

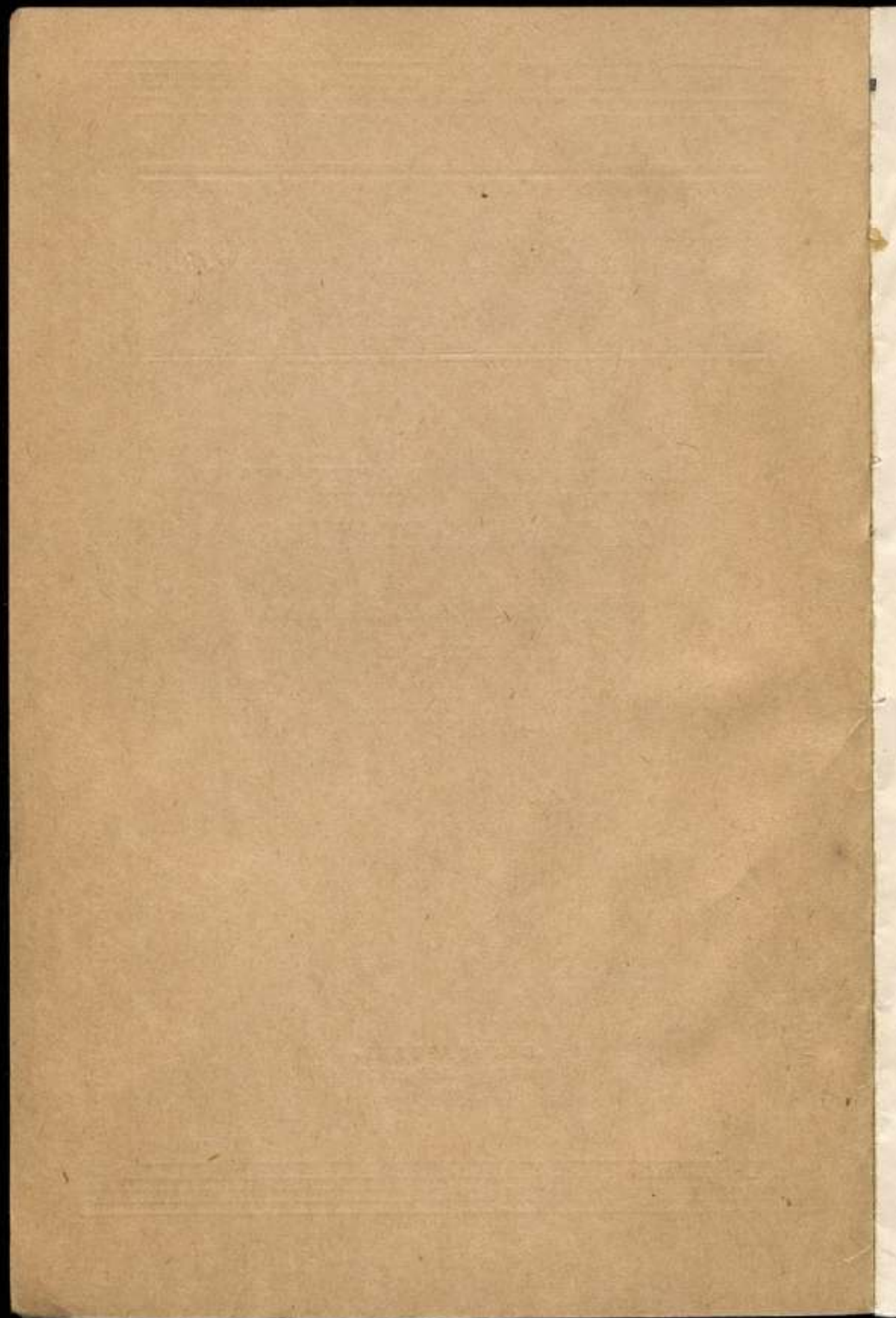
КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 42 (102)

«СТАНДАРТГИЗ»
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1960



КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
при СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА
ВЫПУСК 42 (102)

Под редакцией

канд. физ.-мат. наук А. Н. ГОРДОВА

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзного научно-иссле-
дательского института метрологии
имени Д. И. Менделеева

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
«СТАНДАРТИЗ»

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1960

m 123006

ТРУДЫ КОМИССИИ ПО ПИРОМЕТРИИ
при ВНИИМ

СБОРНИК № 2

Ответственный редактор директор ВНИИМ
д-р техн. наук проф. В. О. Арутюнов

183006

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем сборнике публикуются основные доклады, прочитанные на совещании, организованном Комиссией по пирометрии при ВНИИМ в феврале 1958 г. и посвященном измерению температур жидких металлов.

Первая статья представляет особый интерес, так как в ней изложена попытка обоснования требуемой точности измерения температур жидкой стали различных марок как в мартене по ходу плавки, так и в ковше.

Следующие четыре статьи посвящены результатам лабораторных и промышленных испытаний новых типов термопар, обладающих большей стабильностью показаний и, следовательно, могущих обеспечить большую точность измерений температур жидкой стали, чем термопары, применяемые для этой цели в настоящее время.

Остальные пять статей посвящены применению бесконтактных методов измерения температур, главным образом методов цветовой пирометрии, причем последняя из них содержит изложение методики измерения цветových температур пламени. Этот доклад был заслушан в 1957 г. и по техническим причинам не был включен в сборник № 1 Комиссии по пирометрии.

Председатель Комиссии по пирометрии при ВНИИМ А. ГОРДОВ

REPORT

The first part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the work during the year. It is followed by a detailed account of the various projects and the results achieved. The report concludes with a summary of the work done and a list of the publications issued during the year.

