

Ордена Ленина

ИАЭ-3208

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

*SM 800 9935*

В. Н. Кузнецов, В. А. Николаенко

**Метрология метода  
измерения максимальной температуры  
с помощью ИМТК**

Москва 1979

**ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И. В. КУРЧАТОВА**

**В. Н. Кузнецов, В. А. Николаенко**

**МЕТРОЛОГИЯ МЕТОДА  
ИЗМЕРЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ  
С ПОМОЩЬЮ ИМТК**

**Москва  
1979**

**Ключевые слова:** измеритель максимальной температуры кристаллический (ИМТК), погрешности измерения температуры, статистические методы, исключение систематической погрешности, уравнение измерения.

Приведены результаты государственных испытаний измерителя максимальной температуры кристаллического (ИМТК). Показано, что средняя квадратичная погрешность отдельного измерения на стационарном и нестационарном режимах составляет 6 и 12<sup>о</sup>С соответственно.

Сравнение данных по истинным и измеренным с помощью ИМТК температурам, а также их статистическая обработка позволили получить уравнения измерения, исключая часть систематической составляющей погрешности. Как для алмазного ИМТК, так и для ИМТК из карбида кремния получены зависимости среднего квадратичного отклонения (СКО) от уровня измеряемой температуры. Зависимость СКО от температуры оценена также расчетным методом из общих соображений. Найдено, что минимальное значение СКО (около 4 – 5<sup>о</sup>С) достигается в интервале 500 – 1000<sup>о</sup>.

Приводится краткое описание других методов измерения температуры в труднодоступных местах технических объектов и рассматриваются зависимости СКО от измеряемой температуры.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Измеритель максимальной температуры кристаллический (ИМТК) предназначен для измерения температуры в труднодоступных местах объектов новой техники [1]. Этот прибор разработан в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова в 1963 – 1974 гг. [2] и в настоящее время широко используется в различных областях науки и техники [3 – 5]. Принцип действия ИМТК основан на зависимости расширения кристаллических решеток облученных алмаза или карбида кремния от температуры и времени отжига.

Преимущества нового метода – широкий диапазон измерений ( $100 - 1200^{\circ}\text{C}$ ), малые габариты и высокая точность -- позволяют успешно конкурировать с другими методами измерения температуры в аналогичных условиях. К настоящему времени метод ИМТК прошел государственные испытания, занесен в Госреестр и разрешен к использованию на территории Союза ССР.

Однако до настоящего времени не проведено обобщение накопленных метрологических данных и прежде всего результатов госиспытаний во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева. Эта работа проделана в ИАЭ им. И. В. Курчатова, и ее результаты изложены в настоящем препринте. Проведенная работа позволила улучшить правильность результатов измерений путем исключения части систематической погрешности. Кроме того, методами математической статистики достаточно корректно определена достоверность получаемых оценок рабочей температуры.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

В течение эксплуатации ИМТК неоднократно подвергались контрольным испытаниям. Эти испытания преследовали цель определить погрешность и обычно проводились одновременно с измерениями температуры. Процедура их заключалась в следующем. Один или два контрольных датчика партии ИМТК, предназначенной для измерений, устанавливались в тех точках машины, где температура измерялась термометрами. Принимались меры для обеспечения равенства температуры контрольного ИМТК и спая термометра. После испытания и расшифровки температуры сравнение показаний этих контрольных ИМТК с результатами, зарегистрированными термометрами, всегда позволяло определить погрешность измерения (предполагается, что термоэлектрический термометр дает действительные значения температуры). Такого рода испытания проводились в институтах, на заводах и в конструкторских бюро — там, где метод ИМТК использовался для измерения температуры в труднодоступных местах различных технических объектов.

Испытания ИМТК для оценки погрешности метода проводились и в специализированных организациях. Так, например, ИМТК испытывались во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им Д. И. Менделеева (г. Ленинград), а также в головной организации по тепловым измерениям — Всесоюзном научно-производственном объединении "Термоприбор" (г. Львов). Испытания 1971 г. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева позволили выявить систематическую погрешность в диапазоне температур 180 — 350°С. Эта погрешность была устранена путем корректировки рабочих графиков, по которым ведется расшифровка показаний температуры. Испытания ИМТК в НПО "Термоприбор", проведенные в 1974 г., дали следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1

Результаты измерения температуры  
с помощью ИМТК в НПО "Термоприбор"

Действительная температура, °С	764	961	812	956	952	936	973	949	930	894
Температура по ИМТК, °С	763	957	814	960	953	934	971	946	929	890

Средняя квадратичная погрешность, вычисленная из данных этих испытаний, составила 2,8°

Государственные испытания измерителя максимальной температуры кристаллического проведены в 1973 – 1974 гг. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. В соответствии с техническим заданием, подготовленным рядом организаций \*, в ИАЭ им. И. В. Курчатова были составлены технические условия на ИМТК. Эти условия были согласованы с МВТУ им. Н. Э. Баумана. Государственные приемочные испытания проводились по программе, утвержденной поверяющей организацией. Программа, составленная в соответствии с ГОСТ 8.001 – 71 "Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений", предусматривала проверку:

- наличия и пригодности к испытаниям представленных образцов ИМТК;

- наличия и полноты представленных материалов технической документации;

- технической документации на полноту и правильность содержания, соответствия нормативным материалам.

Экспериментальные исследования включали испытания ИМТК на стационарных и переменных режимах эксплуатации. Температура и длительность выдержки при испытаниях выбирались из условия наиболее полного охвата рабочего диапазона действия ИМТК. Проверке подвергались алмазные ИМТК в диапазоне 100 – 1000°С и ИМТК из карбида кремния в диапазоне 600 – 1200°С. ИМТК проверялись также на относительную погрешность измерения, когда условия их выдержки были одинаковыми (дисперсия и среднее квадратичное отклонение сходимости).

Для оценки погрешности определения максимальной температуры переменного режима испытания ИМТК подвергались отжигу по различным произвольным программам нагрева. Изменения температуры были ступенчатыми, плавными, с подъемами и спадами температуры, с большими и малыми перепадами между максимальной и минимальной температурами и разными временами испытания. Для определения максимальной температуры ИМТК после испытания под номерами направлялись в ИАЭ им. И. В. Курчатова, куда одновременно представлялись графики, на которых по оси абсцисс откладывалось время испытания, а по оси ординат – температура в относительных единицах, т. е. истинная (действительная) температура на расшифровку не сообщалась. После расшифровки

---

\* МВТУ им. Н.Э. Баумана.  
Невский завод им. В. И. Ленина.  
Всесоюзный научно-исследовательский институт газа.

показаний во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева проводилось сравнение измеренных температур с истинными. Определялась погрешность и составлялось заключение на работу ИМТК в условиях переменного режима эксплуатации.

Результаты государственных испытаний показали соответствие технической документации нормативным материалам и подтвердили выполнение всех пунктов технических условий на ИМТК. В акте государственных испытаний отмечено, что поскольку ИМТК является прибором однократного действия, то поверке в процессе эксплуатации он не подлежит, а градуировка производится согласно методике, изложенной в технических условиях и техническом описании.

