таблица 2

Естественная термопара	E_1 мв	E_2 мв	b_p	V_p	E_{1p} мв	E_{2p} мв
P18—M3	2,78	0,70	744,23	13,38	2,81	0,73
P12—M3	1,80	0,44	732,63	8,67	1,89	0,53

Заметно, что разница между экспериментальными и расчетными данными обычно находится в пределах точности примененных приборов и в пределах разбросов опытных данных. В этом отношении, как нетрудно заметить, наиболее точные результаты получены для пар T5K10—ст45; BK8—ст40; BK8—ст45 и T15K6—M3, для которых и в экспериментах разброс был невелик.

Используя то обстоятельство, что должно выдерживаться равенство

$$E_1 - E_2 = E_{1p} - E_{2p}, \quad (7)$$

можно легко контролировать верность определения необходимых параметров.

Следует отметить, что холодные концы ветвей из резцовых материалов имели отрицательный потенциал относительно холодного конца металлической ветви, за исключением пар BK8—BT14, P18—M3 и P12—M3.

По закону аддитивности (закон промежуточных металлов), в реперных точках должно было наблюдаться равенство т. э. д. с. пары T15K6—T5K10 и в случае принятия в качестве промежуточного металла стали У8А, и в случае стали 45; то же явление должно было наблюдаться относительно т. э. д. с. пары T15K6—BK8 в случаях применения в качестве промежуточных металлов сталей марок 45 и 40. Однако, как в этом нетрудно убедиться элементарным подсчетом, закон аддитивности в данном случае не соблюдается и для опытных и для расчетных данных.

Если для пары T15K6—BK8 несоблюдение закона аддитивности можно объяснить некоторым различием техники тарирования и тем, что материалы ветвей взяты из совершенно различных партий, то для пары T15K6—T5K10 это явление можно объяснить тем, что в процессе тарирования изменяются различные свойства материалов и поверхностей ветвей термопар.

Учитывая, однако, что если при резании свойства термопар изменяются сходным образом, то приводимые результаты и методика тарирования достаточно достоверны и применимы для определения средней температуры контакта резец—деталь.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Цоцхадзе. Тарирование естественных термопар. «Вестник машиностроения», 1963, № 11.
2. А. Н. Резников. Теплофизика резания. М., «Машиностроение», 1969.