The second part of the report contains a list of the publications issued during the year. This list is arranged in alphabetical order of the authors' names. It includes the titles of the publications, the names of the authors, and the names of the publishers. It also gives the dates of publication and the prices of the books. This list is intended to provide a complete record of the work done during the year and to make it possible for others to obtain copies of the publications.

Printed at the Government Printing Office, London, 1955.

О ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОЙ СТАЛИ

Измерение температуры жидкой стали в производственных условиях встречает затруднения. Применение в этом случае термомпар ограничено высокой температурой ($1400 \div 1700^\circ \text{C}$) и большой химической активностью жидких сплавов железа. Для этой цели пригодны только термомпары, изготовленные из материалов с высокой температурой плавления, устойчивыми термоэлектрическими характеристиками, не реагирующие с защитными и изоляционными материалами, кислородом, влагой и др. При погружении в жидкую сталь термомпара должна быть защищена огнеупорным колпачком, выдерживающим действие высокой температуры и химическое воздействие металла и шлака и отличающимся высокой стойкостью против резкого повышения температуры, неизбежного в условиях эксплуатации термомпары быстрого погружения. Производственных термомпар длительного погружения для этих условий пока не создано, поскольку существующие типы термомпар относительно быстро меняют свою характеристику за счет диффузии элементов через спай, изменения состава, перекристаллизации и других причин.

Применение оптических пирометров в данном случае затрудняется селективностью излучения стали. В голубой части спектра сталь имеет максимум коэффициента черноты излучения, в красной — обычно наблюдается минимум коэффициента черноты излучения стали.

Обнаруживаемая на практике зависимость коэффициента черноты излучения стали не только от длины волны излучения и температуры металла, но и от его состава исключает использование радиационного пирометра и очень усложняет применение яркостных и цветных пирометров.

История измерения температуры жидкой стали ведет свое начало от яркостного пирометра, который занимал вначале монопольное положение. Это был пирометр с исчезающей нитью. Влияние селективности излучения стали ограничивалось применением красного светофильтра, обеспечивающего эффективную длину волны примерно $0,65 \text{ мк}$. Развитие техники измерений с помощью термомпар происходило значительно медленнее и большой успех имела платинородий-платиновая термомпара быстрого погружения, защищенная кварцевым колпачком и измерявшая температуру жидкого металла в пробной ложке. Однако использование обоих этих приборов в широкой производственной практике не могло удовлетворить все потребности. Основным недостатком яркостного пирометра явилась невозможность устранить влияние изменений коэффициента черноты

излучения, вызываемых даже небольшими колебаниями состава стали, на показания прибора. Особенно сильное влияние оказывает поверхностное окисление металла в присутствии элементов, способных образовывать поверхностные пленки (алюминий, хром, титан, марганец, кремний и др.). На излучении поверхности металла сказывается также раскисленность металла, присутствие неметаллических включений и другие причины [1, 2, 3]. Коэффициенты черноты излучения стали, даже в узкой области спектра, пропускаемой красным светофильтром, меняются от 0,3 до 0,8 в зависимости от состава металла и процесса его варки. Это приводит к колебаниям яркостной температуры при одной и той же истинной температуре в пределах $1410 \pm 1565^\circ \text{C}$ и делает результаты измерения температуры ненадежными.

В литературе [3] приводится случай измерения температуры яркостным пирометром вдоль струн металла, вытекающего из ковша. Металл содержал 0,5% углерода и был раскислен в ковше алюминием в количестве 0,15%. При истинной температуре металла $1610 \pm 1620^\circ$ показания пирометра, наведенного на струю у самого ковша, где металл еще не окислился, были равны 1470°C , а несколько ниже, вдоль по струе — 1530°C , т. е. в пределах одной и той же струн металла его яркостная температура оказалась сильно меняющейся.

Кроме этого, точность показаний обычного яркостного пирометра с исчезающей нитью сильно зависит от качества глазомерного аппарата и опыта пирометриста. Поэтому использование такого прибора для надежных измерений температур удавалось только в отдельных частных случаях производства углеродистой стали одной и той же марки без больших добавок алюминия, выплавленной на чистой углеродистой шихте и практически не содержащей легирующих элементов, при измерениях, выполненных очень опытными и тщательно работающими пирометристами.

При более разнообразном сортаменте продукции мартеновского цеха, наличии в цехе легированных сталей различных марок и при недостаточной опытности пирометристов результаты цеховых измерений давали очень пеструю картину. По-видимому, изменения показаний, вызванные систематическими и случайными ошибками, оказывались одного порядка с пределами колебаний самой измеряемой температуры или даже их превышали. Естественно, что такие результаты измерений теряли всякое значение для индивидуальной оценки качества плавки. Иногда можно было рассчитывать на правильный ответ только при статистических анализах, базирующихся на большом количестве измерений, когда устанавливались общие качественные связи между температурой и различными производственными показателями.

Серьезным недостатком являлось еще то обстоятельство, что измерения оптическим пирометром производились слишком поздно — при выпуске стали из мартена, т. е. результаты измерений можно было учесть только при назначении выдержки в ковше. Однако производственное значение такой корректировки времени выдержки весьма ограничено. Заметно охладить слишком горячий металл за счет увеличения времени его выдержки в ковше можно только в ковшах емкостью не более $20 \pm 30 \text{ т}$. В ковшах большой емкости (например $100 \pm 150 \text{ т}$) металл стынет слишком медленно, чтобы можно было широко использовать такой прием, не рискуя повредить разливочные стопоры при чрезмерной выдержке. Измерение яркостным пирометром температуры металла по ходу плавки, например, при сливе металла с ложки, требует значительной опытности пирометристов и может быть использовано в особых случаях (опытные плавки и др.).