В табл. 2 представлены данные из ведомости соответствия испытанных образцов ИМТК техническому заданию на разработку. В ведомость госиспытаний не включены данные по величине СКО сходимости, когда ИМТК выдерживались при испытаниях в одинаковых условиях температуры и времени выдержки. Однако анализ таких данных показывает, что СКО сходимости как для стационарного, так и для переменного режимов составляет  $3^{\circ}\text{C}$  во всем диапазоне измеряемых температур.

Таблица 2

Соответствие результатов госиспытаний  
ИМТК требованиям ТУ

Поверяемый параметр	Требования ТЗ	Требования ТУ	Результат
Погрешность измерения температуры, $^{\circ}\text{C}$	5	Стационарный режим 5 – 10. Переменный режим 10 – 15	Соответствует: для стационарного режима 6, для переменного 12
Диапазон времен выдержки	$10^2 - 10^6$	$10^2 - 10^6$	Соответствует: $10^2 - 10^6$
Диапазон измерений, $^{\circ}\text{C}$	100 – 1000	Алмазные ИМТК 100 – 1000, ИМТК из карбида кремния 600 – 1200	Соответствует: алмазные ИМТК 100 – 1000, ИМТК из карбида кремния 600 – 1200

На основании материалов государственных приемочных испытаний Государственный комитет стандартов СМ СССР принял решение об

утверждении типа прибора, занес его в Государственный реестр под № 3952-73 и разрешил использовать на территории Союза ССР.

### 3. ОЦЕНИВАНИЕ ИСТИННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассчитанная в результате проведения госиспытаний величина СКО определена для всего диапазона измеряемых температур. Анализ и исключение систематических погрешностей как для алмазных ИМТК, так и для ИМТК из карбида кремния, а также исследование зависимости погрешности от уровня измеряемых температур не проводились. Эта работа, несколько позже, была проведена в ИАЭ им. И. В. Курчатова.

Исключение значительной части систематической погрешности возможно с помощью градуировочной зависимости:

$$t = f_p(t_{\text{изм}}), \quad (3.1)$$

где  $t$  — истинная температура;  $f_p$  — знак рабочей функциональной зависимости;  $t_{\text{изм}}$  — значение температуры, полученное с помощью ИМТК.

Зависимость (3.1) может быть установлена на основе данных по одновременному измерению температуры с помощью ИМТК и с помощью другого, более точного прибора. Если показания последнего имеют погрешность, пренебрежимо малую по сравнению с погрешностью метода ИМТК, то их можно считать свободными от систематических погрешностей. Тогда оценка достоверности поправочной (градуировочной) зависимости типа (3.1) может быть сделана только с учетом случайных погрешностей.

Для практического построения зависимости (3.1) были использованы результаты испытаний ИМТК во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и НПО "Термоприбор". Измерение и поддержание температуры во время испытаний в этих организациях производились с погрешностью около  $0,2^\circ\text{C}$  при температуре порядка  $100^\circ\text{C}$  и  $0,9^\circ\text{C}$  при  $1000^\circ\text{C}$ . Эти температуры принимались в качестве действительных значений температур, так как погрешность их значительно меньше, чем погрешность метода ИМТК.

Погрешность результата какого-либо ( $k$ -го) измерения ( $\delta_k$ ) определяется как алгебраическая разность между температурой, измеренной ИМТК ( $t_{\text{изм},k}$ ), и действительным ее значением ( $t_{\text{д},k}$ ):

$$\delta_k = t_{\text{изм},k} - t_{\text{д},k} \quad (3.2)$$

Все данные по измеренным с помощью ИМТК и действительным



температурам представлены в табл. 3 и 4, где они расположены в порядке возрастания  $t_{\text{изм}}$ . Приводимые в пятом столбце значения систематической погрешности  $\Delta_c$  обсуждаются ниже.

Таблица 3

Результаты поверочных измерений температуры  
и погрешности ( $^{\circ}\text{C}$ ) для алмазных ИМТК  
при стационарных режимах испытаниях

к	$t_{\text{изм}}, \text{к}$	$t_{\text{д,к}}$	$\delta_{\text{к}}$	$\Delta_{\text{с, к}}$
1	85	99,9	-14,9	-3,05
2	100	100,0	0,0	-2,99
3	105	100,0	5,0	-2,97
4	115	100,0	15,0	-2,94
5	143	143,8	-0,8	-2,83
6	342	350,0	-8,0	-2,09
7	347	349,8	-2,8	-2,07
8	348	349,2	-1,2	-2,06
9	350	350,1	-0,1	-2,06
10	398	393,0	5,0	-1,88
11	442	450,2	-8,2	-1,71
12	442	450,2	-8,2	-1,71
13	444	450,2	-6,2	-1,70
14	444	450,2	-6,2	-1,70
15	445	450,2	-5,2	-1,70
16	493	493,3	-0,3	-1,52
17	536	549,2	-13,2	-1,36
18	541	542,5	-1,5	-1,34
19	542	542,5	-0,5	-1,34
20	542	550,0	-8,0	-1,34
21	543	550,0	-7,0	-1,33
22	544	542,5	1,5	-1,33
23	545	542,5	2,5	-1,32
24	545	542,5	2,5	-1,32
25	551	549,8	1,2	-1,30
26	599	595,4	3,6	-1,12
27	692	692,5	-0,5	-0,77
28	734	748,7	-14,7	-0,62
29	740	739,0	1,0	-0,59
30	742	746,1	-4,1	-0,59
31	744	747,1	-3,1	-0,58
32	752	745,1	6,9	-0,55
33	763	764,0	-1,0	-0,51
34	814	812,0	2,0	-0,32
35	848	849,5	-1,5	-0,19
36	848	849,5	-1,5	-0,19

Продолжение табл. 3

к	$t_{изм, к}$	$t_{д, к}$	$\delta_k$	$\Delta_{с, к}$
37	852	849,5	+2,5	-0,17
38	852	849,5	2,5	-0,17
39	857	849,5	7,5	-0,15
40	890	894,0	-4,0	-0,13
41	929	930,0	-1,0	0,12
42	934	936,0	-2,0	0,13
43	942	937,2	4,8	0,16
44	946	949,0	-3,0	0,18
45	953	952,0	1,0	0,21
46	957	961,0	-4,0	0,22
47	960	956,0	4,0	0,23
48	971	973,0	-2,0	0,27
49	988	977,8	10,2	0,34
50	990	983,7	6,3	0,34
51	1000	1001,2	-1,2	0,38

Таблица 4

Результаты поверочных измерений температуры  
и погрешности ( $^{\circ}\text{C}$ ) для ИМТК из карбида кремния  
при стационарных режимах испытания

К	$t_{изм, к}$	$t_{д, к}$	$\delta_k$	$\Delta_{с, к}$
1	590	595,8	-5,8	-4,97
2	590	598,2	-8,2	-4,97
3	590	597,9	-7,9	-4,97
4	598	600,0	-2,0	-4,97
5	788	798,5	-10,5	-4,88
6	793	797,3	-4,3	-4,88
7	796	799,0	-3,0	-4,88
8	803	799,4	3,6	-4,87
9	973	981,0	-8,0	-4,79
10	982	979,0	3,0	-4,79
11	996	1000,8	-4,8	-4,78
12	1087	1100,7	-13,7	-4,74
13	1096	1100,7	-4,7	-4,73
14	1103	1100,7	2,3	-4,73
15	1178	1192,5	-14,5	-4,69
16	1190	1198,3	-8,3	-4,69
17	1193	1193,3	-0,3	-4,69
18	1197	1196,6	0,4	-4,68

Истинные температуры могут быть найдены по температуре, измеренной ИМТК, с помощью экспериментальной градуировочной зависимости:

$$t \simeq t_{\text{д}} = f_{\text{э}}(t_{\text{изм}}), \quad (3.3)$$

где  $t_{\text{д}}$  — действительная температура отжига;  $f_{\text{э}}$  — знак экспериментальной функциональной зависимости;  $t$ ,  $t_{\text{изм}}$  — истинная и измеренная ИМТК температуры соответственно.

Поскольку погрешность измерения температуры точными приборами во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и НПО "Термоприбор" почти на порядок ниже погрешности метода ИМТК, то результаты по  $t_{\text{д}}$  для данного вида измерений могут приниматься за верные (истинные) значения температуры [6].

Экспериментальная зависимость (3.3) была получена методом регрессионного анализа [7]. Этот анализ выполнялся путем отыскания по методу наименьших квадратов полиномов последовательно повышающихся степеней. Расчеты проводились по специальным программам на ЭВМ БЭСМ-6, аналогично проводились и все другие расчеты, описываемые ниже. При определении значимости коэффициентов регрессий применялось сравнение дисперсий последовательно получаемых приближений по критерию Фишера [8]. В результате анализа найдено, что достаточным приближением является уравнение линейное относительно  $t_{\text{изм}}$ , т. е. как для алмазного ИМТК, так и для ИМТК из карбида кремния оно имеет вид

$$t = f_{\text{э}}(t_{\text{изм}}) = a + b \cdot t_{\text{изм}}. \quad (3.4)$$

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 5. Приводимые

Таблица 5

Тип ИМТК	Параметры линейной регрессии, град		Число степеней свободы	Средние квадраты отклонений экспериментальных данных, град <sup>2</sup>	
	a	b		$\Delta R_1$	$\Delta R_2$
Из карбида кремния	5,3	0,9995	16	50,5	27,3

в двух ее последних столбцах средние квадраты отклонений экспериментальных данных получены с помощью выражений:

$$\Delta R_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (t_k - t_{изм,k})^2 \quad (3.5)$$

$$\Delta R_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (t_k - a - b \cdot t_{изм,k})^2 \quad (3.6)$$

Относительное уменьшение величины  $\Delta R_2$  по сравнению с исходной  $\Delta R_1$  характеризует выигрыш от использования градуировочной зависимости, позволяющей исключить систематическую погрешность. Видно, что для случая ИМТК из карбида кремния выигрыш значителен.

Зависимость величины исключенной систематической погрешности от уровня измеряемой температуры является линейной:

$$\Delta_c(t_{изм}) \approx t_{изм} (1 - b) - a. \quad (3.7)$$

Для алмазного ИМТК исключаемая систематическая погрешность изменяется от  $-3,0$  до  $+0,4^\circ\text{C}$  для диапазона температур  $100 - 1000^\circ\text{C}$ , для ИМТК из карбида кремния эта погрешность составляет примерно  $-5^\circ\text{C}$  при  $600 - 1200^\circ\text{C}$ . Соответствующие значения  $\Delta_{с,к}$  см. в табл. 3 и 4.

Таким образом уравнения измерения максимальной температуры с помощью ИМТК из алмаза и карбида кремния имеют вид:

$$t = 3,4 + 0,9963 \cdot t_{изм}, 100^\circ\text{C} \leq t_{изм} \leq 1000^\circ\text{C}, \quad (3.8)$$

$$t = 5,3 + 0,9995 \cdot t_{изм}, 600^\circ\text{C} \leq t_{изм} \leq 1200^\circ\text{C}. \quad (3.9)$$

Следует отметить, что все количественные выводы по анализу погрешностей настоящего метрологического исследования относятся к алмазу и карбиду кремния конкретной партии, прошедшей испытания во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и НПО "Термоприбор". При облучении другой партии рабочего вещества и проведении градуировки, естественно, требуются аналогичные поверочные испытания и соответствующая математическая обработка. В этом смысле настоящая работа является методическим пособием для расчетов; это относится и к последующим разделам. Необходимо заметить, однако, что одной партии, например облученного алмаза, достаточно для изготовления большого количества ИМТК, порядка 10 тыс. штук.

## 4. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

### 4.1. Зависимость СКО от температуры испытания

Процесс нахождения зависимости СКО от уровня измеряемой температуры осложняется обстоятельствами, имеющими противоположные тенденции. Остаточная дисперсия и СКО могут быть найдены либо для всей подвыборки – всего объема данных, как это и было сделано при составлении заключения по госиспытаниям, либо для локализованной подвыборки (остаточная дисперсия для участка регрессии). В последнем случае при соответствующей комбинации подвыборок можно получить зависимость СКО от уровня температуры.

Однако если с увеличением объема подвыборки достоверность оценки СКО растет, то с другой стороны увеличивается смещенность этой оценки, а также уменьшается достоверность оценок параметров корреляционного уравнения из-за уменьшения базы по оси аргументов ввиду сближения крайних значений эффективной температуры, от которой зависят оценки СКО.

Зависимость СКО от уровня измеряемой температуры была получена при использовании разных подвыборок объема  $N_i$ , причем минимальное значение  $N_i = 2$ , а максимальные значения объема составляли 25 и 15 для алмаза и карбида кремния соответственно. Организованная таким образом подвыборка при расчете как бы "скользила" по оси абсцисс, при этом исключались предыдущие данные и постепенно вовлекались новые, пока последние не исчерпывались. Объем подвыборки при каждом расчете всегда сохранялся постоянным.

Ставя в соответствие каждой подвыборке среднее значение аргумента  $t_{\text{изм}}$ , можно для каждого варианта  $i$  найти параметры корреляционного уравнения, связывающие СКО с уровнем измеряемой температуры. В результате получают выборки для параметров корреляционного уравнения, которые позволяют найти их наиболее достоверные значения.