Применение термометра быстрого погружения для измерения температуры пробы металла в ложке сразу привлекло к себе внимание значи-

тельно большей объективностью по сравнению с яркостным пирометром. Однако этот метод требует соблюдения некоторых предосторожностей. Операция извлечения металла из печи пробной ложкой не встречает особых трудностей. Она осуществляется по много раз на каждой плавке следующим образом. Сначала железную ложку тщательно ошлаковывают, в результате чего на внешней и внутренней поверхностях ложки образуется теплоизолирующий слой шлака, нагретого до температуры плавления. Если шлак слишком жидкий и затвердевает только тонкий его слой, то ложку ошлаковывают повторно или более длительное время. Металл в ложке также покрыт слоем жидкого шлака. Все эти операции в каждом мартеновском цехе отработаны в деталях. Обычно они совершаются очень быстро, и за это время металл успевает остыть не более чем на $5 + 7^\circ$ (опыты И. А. Андреева, М. З. Розенберга и др. [46]).

Для измерений температуры металла в ложке с поверхности металла предварительно снимают шлак, после чего в него погружается колпачок термопары. С этого момента потери тепла излучением, происходящие с поверхности металла, не защищенной шлаковым покровом, возрастают в больших размерах. Между тем длительность одного измерения, которая определяется термической инерцией термопары, защищенной кварцевым колпачком, и временем установления показаний электроизмерительной аппаратуры*, обычно составляет по крайней мере $7 + 10$ сек, после чего на ленте потенциометра фиксируется остановка указателя. За это время температура металла падает на $80 + 120^\circ$ С. Это обстоятельство исключает повседневное производственное использование метода.

В настоящее время измерение температуры чаще всего осуществляется непосредственно в печах и ковшах с помощью платинородий-платиновых и вольфрам-молибденовых термопар погружения. В последние годы начали применять платинородиевые термопары, оба электрода которых содержат различные концентрации родия. Серьезные преимущества этой термопары доказаны и состав ее термоэлектродов уточнен [5]. Однако широкого внедрения эта термопара еще не получила.

Все приспособления для измерений температур с помощью термопар находятся в стадии постоянного совершенствования в целях повышения стойкости огнеупорных деталей, стабильности термопар, упрощения обслуживания и т. п. Крупным шагом вперед является широкое распространение автоматических потенциометров с самопишущими устройствами. За границей нашли применение визуальные цветовые пирометры (Биоптикс и Триколор). В СССР в настоящее время разработана значительно более совершенная конструкция автоматического цветового пирометра. Однако перед приборостроителями и конструкторами не поставлено и не обосновано основное требование: какая точность измерения температур должна быть обеспечена для того, чтобы необходимые эксплуатационные задачи сталеплавильного производства решались с наибольшим успехом. Настоящая статья представляет собой попытку некоторого обобщения накопленного опыта, на основании которого можно было бы попытаться сформулировать вышеуказанное требование, хотя бы в первом приближении.

О производственном контроле температуры металла и его результатах

Практика эксплуатации приборов для измерения температур металла в сталеплавильном производстве выдвигает следующие основные требования.

* Эта величина составляет 3 — 4 сек и даже больше, особенно при применении милливольтметров.

1. Фиксация результатов измерения температуры металла в различные моменты плавки и разливки с целью накопления данных для последующего статистического анализа. В результате анализа устанавливается влияние температуры жидкого металла при плавке на характерные для сталеплавильного производства параметры или на качество литья.

2. Измерение температуры металла по ходу плавки с тем, чтобы обеспечить ее минимальное значение, устраняющее аварийно-холодную разливку и обеспечивающее отсутствие определенных дефектов поверхности или структуры, возникающих на слитках стали данной марки.

3. Обеспечение выпуска и разливки металла в определенных температурных пределах. Такая задача возникает при изготовлении продукции, для которой существует не только нижний, но и верхний предел допустимых температур разливки или процесса варки.

Первое требование может быть удовлетворено с помощью наиболее простых и технически мало совершенных приемов. Действительно, статистический анализ допускает тем большую погрешность отдельных измерений, чем большее число случаев рассматривается. Однако с помощью недостаточно точных приборов нельзя обеспечить проведение отдельных плавки внутри жестких температурных пределов. Для этого потребуются применение приборов со значительно более высокой точностью. Если с помощью статистического анализа не устанавливаются необходимые температурные пределы, а изучается только влияние температуры плавки на свойства металла, часто бывает возможной даже чисто качественная оценка температуры металла по косвенным показателям, таким как скорость и степень восстановления марганца из шлака в основном процессе и кремния и марганца в кислом процессе, скорость горения углерода и содержание окислов железа в шлаке. Иногда применяются более сложные параметры, определяющие состав металла и шлака и зависящие от их температур*.

Для удовлетворения второго требования приходится применять уже более надежные и точные приборы. Для иллюстрации этого положения разберем наиболее простой случай, когда от прибора требуется обеспечение минимальной температуры металла, устраняющей аварийно-холодную разливку. Минимально допустимой температурой металла в этом случае будет такая, при которой обеспечится свободное его истечение из ковша и заполнение изложниц без литейного брака (недоливки и пр.). Температура выпуска может быть определена, если к температуре разливки добавить величину снижения температуры металла при его выпуске в ковш и величину снижения температуры в ковше по ходу разливки. Если разливка будет происходить непосредственно из ковша в изложницу, то можно допустить более низкую температуру разливки и выпуска. Применение промежуточной воронки или ковша уже требует заметного увеличения температуры разливки, причем она должна быть тем выше, чем больше площадь охлаждения поверхности металла в промежуточном устройстве и чем медленнее разливка.