В качестве корреляционного уравнения рассматривалась линейная регрессия вида:

$$S/T = S_i(t_{\text{изм}}) = \alpha_i + \beta_i \cdot t_{\text{изм}}, \quad (4.1)$$

которая находилась для каждого  $i$ -го варианта, т. е. для  $i = 1, 2, \dots, I$ . Через  $S_i$  обозначена оценка СКО, а  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – оценки параметров регрессии для  $i$ -го варианта. На рис. 1 показана схема проведения расчета. Имеется  $K$  экспериментальных данных с номерами  $k = 1, 2, \dots, K$ , исследуется  $I$  вариантов выборок с номерами  $i = 1, 2, \dots, I$  разного объема. В результате получаем  $J_i$  значений СКО с номерами  $j = 1, 2, \dots, J_i$  ( $J_i = K - i$ ), которые соотносятся с измеряемой температурой. Эта измеряемая или

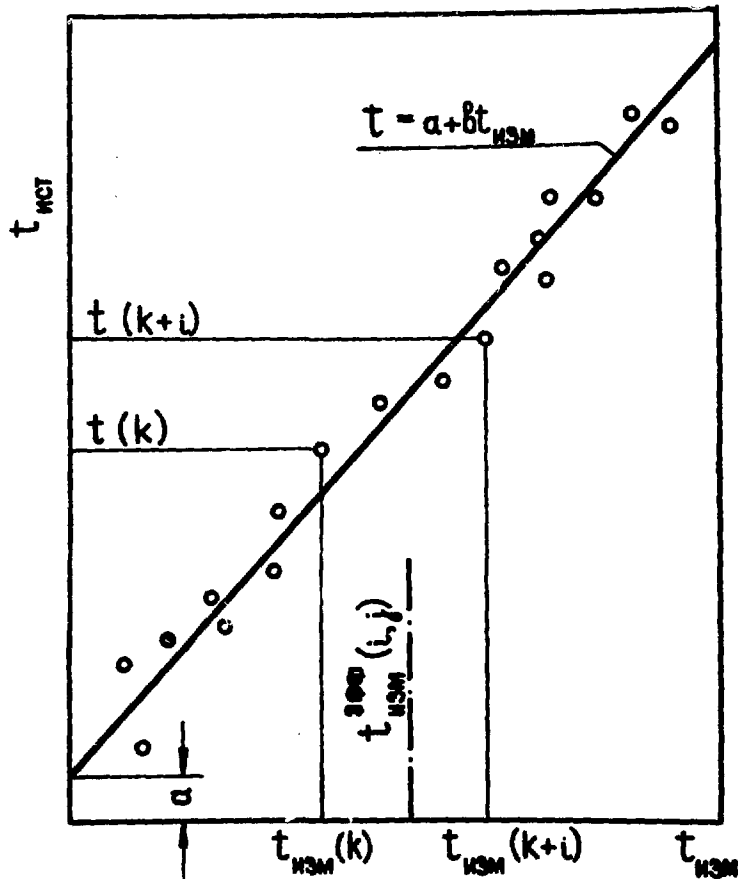


Рис. 1. Схема расчета зависимости среднего квадратического отклонения от измеряемой температуры. Приведен вариант  $i=3, K=18$

эффективная температура является средней из температур, входящих в подвыборку, она, естественно, изменяется при скольжении подвыборки:

$$t_{изм}^{эф} = \frac{1}{i+1} \sum_{\kappa=j}^{\kappa=j+i} t_{изм,\kappa} \quad (4.2)$$

В результате получаем двумерный массив значений остаточной дисперсии по отношению к регрессии  $T/T_{изм}$ :

$$S_{i,j}^2 = \frac{1}{i} \sum_{\kappa=j}^{\kappa=j+i} (t_{\kappa} - a - b \cdot t_{изм,\kappa})^2 \quad (4.3)$$

В результате нахождения линейных регрессий получены одномерные массивы параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , приведенные в табл. 6.  $N_i$  ограничивались

**Значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$   
зависимости СКО от температуры**

i	N <sub>i</sub>	Алмазные ИМТК		ИМТК из карбида кремния	
		$\alpha_i, ^\circ\text{C}$	$\beta_i \cdot 10^{-3}$	$\alpha_i, ^\circ\text{C}$	$\beta_i \cdot 10^{-3}$
1	2	7,54	-4,2	-0,64	6,6
2	3	8,10	-4,8	-1,02	7,3
3	4	8,37	-5,1	-0,97	7,3
4	5	8,16	-4,8	-0,61	7,0
5	6	8,08	-4,6	-1,06	7,5
6	7	7,97	-4,4	-0,67	7,2
7	8	7,91	-4,3	-0,01	6,6
8	9	7,89	-4,3	-0,18	6,9
9	10	7,91	-4,3	-0,28	7,2
10	11	7,92	-4,3		
11	12	7,91	-4,2		
12	13	7,95	-4,3		
13	14	7,96	-4,3		
14	15	7,96	-4,3		

значениями 15 и 9 для ИМТК двух рассматриваемых типов, так как при больших N<sub>i</sub> резко ухудшается достоверность оценок. Принимая средние значения параметров в качестве наиболее разумных оценок соответствующих генеральных характеристик, получаем уравнения зависимости СКО от t<sub>изм</sub> соответственно для ИМТК из алмаза и карбида кремния:

$$S(t_{\text{изм}}) = + 8,0 - 0,0044 \cdot t_{\text{изм}}, \quad (4.4)$$

$$S(t_{\text{изм}}) = - 0,6 + 0,0071 \cdot t_{\text{изм}}. \quad (4.5)$$

Для алмазного ИМТК получено также соответствующее уравнение второй степени для диапазона  $150 \leq t_{\text{изм}} \leq 650^\circ\text{C}$ :

$$S(t_{\text{изм}}) = 15,6 - 0,041 \cdot t_{\text{изм}} + 4,1 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\text{изм}}^2, \quad (4.6)$$

которое будет использовано при анализе источников погрешностей.

Из полученных уравнений видно, что зависимость S(t<sub>изм</sub>) для ИМТК двух типов имеет противоположный характер: для алмазного ИМТК оценка СКО уменьшается, а для ИМТК из карбида кремния увеличивается с ростом измеряемой температуры. Ниже будет показано, что это не является случайным.

## 4.2. Оценка погрешности измерений

Выше было показано, что градуировочная зависимость при оценке температуры отжига ИМТК представляет собой уравнение первой степени, причем среднее квадратичное отклонение для поверочных измерений также является линейной функцией измеряемой температуры. При оценке случайной составляющей погрешности результатов измерений нельзя воспользоваться доверительным интервалом согласно ГОСТ 8.011-72, так как он представляет лишь выполненные измерения. При оценке достоверности градуировочной зависимости в смысле поля допуска, в котором будут находиться погрешности измерительного устройства, оценки параметров корреляционного уравнения следует распространить на всю генеральную совокупность измерений и в том числе на еще не выполненные измерения. В этом случае необходимо применять толерантные пределы [9]. При этом задаются  $P$  — доля генеральной совокупности, попадающая в толерантную область, а также доверительная вероятность  $\gamma$ , с которой эта область находится. Необходимым условием при этом является нормальность распределения величины  $t$  относительно регрессии  $T/T_{изм}$ .

Методами статистики было исследовано распределение величины  $\{(a + b \cdot t_{изм,к} - t_k), k = 1, 2, \dots, K\}$ . Для случая алмаза ( $K = 51$ ) гистограмма распределения этой величины имеет вид, близкий к нормальному распределению, а показатели асимметрии и эксцесса [8] незначимо отличаются от нуля. Аналогичный вывод можно сделать и для случая карбида кремния ( $K = 18$ ). Границы толерантной области в общем виде можно записать следующим образом:

$$L^{(\mp)} = \mp (\alpha + \beta \cdot t_{изм}) \cdot \kappa_{\gamma, P, K}, \quad (4.7)$$

где  $\kappa_{\gamma, P, K}$  — толерантный коэффициент;  $\gamma$  — доверительная вероятность;  $P$  — доля генеральной совокупности, заключенная в толерантном интервале;  $K$  — объем выборки. Следовательно, с доверительной вероятностью  $\gamma$  будет справедливо равенство

$$\text{Вер} \{ t + L^{(-)} \leq t_{ист} \leq t + L^{(+)} \} = P, \quad (4.8)$$

где  $t$  — несмещенная оценка истинной температуры. Значения  $\kappa$  приближенно вычислялись по следующим формулам.

$$\kappa = \kappa_{\infty} \left( 1 + \frac{x_f}{\sqrt{2K}} + \frac{5x_f^2 + 10}{12K} \right), \quad (4.9)$$

где  $\kappa_{\infty}$  определяется соотношением

$$2\Phi_0(\kappa_{\infty}) = P, \quad (4.10)$$



а  $x_\gamma$  можно определить из уравнения

$$\Phi_0(x_\gamma) = \gamma - 0,5, \quad (4.11)$$

здесь  $\Phi_0(x)$  – нормированная функция Лапласа [8]:

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-u^2/2} du.$$

Найдено, что значения толерантного коэффициента  $k_{\gamma, P, K}$  при  $P = 0,95$ ,  $\gamma = 0,9$ ,  $K = 51$  (алмазные ИМТК) и  $K = 18$  (ИМТК из карбида кремния) равны 2,268 и 2,544 соответственно.

Таким образом, толерантные области при измерении с помощью ИМТК можно записать следующим образом:

а) для алмазного ИМТК

$$L(\mp) = \mp(8,0 - 0,0044 \cdot t_{\text{изм}}) \cdot 2,268, \text{ } ^\circ\text{C},$$

т.е. для интервала  $100 \leq t_{\text{изм}} \leq 1000$  °C имеем  $17,2 \geq L(\mp) \geq 8,2$  °C;

б) для ИМТК из карбида кремния

$$L(\mp) = \mp(-0,6 + 0,0071 \cdot t_{\text{изм}}) \cdot 2,544, \text{ } ^\circ\text{C}$$

и, следовательно, для интервала  $600 \leq t_{\text{изм}} \leq 1200$  °C имеем  $9,4 \leq L(\mp) \leq 20,0$  °C.

## 5. РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Статистическая оценка погрешности измерений и исключение части ее систематической составляющей дают наиболее надежные результаты, и в этом смысле никаких уточнений не требуется. Однако с целью выяснения некоторых источников возможных погрешностей целесообразно провести также расчетные оценки на основе общих соображений.

Измерение температуры с помощью ИМТК базируется на зависимости параметра кристаллической решетки облученного вещества от температуры отжига (при данном времени отжига):

$$T = f(a), \quad (5.1)$$

где  $T$  – измеряемая температура (температура отжига);  $a$  – параметр кристаллической решетки облученного вещества. Из выражения (5.1) следует, что погрешность измерения температуры определяется

$$\Delta T = \frac{dT}{da} \Delta a . \quad (5.2)$$

Причем величина погрешности определения параметра решетки  $\Delta a$  может быть вычислена по уравнению для относительной ошибки при определении межплоскостных расстояний рентгеновскими методами:

$$\Delta a/a = \Delta \theta \operatorname{ctg} \theta , \quad (5.3)$$

где  $\theta$  — угол отражения рентгеновских лучей. Окончательно имеем

$$\Delta T = \frac{dT}{da} a \Delta \theta \operatorname{ctg} \theta . \quad (5.4)$$

Формула (5.4) применима и для вычисления случайных погрешностей. Здесь все величины, стоящие в правой части, известны, поэтому может быть определена и величина погрешности. Эта погрешность изменяется с температурой, так как от нее зависят величины, входящие в уравнение (5.4).

Из экспериментов по отжигу облученного алмаза хорошо известен ход зависимости расширения его решетки от температуры отжига. Собственно эта зависимость и является основой метода ИМТК. Функция  $\Delta V/V = f(T)$  может быть легко перестроена в зависимость типа (5.1). Хотя аналитический вид этого выражения неизвестен, оно может быть продифференцировано графически. Это дает значения производной  $dT/da$  в зависимости от температуры. Следует заметить, что при малых температурах порядка  $100^\circ\text{C}$  эта производная велика, так как здесь параметр практически не меняется с температурой. Далее  $dT/da$  уменьшается. При очень высоких температурах, когда большинство дефектов уже отожглось, параметр решетки от температуры изменяется опять незначительно, т.е.  $dT/da$  опять увеличивается. Все это приводит к росту погрешности измерения при малых и больших температурах и ее уменьшению при средних температурах.

Среднее квадратичное отклонение при определении угла отражения  $\theta$  слабо зависит от уровня измеряемой температуры, хотя и может несколько возрастать при очень больших углах отражения за счет расширения рентгеновских линий. Оценка  $S_\theta$  находилась по нескольким рентгенограммам. Рентгенограммы измерялись тремя операторами, каждый из которых проводил по 20 измерений одной и той же пленки. Согласно ГОСТ 11.004 — 74, вычисления производились по формуле

$$S_\theta = M_K \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2} , \quad (5.5)$$

где  $M_k$  – табулированный коэффициент;  $n$  – общее число измерений;  $\Theta_i$  – отдельное наблюдаемое значение угла отражения;  $\bar{\Theta}$  – среднее выборочное значение.

Было найдено при  $n = 60$ , что для алмаза  $S_\theta$  изменялась в зависимости от качества пленки и независимо от уровня температуры от 2,1 до  $1,1 \cdot 10^{-4}$ . При расчетах использовалось первое значение, как дающее наиболее консервативные результаты. Для карбида кремния  $S_\theta$  росло по мере увеличения температуры: 0,83; 0,87;  $1,48 \cdot 10^{-4}$  при 600, 800 и  $1200^\circ\text{C}$  соответственно. Как уже отмечалось, увеличение погрешности в этом случае связано с расширением рентгеновских линий.

Котангенс  $\Theta$  уменьшается с увеличением угла отражения, т.е. с ростом температуры отжига. Поэтому по мере увеличения температуры погрешность измерения уменьшается. Следует отметить, что влияние котангенса  $\Theta$  на погрешность измерения является решающим фактором повышения точности измерения температуры методом ИМТК. Уменьшение котангенса компенсирует воздействие других факторов, приводящих к росту погрешности при увеличении температуры, что практически всегда наблюдается при использовании других методов.

Оценка СКО случайной составляющей погрешности определения температуры производилась согласно формуле (5.4)

$$S_T = a \frac{dT}{da} S_\theta \text{ctg} \Theta. \quad (5.6)$$

Значения сомножителей, входящих в уравнение (5.6), и расчетная погрешность  $S_T$  для алмазных ИМТК приведены в табл. 7.

Таблица 7

Расчет СКО для алмазных ИМТК  
при  $a = 3,5667 \text{ \AA}$ ,  $S_\theta = 2,1 \cdot 10^{-4}$

$T, ^\circ\text{C}$	$\frac{dT}{da} \cdot 10^4, \frac{^\circ\text{C}}{\text{Å}}$	$\text{ctg} \Theta$	$S_T, ^\circ\text{C}$
150	3,4	0,139	3,56
200	2,4	0,135	2,42
300	1,6	0,120	1,44
400	1,6	0,100	1,20
500	2,0	0,088	1,32
600	2,3	0,074	1,27
650	2,5	0,070	1,31

Необходимо заметить, что при статистическом анализе СКО на основе градуировочной зависимости (3.8) в разряд случайных в значительной

мере перешли некоторые систематические погрешности, которые будут обсуждены ниже. Часть этих погрешностей, проявившихся как систематические, была исключена с помощью полученных уравнений измерения (3.8). Однако большая часть систематических погрешностей проявилась как случайные, и поэтому полученные оценки  $S_{\text{эксп}}(t)$  представляют полную погрешность.