Применение стаканов малых диаметров в промежуточном устройстве или переход на сифонную разливку с большим количеством разветвленных сифонных ходов (особенно большого числа мелких слитков) заставит еще более повысить допустимую минимальную температуру разливки. Падение температуры по ходу разливки тем больше, чем она длительнее, чем меньше

* Например, отношения $\frac{(MnO)}{[Mn]}$, $\frac{(Cr_2O_3)}{[Cr]}$ или $\frac{[Mn](FeO)}{(MnO)}$ и т. д. Круглые скобки относятся здесь к концентрациям в шлаке, квадратные — к концентрациям в металле (см., например, [4, 6, 7 и 8]).

емкость ковша и ниже температура его кладки, а также чем тоньше слой шлака (последнее справедливо до известного предела, за которым увеличение толщины шлакового покрова перестает оказывать влияние). В качестве примера рассмотрим случай, описанный автором ранее [9]. Сталь с содержанием 0,5% углерода из 60-тонного ковша сифоном в слитки весом по 2,5 т (6 слитков на поддоне) еще можно было разливать при 1400° С яркостной температуры или при 1510° С истинной температуры (перегрев 20° С над точкой плавления 1490° С). Падение температуры металла в процессе разливки всей плавки (средние данные по 150 плавкам) составляет 40 — 50°. При разливке плавки весом 40 — 60 т падение температуры по многочисленным наблюдениям автора составляет приблизительно 30 — 40° С (для ковша 80 т по английским данным около 35° С [10], для ковша 15 т по В. Г. Грузину [11] около 40 — 60° С). Следовательно, минимально возможная температура выпуска металла должна быть 1590 — 1610° С (1470 — 1490° С яркостной температуры), что составляет 100 — 120° С перегрева над точкой плавления.

Если при выпуске металла ориентироваться только на показания прибора, то необходимо нагревать его тем выше, чем больше возможная ошибка измерения температуры. Например, при точности измерения $\pm 30^\circ\text{C}$ выпуск плавки при показании прибора 1590° С может привести к аварии по крайней мере на последних поддонах, так как в этом случае ошибка в $+30^\circ\text{C}$ означает, что истинная температура металла на выпуске будет 1560° С, и в конце разливки можно рассчитывать получить 1460 — 1440° С, т. е. температуру ниже точки затвердевания металла (1490° С).

Невысокий класс точности прибора не позволит в данном случае использовать возможность выпустить плавку на нижнем пределе температур и сэкономить при этом на продолжительности плавки, на стойкости огнеупорной кладки печи и на расходе топлива. Не следует думать, однако, что приведенные соображения можно отнести к разряду второстепенных. Количество плавки обычных сталей по сравнению с качественными и высококачественными очень велико, и возможность даже небольшого дополнительного сокращения продолжительности плавки или расхода топлива вырастает в огромные цифры экономии в масштабе государства. Между тем возможности сокращения средней продолжительности плавки в хорошо механизированном современном цехе с автоматизированными мартеновскими печами при точно заданных и выполняемых температурных графиках плавки может достигать весьма заметных величин. Действительно, обычно сталевар и мастер обязательно немного перегревают металл с запасом не только на случай возможного непредусмотренного его охлаждения (например, затянувшийся выпуск металла из-за неполадок с выпускным отверстием), но и с расчетом на неточность своего глазомерного определения. Чем опытнее сталевар или мастер, тем увереннее, а потому раньше по времени, производится выпуск плавки. Разница в длительности плавки за этот счет может доходить до 39 мин, а в отдельных случаях значительно больше. В практике автора имел место случай, когда на одной группе печей после двух случайных аварийно-холодных плавки, выпущенных подряд, систематически держали плавки на 1—1,5 часа дольше, чем это было нужно. Часто говорят в таких случаях о нерешительности сталевара или мастера. Между тем чем горячее металл, тем выше расход топлива, тем горячее рабочее пространство печи, тем менее долговечна огнеупорная кладка печи.

При обеспечении достаточно точного измерения температуры металла его нагрев может быть осуществлен современной автоматикой достаточно точно. Поэтому следует признать совершенно неверной существующую иногда тенденцию обеспечивать достаточно точное измерение (термопарами

погружения) температуры только при плавках высококачественного металла.

Очевидно, аналогичные соображения будут справедливыми, если нижний предел температур плавки обусловлен технологическими причинами, такими, как общая загрязненность металла, ухудшение качества донной части слитка, поверхностные браки, шиферные изломы, возникающие в ряде случаев при низких температурах разливки и обуславливающие недопустимое снижение эксплуатационных характеристик изделий. Например, нижний предел температур плавки при отсутствии верхнего имеет место для стали 1X18H9T, которую следует разливать быстро при температуре не ниже 1560°C (фактически $1560 + 1620^{\circ}\text{C}$). Высокая температура разливки резко улучшает поверхность слитков и не вызывает ухудшения структуры. Невысокая точность измерительного прибора и в этом случае потребует выпуска плавки с большим и излишним запасом по температуре металла.

Мартеновские стали с большим содержанием хрома (хромо-никелевые и хромо-молибденовые стали с содержанием хрома $3 + 5\%$, используемые в химической промышленности) тоже обычно не имеют верхнего предела оптимальных температур разливки (или, может быть, он не достигается в мартеновских печах из-за охлаждающего действия больших присадок феррохрома). Однако нижний предел для температуры начала разливки имеется и составляет приблизительно $1610 + 1620^{\circ}\text{C}$. При $1590 + 1600^{\circ}\text{C}$ уже образуется плотная корка, увеличивается загрязненность металла, портится его микроструктура, растет шиферность, т. е. появляются все признаки холодной разливки. В этом случае необходимо обеспечить температуру металла (до присадки феррохрома) не ниже 1670°C при измерении ее с помощью термопары. Автору только однажды пришлось заметить некоторое ухудшение механических свойств металла при испытании хромо-никелевой стали (с содержанием хрома до 2%), изготовленного в кислой печи, когда температура металла доходила по ходу восстановления кремния до $1700 + 1710^{\circ}\text{C}$ *. Однако в этом случае на других сталях (с содержанием хрома до 3%) количество дефектов по загрязненности металла, обнаруживаемых методом ультразвукового контроля, возросло. При выплавке этих сталей приходится до добавки феррохрома добиваться нагрева металла с «запасом» (например, до 1700°C), что при отсутствии кислорода ведет к очень напряженной тепловой работе печи и к тем более сильному перегреву рабочего пространства и насадок, чем выше содержание хрома в стали. На основных печах при динасовом своде это создает очень большие трудности, которые становятся часто непреодолимыми.