При расчетной оценке погрешности необходимо принимать во внимание как случайную, так и систематическую составляющие в их традиционном виде. Надежный расчетный анализ систематической погрешности выполнить не просто, так как требуются дополнительные данные вплоть до постановки специальных экспериментов. К тому же получаемый при этом результат не будет обладать большей ценностью, чем результаты уже проведенного статистического анализа. Однако количественные результаты могут представить интерес с точки зрения дальнейшего совершенствования методики.

Источниками систематических погрешностей могут быть в первую очередь различные графические построения, используемые при получении рабочих графиков. Появляются систематические погрешности также в процессе измерения и регулирования температуры отжига, в процессе измерения диаметров колец линий рентгенограмм и т.д. Если исходить из гипотезы о том, что систематические погрешности являются случайными величинами, имеющими равномерное распределение, что является достаточно осторожным допущением [10], то оценка СКО композиции случайных погрешностей и неисключенных остатков систематических погрешностей может быть вычислена по формуле

$$s = \sqrt{s_{\sigma}^2 + s_x^2}, \quad (5.7)$$

где  $s$  — СКО композиции погрешностей;  $s_{\sigma}$  — оценка СКО суммы неисключенных остатков систематических погрешностей;  $s_x$  — оценка СКО случайной составляющей погрешности. Значение  $s_{\sigma}$  вычисляется по формуле [11]

$$s_{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_{\sigma,i}^2}, \quad (5.8)$$

где  $s_{\sigma,i}$  — оценка СКО неисключенных остатков  $i$ -й систематической погрешности.

Оценки СКО для отдельных систематических погрешностей вычислялись по формулам:

а) для погрешности, вызванной неточностями построений графика изохронального отжига

$$S_{\sigma,1} = \frac{\sigma_g}{\sqrt{3}} m_1 \sqrt{1 + \frac{dT}{dS} \cdot \frac{m_2}{m_1}} ; \quad (5.9)$$

б) то же в случае графика изотермических отжигов

$$S_{\sigma,2} = \frac{\sigma_g}{\sqrt{3}} m_3 ; \quad (5.10)$$

в) для погрешностей измерений температуры с помощью хромель-алюмелевой термопары

$$S_{\sigma,3} = \frac{\sigma_{Tn}}{\sqrt{3}} , \quad (5.11)$$

где  $\pm \vartheta_g$  — границы погрешности, связанной с графикой построения;  $\pm \vartheta_{Tn}$  — границы погрешности измерений температуры с помощью термопар;  $m_1$ ,  $m_2$  — масштабы по осям абсцисс и ординат для графика изохрональных отжигов;  $m_3$  — масштаб по температуре для графика изохрональных отжигов;  $dT/dS$  — производная температуры по диаметру кольца рентгеновской линии.

Приняв, таким образом,  $n = 3$ , мы не учитываем, ввиду отсутствия данных, такие источники погрешностей, как несовершенство регулирования температуры при отжиге, неточность определения времени отжига и т.д.

Используя в качестве данных в соответствии с имеющимся материалом  $m_1 = 1$  град/мм,  $m_2 = 0,02$  мм/мм,  $m_3 = 0,6 \div 1,0$  град/мм (зависимость  $m_3 = f(T)$  имеется),  $\vartheta_g = 5$  мм и  $\vartheta_{Tn} = 3,0 \div 4,5$  град [12], а также применяя вышеуказанные формулы, можно получить распределение с температурой СКО композиции погрешностей. Результаты расчетов приведены в табл. 8.

На рис. 2 приведены зависимости СКО в функции измеряемой температуры, полученные статистической обработкой и расчетом. Видно, что качественный ход зависимостей одинаков. Количественное различие объясняется невозможностью учета некоторых источников систематической погрешности, а также определенной условностью процедуры квадратичного суммирования погрешностей по уравнениям (5.7) и (5.8) при малых  $n$  [13]. Как уже отмечалось, более надежной является статисти-

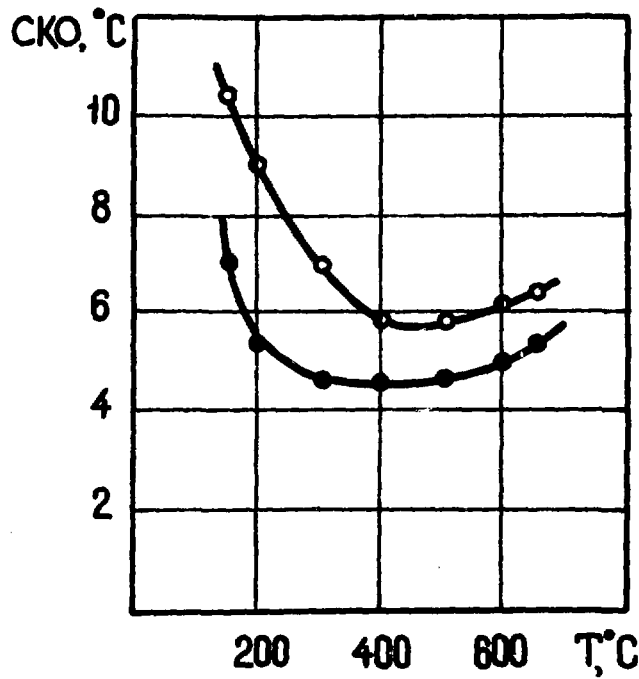


Рис. 2. Зависимость среднего квадратичного отклонения полной погрешности от температуры для алмазного ИМТК:

○ – уравнение (4.6); ● – уравнение (5.7)

Таблица 8

Результаты расчетного и экспериментального определения хода погрешностей с температурой для алмазного ИМТК

t, °C	СКО для отдельных систематических погрешностей, °C			СКО случайной составляющей погрешности S <sub>x</sub> , °C	СКО композиции погрешностей S, °C	Аппроксимация полиномом 2 степени СКО, полученного экспериментально
	S <sub>σ,1</sub>	S <sub>σ,2</sub>	S <sub>σ,3</sub>			
150	5,0	2,9	1,7	3,6	7,0	10,4
200	3,9	2,2	1,8	2,4	5,4	9,0
300	3,5	1,9	2,0	1,4	4,6	7,0
400	3,3	1,8	2,2	1,2	4,6	5,8
500	3,3	1,8	2,4	1,3	4,7	5,8
600	3,5	2,0	2,6	1,3	5,0	6,1
650	3,6	2,1	2,7	1,3	5,3	6,3

ческая обработка экспериментальных данных, она и характеризует погрешность измерения температуры с помощью ИМТК в настоящее время. Однако зависимость, полученная расчетом, интересна тем, что позволяет проанализировать основные источники погрешности. Поэтому она является основой для дальнейшего совершенствования метода с точки зрения уменьшения погрешности измерений.