При наличии прибора, способного надежно оценить разницу температур в $10 + 15^{\circ}$, задача изготовления такого рода стали сильно облегчается. Значительно сложнее будет обстоять дело, если для стали данной марки имеются не только нижний, но и верхний пределы температур разливки (третье из перечисленных нами требований). Такие оптимальные пределы для температур металла имеют место во многих случаях. Чрезмерно высокая температура разливки влечет за собой появление дефектов макростроения (например, излишне большие размеры дендритов или глобуль, по-

* В. Г. Грузин [11] указывает на возможность разовых кратковременных измерений (с вольфрам-молибденовой термопарой с кварцевым колпачком) температур, значительно выше температуры плавления кварца — до 1900°C , при условии снижения продолжительности замера до 6 сек. В этом случае расплавленный кварцевый наконечник благодаря силам поверхностного натяжения не успевает отделиться от термоэлектродов и создает тонкую защитную шлаковую оболочку. После извлечения термопары из металла хрупкие остатки перерожденного кварца легко снимаются с рабочего конца, оставшегося неповрежденным. В практике этого автора были случаи измерения такой термопарой температур металла до 1730°C .

явление междендритных внутренних и наружных трещин, иногда снижение механических свойств). Пониженная температура разливки вызывает появление пороков, упоминавшихся выше.

Случаи нормирования величины оптимального интервала температур разливки встречаются достаточно часто, и наличие точного прибора может оказаться особенно ценным, так как позволит снизить расход металла, порой очень дорогого. Очевидно также, что класс точности прибора должен быть тем выше, чем меньше рекомендуемый интервал оптимальных температур.

Академик Н. Н. Доброхотов [1] считает, что высокая температура стали при разливке ни в каком отношении не может снизить ее качество, следовательно, верхнего предела температур разливки и выпуска вообще не должно быть. Рассматривая этот вопрос только с точки зрения качества металла (экономическое значение нормирования определенных перегревов металла приведенная точка зрения не опровергает), следует отметить, что положение Н. Н. Доброхотова для ряда марок стали оказывается справедливым, но имеет большое количество исключений, приведенных ниже. Поэтому правильнее обратиться к существующим многочисленным эмпирическим данным, не вдаваясь в механизм влияния температуры на качество металла. В каждом случае можно заключить с большей или меньшей достоверностью, что отрицательное влияние перегрева металла связано с влиянием повышенного содержания водорода [12], с усадочными и другими дефектами макроструктуры [13, 14], с поверхностными трещинами [14, 15, 16, 17, 18, 19], с загрязнениями [20] и т. д. Во всех перечисленных случаях необходимо обеспечивать надежное измерение той предельно высокой температуры металла, которую нежелательно превысить (не считая нижнего предела температур, существенного во всех случаях).

Данные статистической обработки результатов испытаний большого количества слитков углеродистой стали весом 5 ± 7 т при отливке сверху, произведенной еще в 1930—1932 гг. [21], показали, что наименьшее количество брака на блюминге по рванинам, трещинам и плесам получено на стали с содержанием углерода $0,10 \pm 0,20\%$ при яркостной температуре выпуска на желобе $1480 \pm 1500^\circ\text{C}$ (истинной $1600 \pm 1625^\circ\text{C}$); с содержанием углерода $0,30 \pm 0,40\%$ — при яркостной температуре выпуска $1460 \pm 1480^\circ\text{C}$ (истинной $1580 \pm 1600^\circ\text{C}$). Соответственно оптимальные яркостные температуры начала разливки, измеренные на струе из ковша, составили $1460 \pm 1480^\circ\text{C}$ и $1440 \pm 1460^\circ\text{C}$ (истинные $1580 \pm 1600^\circ\text{C}$ и $1565 \pm 1580^\circ\text{C}$). Это данные, установленные в 1931—1932 гг., характерны тем, что они были получены для одного цеха (емкость печей 150 ± 160 т) на углеродистой шихте и, что очень существенно, с помощью опытных пирометристов. Отсюда можно заключить, что величина интервала оптимальных температур может оказаться в пределах всего $20 \pm 25^\circ\text{C}$. Это обстоятельство подтверждается опытом Кузнецкого, Магнитогорского и Челябинского металлургических заводов.

При содержании в стали $0,5\%$ углерода наиболее удовлетворительные результаты плавов (судя по виду сернистых отпечатков от прокатанных полос) получались на уральских заводах при разливке слитков весом $2,5$ т (сифоном) при яркостных температурах в пределах $1420 \pm 1460^\circ\text{C}$ (истинные $1530 \pm 1580^\circ\text{C}$) [9]. Содержание легирующих элементов в шихте и качество самих измерений были такими же, как и в предыдущем случае. Было замечено резкое ухудшение результатов плавов при подъеме температуры разливки с 1460°C (истинных 1580°C) до $1460 \pm 1480^\circ\text{C}$ (яркостных), что указывает на необходимость использования прибора, оценивающего разницу в температурах металла, не превышающую 20°C .

Оптимальная температура разливки стали для рам паровозов ФД, установленная автором на другом заводе (слитки весом $15 \div 20$ т, отливаемые сверху), оказалась в пределах яркостных температур $1410 \div 1440^\circ\text{C}$ (истинных $1520 \div 1545^\circ\text{C}$). Соответствующие температуры выпуска находились в пределах $1430 \div 1460^\circ\text{C}$ ($1540 \div 1580^\circ\text{C}$ истинных). По немецким данным, приводимым Боссом и Виллемсом [22], истинная температура выпуска стали марок С35 и С45 должна быть $1600 \div 1630^\circ\text{C}$. Мягкая автоматная сталь имеет нижний предел температуры выпуска 1640°C , так как ниже этой температуры при разливке на поверхности металла получается слишком плотная пленка; температура выпуска 1670°C оказывалась уже слишком высокой. Для мягких, кипящих сталей может быть принята температура выпуска 1610°C (без образования скардовин); температура выпуска 1655°C в этом случае оказывается слишком высокой. Соответственно оптимальные цветовые температуры разливки, измеренные пирометром Биоптикс, оказались равными $1580 \div 1600^\circ\text{C}$ для углеродистых сталей (0,35—0,50% углерода). Низкоуглеродистые стали для холодной прокатки имеют оптимальные цветовые температуры разливки $1600 \div 1620^\circ\text{C}$. Для спокойной автоматной стали (содержание углерода 0,1—0,2%, серы 0,18—0,25%) на первом поддоне по этим данным температура должна быть $1600 \div 1620^\circ\text{C}$, на втором и последующих поддонах — на $15 \div 30^\circ\text{C}$ выше. Емкость ковша была 75 т, разливка осуществлялась сифоном. Для обеспечения вышеуказанной точности температур выпуска рекомендуется производить одновременные измерения и пирометром Биоптикс и термопарой.

При разливке на тележках следует отдать предпочтение отливке сортовых слитков весом более 5 т непосредственно из ковша. Такой метод разливки существует и широко распространен как на наших заводах, так и в США и в Англии.

Применение сифонной разливки оказывается экономически значительно менее выгодным, хотя при этом легче обеспечить хорошую поверхность слитка. При отливке непосредственно из ковша возможность регулирования скорости разливки в зависимости от температуры металла существенно уменьшается, поэтому возникает необходимость строго регламентировать температуру выпуска. В противном случае возрастает брак по трещинам в прокатке.

На рис. 1, а представлены результаты исследования, предпринятого в Англии, по которым были установлены температуры разливки для ряда сталей. Там же показаны результаты, полученные в Германии К. Гутманом [23]. Аналогичная сводка, собранная Людеманом, показана на рис. 1, б. Температуры плавления металла подсчитаны по данным табл. 1, в которой даны сведения о снижениях температуры металла различными примесями металла, отнесенные на 1% примеси по данным Розера и Венделя [29]. Таким образом во всех случаях установлена необходимость иметь перегрев над точкой плавления стали в $70 \div 100^\circ\text{C}$, причем в дальнейшем пришли к тому, что температура перегрева должна быть $70 \div 90^\circ\text{C}$, т. е. сокращается интервал рекомендуемых температур с 30 до 20°C (ковш 80 т, продолжительность разливки $30 \div 40$ мин). По другим данным [24], в поисках путей для ликвидации трещин при прокатке углеродистой мягкой стали с содержанием $1,18 \div 0,22\%$ углерода выяснилось существование верхнего предела температур разливки, равного 1590°C (по термопаре); для автоматной стали (0,09 + 0,11% углерода и 0,2 + 0,3% серы при 1,0 + 1,2% марганца) этот предел составил 1595°C и для марганцово-молибденовой стали (углерода 0,33 + 0,37%, марганца 1,45 + 1,60% и молибдена 0,30 + 0,35%) — 1600°C . Авторами отмечено, что превышение указанных температур на 10—15° уже ведет к появлению