## 6. СРАВНЕНИЕ ИМТК С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

В заключение приведем сравнение СКО в зависимости от измеряемой температуры для ИМТК с другими методами, применяющимися для измерения температуры в труднодоступных местах объектов новой техники. К последним относятся широко распространенные методы плавких вставок и термокрасок, а также менее известные методы термовкладышей [14] и криптонатов [15].

Относительно первых двух методов следует сказать, что с их помощью измерения температуры производится ступенчато, т.е. эти термометры указывают лишь некоторый интервал температур, внутри которого распределение истинной температуры испытания равномерно, т.е.

$$t_i^{изм} < t \leq t_{i+1}^{изм}, \quad (6.1)$$

где  $t_i^{изм}$  — температура изменения состояния (расплавления вставки или изменения цвета термокраски) измерителя с нижней стороны интервала;  $t_{i+1}^{изм}$  — ближайшая температура с верхней стороны интервала для датчиков, не изменивших свое состояние;  $t$  — истинная температура испытания.

Эти методы характеризуются числом  $N$  ступеней измерения температуры и интервалом  $t_N^{изм} - t_1^{изм}$  измеряемой температуры, а также равномерностью (приблизительной) величины отдельных ступеней. Для плавких вставок и термокрасок среднее квадратичное отклонение для каждой ступени измеряемых температур определялось из условия равномерного распределения в нем максимальных температур. Тогда, согласно ГОСТ 8.011-72, величина СКО определяется половиной диапазона, деленной на  $\sqrt{3} \approx 1,7$ . Например, для термокрасок "Термоколор" производства ФРГ одна из двух соседних красок меняет свой цвет при 520, а другая при 560°С. Общий перепад температур в этом случае составляет 40°С, и если при измерении краска "520" изменила цвет, а "560" нет, то СКО составит величину  $\sigma = (560 - 520) / 2 / 1,7 = 12^\circ\text{C}$ . Рассчитанные из этих условий значения СКО в зависимости от температуры для трех типов красок: "Термоколор" (ФРГ), "Темпилак" (США) и красок Рижского

лакокрасочного завода (СССР), а также набора плавких вставок производства США приведены на рис. 3. Здесь же представлены значения погрешности и для методов криптонатов и индикаторов температуры, основанных на изменении твердости датчика. Для двух типов датчиков 7, 8 сведений для расчета зависимости СКО от температуры не имеется, и приведены литературные данные, отнесенные ко всему диапазону изме-

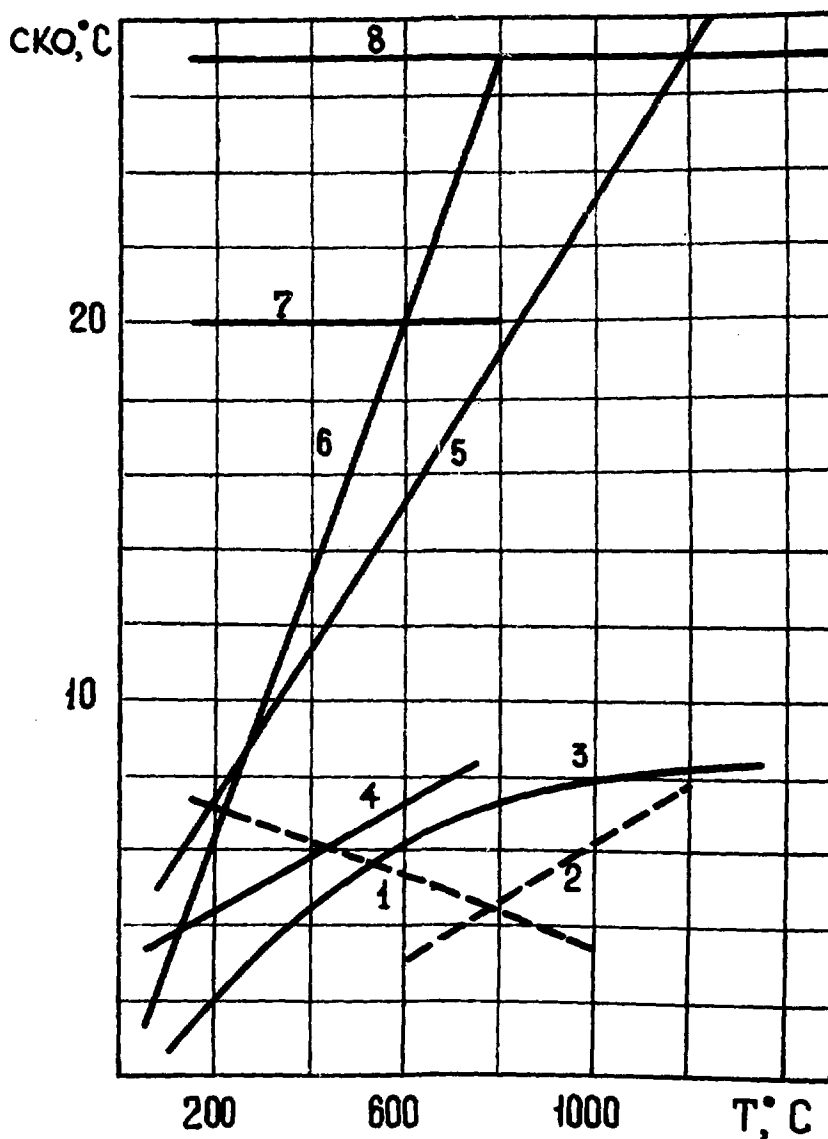


Рис. 3. Зависимости среднего квадратичного отклонения от температуры:

1 – алмазный ИМТК (4.4); 2 – ИМТК из карбида кремния; 3 – "темпчлак"; 4 – плавкие вставки; 5 – "термоколор"; 6 – термокраски Рижского завода; 7 – термокладыши; 8 – криптонаты



рений. Коротко о принципе действия этих измерителей температуры.

Термометрирование поверхности твердого тела может быть выполнено с помощью радиоактивного изотопа криптона-85, который вводится в деталь ионной бомбардировкой или при нагреве его в атмосфере при повышенном давлении. После испытания в рабочих условиях детали, насыщенной криптоном, она подвергается последовательным отжигам при постепенно повышающихся температурах. При этом контролируются температура отжига и количество выделяющегося криптона. Выход последнего из детали начинается только тогда, когда температура нагрева превысит температуру, которой деталь достигала при испытании. Таким образом, температура начала процесса выделения радиоактивного криптона служит мерой максимальной температуры испытания.

Для измерения температуры в труднодоступных местах применяются также так называемые "термоплаги" или термовкладыши. Принцип действия этого термометра основан на зависимости процесса старения некоторых аустенитных сталей от температуры и времени выдержки. Старение заключается в выделении новой фазы и соответствующем изменении твердости материала датчика. Максимальная температура в этом методе определяется по размеру отпечатка на датчике при измерении микротвердости.