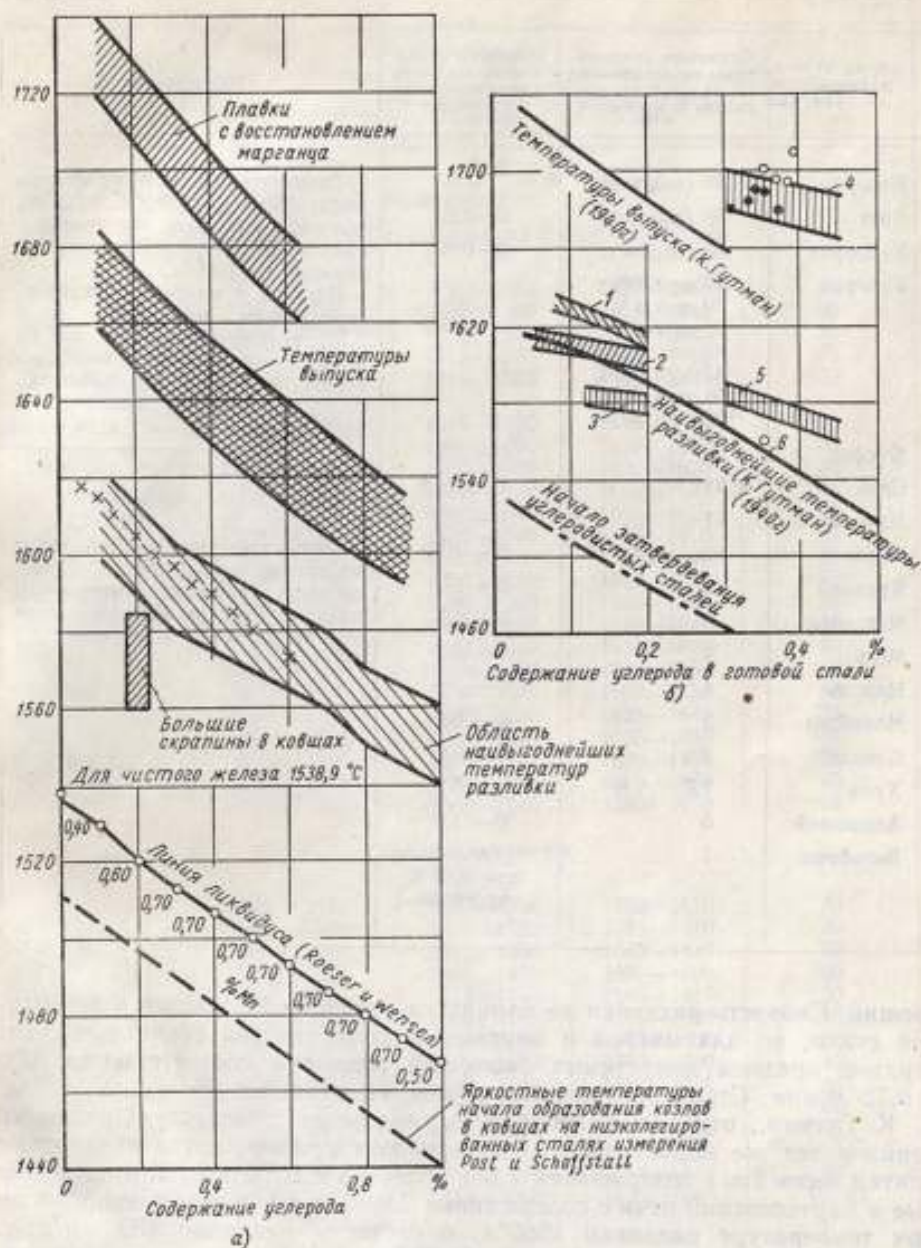


Рис. 1. Сводка оптимальных температур разлики и выпуска металла по немецким и английским данным:

а) по исследованиям Wärmest. He 1936—1940 гг. и 1950 г., 500 замеров на 50 заводах х — средние значения температур (К. Гутман); заштрихованная область — английские данные;

б) сводка R. F. Lüdemann по температурам разлики и выпуска.

1 — сталь для толстой заготовки, углеродистая легированная (1941 г.); 2 — кипящая сталь для толстой заготовки (1941 г.); 3 — сталь 10 стандартной заливки; 4 — специальные плавки; ○ — с восстановлением марганца; ● — с восстановлением хрома; 5 — стальное литье и слитки для поковок до 6,5 т; 6 — слитки для поковок 18—30 т (1941 г.).

Элемент	Снижение температуры затвердевания на каждый 1% (весовой) примеси, °С	Проценты содержания элемента в металлическом расплаве	Примечание
Водород	1300 (подсчет)	—	Температура плавления чистого железа (99,99%) 1538,9° С. 0,0023% водорода снижают эту температуру на 3°, отсюда 1% водорода снижает на 1300° С. Пример подсчета снижения температуры плавления: 2,5% углерода $2,5 \times 80^\circ = 200^\circ$ С. 0,6% марганца $0,6 \times 5^\circ = 3^\circ$ С. 0,033% фосфора $0,033 \times 30^\circ = 1^\circ$ С. 0,04% серы $0,04 \times 25^\circ = 1^\circ$ С. 8% никеля $8 \times 4^\circ = 32^\circ$ С. Итого 237° С Температура плавления 1538,9 — 237 = 1302° С. Ошибка от такого вычисления не превышает 3 ÷ 5° С, т. е. способность снижения температуры плавления железа обычными примесями является аддитивной.
Азот	90 (подсчет)	0—0,03	
Кислород	80 (подсчет)	0—0,03	
Углерод	65 при 0%		
	70 при 1%		
	75 при 2%		
	80 при 2,5%		
	85 при 3,0%		
	91 при 3,5%		
	100 при 4,0%		
Фосфор	30	0— 0,7	
Сера	25	0— 0,08	
Мышьяк	14	0— 0,5	
Олово	10	0— 0,03	
Кремний	8	0— 3,0	
Марганец	5	0— 1,5	
Медь	5	0— 0,3	
Никель	4	0— 9,0	
Молибден	2	0— 0,3	
Ванадий	2	0— 1,0	
Хром	1,5	0—18,0	
Алюминий	0	0— 1,0	
Вольфрам	1	18% вольфрама при 0,66% углерода	

трещин. Скорость разливки не влияла на образование трещин в автоматной стали, но для мягкой и марганцево-молибденовой стали выявлены верхние пределы допустимых скоростей разливки соответственно 0,50 и 0,75 м/мин. Сталь разливалась из ковшей емкостью 75 т.

К. Гутман, отмечая колебания оптимальных температур разливки одних и тех же марок стали [23], приводит пример, когда квадратные слитки весом 2 т с содержанием 1,0% углерода и 1,5% хрома, выплавленные в мартеновской печи с содержанием 0,04% серы, имели трещины уже при температуре разливки 1560° С и скорости разливки 460 мм/мин. Электросталь (дуговая печь), выплавленная с 0,02% серы, не давала трещин в прокатке при 1600 ÷ 1645° С и скоростях разливки 508 ÷ 635 мм/мин. Однако интервал допускаемых температур в 25 ÷ 35°, доходящий до 20° С, оказывается одинаковым для всех рассмотренных случаев.