Итак, уравнения зависимости СКО от температуры, полученные для термокрасок и плавких вставок в виде регрессий  $\sigma/T$ , таковы:

а) термокраски Рижского лакокрасочного завода,  $N = 23$ ,  $t = 50 \div 800^\circ$

$$\sigma(t) = -0,52 + 0,0344 \cdot t; \quad (6.2)$$

б) термокраски "Термоколор" (ФРГ),  $N = 30$ ,  $40 \leq t \leq 1300^\circ\text{C}$ :

$$\sigma(t) = 3,19 + 0,01955 \cdot t; \quad (6.3)$$

в) термокраски "Темпилак" (США),  $N = 83$ ,  $100 \leq t \leq 1350^\circ\text{C}$ :

$$\sigma(t) = -1,02 + 0,01713 \cdot t - 7,96 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (6.4)$$

г) плавкие вставки (США),  $N = 34$ ,  $50 \leq t \leq 750^\circ\text{C}$ :

$$\sigma(t) = 2,91 + 0,00707 \cdot t \quad (6.5)$$

Зависимости СКО от температуры для ИМТК из карбида кремния и из алмаза также приведены на рис. 3. Видно, что среди методов измерения температуры в труднодоступных местах метод ИМТК обеспечивает наиболее высокую точность, особенно для температур  $400 - 1200^\circ\text{C}$ . По величине погрешности ближе других к методу ИМТК находится метод термокрасок "Термоколор" производства США. Однако этот метод, как и другие, имеет один существенный недостаток: при сильных потоках газа, обдувающих термометрируемую деталь, или ее вибрациях термокраски теряют сцепление с поверхностью и облетают. Погрешность при этом, естественно, увеличивается.

## Выводы

1. В результате проведения государственных испытаний ИМТК показано, что разработанный метод обеспечивает в среднем в диапазоне  $100 - 1200^{\circ}\text{C}$  СКО, равные 6 и  $12^{\circ}\text{C}$  для стационарного и нестационарного режимов соответственно.

2. На основе поверочных измерений методами регрессионного анализа получены уравнения измерения, которые для ИМТК из алмаза и карбида кремния имеют соответственно вид:

$$\begin{aligned}t &= 3,4 + 0,9963 \cdot t_{\text{изм}}, 100 \leq t_{\text{изм}} \leq 1000^{\circ}, \\t &= 5,3 + 0,9995 \cdot t_{\text{изм}}, 600^{\circ} \leq t_{\text{изм}} \leq 1200^{\circ},\end{aligned}$$

где  $t$  – несмещенная оценка математического ожидания;  $t_{\text{изм}}$  – температура, полученная при расшифровке показаний ИМТК.

3. СКО, найденное по отношению к уравнению измерения, характеризует достоверность этого уравнения с точки зрения случайных погрешностей. Методами математической статистики показано, что зависимости СКО от  $t_{\text{изм}}$  являются линейными для ИМТК обоих типов и выражаются уравнениями:

$$\begin{aligned}S_{\langle \text{алмаз} \rangle}(t_{\text{изм}}) &= 8,0 - 0,0044 \cdot t_{\text{изм}}, ^{\circ}\text{C}, 100^{\circ} \leq t_{\text{изм}} \leq 1000^{\circ}, \\S_{\langle \text{крем. карб.} \rangle}(t_{\text{изм}}) &= -0,6 + 0,0071 \cdot t_{\text{изм}}, ^{\circ}\text{C}, 600^{\circ} \leq t_{\text{изм}} \leq 1200^{\circ}.\end{aligned}$$

В указанных интервалах оценки СКО изменяются для алмазного ИМТК от  $7,6$  до  $3,6^{\circ}\text{C}$ , а для ИМТК из карбида кремния от  $3,7$  до  $7,9^{\circ}\text{C}$  по мере увеличения температуры.

4. Найденны с надежностью  $\gamma = 0,9$  толерантные области (поле допусков), включающие долю  $P = 0,95$  всех будущих результатов при использовании уравнения измерений для оценивания максимальной температуры с помощью ИМТК. Ширина поля зависит от температуры измерения и для границ диапазонов действия ИМТК обоих типов равна:

$$\begin{aligned}\pm 17,2 \geq L_{\text{алмаз}}^{(\pm)} \geq \pm 8,2^{\circ}\text{C}, 100 \leq t_{\text{изм}} \leq 1000^{\circ}\text{C}, \\ \pm 9,4 \leq L_{\text{карб. крем.}}^{(\pm)} \leq \pm 20,0^{\circ}\text{C}, 600 \leq t_{\text{изм}} \leq 1200^{\circ}\text{C}.\end{aligned}$$

5. На основе результатов госиспытаний и проведенной затем статистической обработки показано, что наилучшая статистическая достоверность несмещенного результата ( $\text{СКО} \approx 4 \div 5^{\circ}\text{C}$ ) при измерениях с помощью ИМТК обеспечивается в интервале температур измерения  $500 - 1000^{\circ}\text{C}$ .

6. Теоретический расчет зависимости композиции случайных и систематических погрешностей от температуры измерения позволил проанализировать некоторые источники ошибок метода ИМТК и наметить пути улучшения точности.

7. Выполнен расчет зависимости СКО от температуры измерения для других методов измерения температуры в труднодоступных местах технических объектов (термокраски, плавкие вставки, термовкладыши, криптонаты) и проведено сравнение их точности с точностью метода ИМТК. Показано, что для диапазона измерений 500 – 1200°С метод ИМТК является самым точным из всех рассмотренных.

## Литература

1. Карпухин В.И., Николаенко В.А. Измерение температуры с помощью облученного алмаза. М., Атомиздат, 1971.
2. Алексеев С.И., Карпухин В.И., Николаенко В.А. Бюллетень изобретений и товарных знаков, 1964, т. 3, с. 61.
3. Доброхотов В.Д. и др. Энергомашиностроение, 1966, т. 11, с. 44.
4. Пулькис К.С. и др. Тракторы и сельхозмашины, 1972, т. 1, с. 7.
5. Колчков В.И. и др. Вестник машиностроения, 1971, т. 12, с. 12.
6. Маликов С.Ф. Введение в технику измерений. М., Машгиз, 1952.
7. Езекиел М., Фокс К. Методы анализа корреляций и регрессий, пер. с англ., М., "Статистика", 1966.
8. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М., "Наука", 1969.
9. Дубов Б.С., Копытин Н.М. Измерительная техника, 1969, т. 12, с. 70.
10. Алексеев В.Я. и др. Метрология, 1978, т. 1, с. 18.
11. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. – В сб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, вып. 134 (194). М. – Л., 1972, с. 80.
12. Добровинский И.Е., Павлов Б.П., Гортенштейн А.Ш. Измерительная техника, 1977, т. 2, с. 60.
13. Рабинович Б.Е. – В сб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, вып. 55 (115). М. – Л., 1961, с. 19.
14. Bramman J.I., Fraser A.S., Martin W.H. Int. Conf. Fastreactor, 14 April 1969, Thurso Caithness.
15. Saltvold J.R. A Survey of Temperature Measurment. Atomic Energy of Canada Limited, Pinowa Manitoba, 1976.

**Редактор Л.И. Кирюхина**  
**Технический редактор Н.А. Малькова**  
**Корректор Г.Я. Кармадонова**

**Т-14484. 28.08.79. Формат 60 x 84 1/16. Уч.-изд. л. 1,5.**  
**Тираж 146. Заказ 1443. Цена 15 коп. Индекс 3624 ИАЭ**

15 коп.

Индекс 3624