В свете изложенного представляет большой интерес практика регламентирования температур металла в цехах Магнитогорского и Кузнецкого металлургических комбинатов, где слитки также разливаются непосредственно из ковша (в Кузнецком металлургическом комбинате часть слитков разливалась через промежуточное устройство) и где важно наладить надежное измерение температуры металла, так как регулировки скоростей

Таблица 2

Марка стали	Температура, °С			Диаметр разли- вочного ста- качика, мм
	при расплавлении	в начале чистого напелия	перед раскисле- нием	
Печи 190 т				
Разливка через промежуточный ковш				
08СП	1510—1550	1520—1560	1620—1640	30
10СП	1510—1550	1520—1560	1620—1640	30
15СП	1510—1550	1520—1560	1620—1640	30
Ст. 3 топ.	1510—1550	1515—1555	1615—1635	33
Ст. 3СП	1510—1550	1515—1555	1615—1635	33
Ст. 4: 20; 25				
котельная	1505—1545	1510—1550	1615—1635	33
Осевая	1500—1540	1510—1550	1610—1630	33
Ст. 5; 30	1500—1540	1510—1550	1600—1620	35
Ст. 6; 40; 50Д	1500—1540	1510—1550	1600—1620	35
65Г	1500—1540	1500—1540	1595—1615	35
С-60	1500—1540	1500—1540	1590—1610	35
У7	1500—1540	1500—1540	1585—1605	35
У8	1500—1540	1490—1530	1580—1600	35
У10	1500—1540	1490—1530	1575—1595	35
20Х	1505—1545	1510—1550	1620—1640	35
40Х	1500—1540	1510—1550	1610—1630	40
18ХГТ	1510—1550	1510—1550	1640—1650	40
12ХНЗА	1510—1550	1510—1550	1630—1650	33
20ХНЗА	1510—1550	1510—1550	1625—1645	33
СХЛ1-4	1510—1550	1510—1550	1630—1650	35
30ХГСА	1510—1550	1510—1550	1630—1650	40
55С2; 60С2	1500—1540	1500—1540	1610—1620	40
СГ70	1500—1540	1500—1540	1580—1600	35
Разливка сверху				
08КИП	1510—1550	1510—1550	1585—1610	30
10КИП	1510—1550	1510—1550	1585—1610	30
15КИП	1510—1550	1510—1550	1585—1610	33
Ст. 3КИП	1500—1540	1500—1540	1580—1600	33
Ст. 3СП	1505—1545	1505—1545	1595—1615	33
Ст. 5; 6	1500—1540	1500—1540	1585—1605	33
40; Д; 50	1500—1540	1500—1540	1585—1605	33
Р43	1490—1530	1490—1530	1570—1590	45
Р50	1490—1530	1490—1530	1565—1585	45
Р65	1490—1530	1490—1530	1565—1585	45
НД-2	1510—1550	1510—1550	1610—1630	33
35ХГСА	1510—1550	1510—1550	1630—1650	40; 45
37ХС	1510—1550	1510—1550	1625—1645	40
ХЗНМ	1510—1550	1510—1550	1630—1650	40; 45
Печи 380 т				
Ст. 3КП	1510—1550	1520—1560	1580—1600	33—35
Ст. 3СП	1510—1550	1520—1560	1595—1615	30—35
Ст. 5; 6	1505—1545	1515—1555	1590—1610	35
Р (рудничная)	1505—1545	1515—1555	1580—1600	45
Д; 45	1505—1545	1515—1560	1590—1610	33
Л-53	1500—1540	1510—1550	1585—1605	35
Р-43	1495—1535	1505—1545	1575—1595	45
Р-50	1495—1535	1505—1545	1570—1590	45
Р-65	1495—1535	1505—1545	1570—1590	45

разливки практически нет [25] (следует учесть еще большую емкость ковшея, соответствующую печам емкостью 250 и 350 т, и большой напор металла при такой разливке).

В табл. 2 приведены пределы температуры металла на различных этапах процесса, принятые на Кузнецком металлургическом комбинате [25].

С. Т. Отливанов и И. А. Соколов сообщают более подробные данные и приводят конкретные примеры регулирования температуры металла [15]. Дополнительные сведения о температурном поплавоочном контроле на Кузнецком металлургическом комбинате сообщает А. Н. Васильев [26], приводя такие данные, которые необходимы для регулирования температуры металла отдельно для печей емкостью 190 и 380 т (табл. 3).

Таблица 4

Таблица 3

Добавка	Снижение температуры металла, °С	
	печь 190 т	печь 380 т
1 мульда руды или боксита	30	15
1 мульда извести	20	10
	Увеличение скорости подъема температуры металла в одну минуту	
1000 м ³ коксовального газа	0,5 ÷ 0,7	0,4 ÷ 0,5

Марка стали	Установленные пределы температур металла перед раскислением, °С
08КП	1590 ÷ 1605
Ст. 1КП	1590 ÷ 1605
Ст. 2КП	1585 ÷ 1600
Ст. 3-4СП	1580 ÷ 1595
Ст. 5	1575 ÷ 1590
Ст. 35	1575 ÷ 1590
Ст. 45	1570 ÷ 1585
Ст. 50	1570 ÷ 1585
Ст. 55	1570 ÷ 1580
Ст. 60	1570 ÷ 1580

Для облегчения подсчета необходимого количества коксовального газа применяется специальная номограмма.

Допустимые колебания температуры металла снижаются к концу плавки с 40 до 20° С (табл. 2). Регулировке температур металла в узких пределах помогает большая емкость печей, создающая большую тепловую инерцию ванны.

В табл. 4 приведены температуры различных марок стали перед раскислением в печи, принятые на Магнитогорском комбинате [16]. Разливка производится сверху непосредственно из большого ковша через 2 отверстия в слитки весом по 7 т. Диаметр разливочных стаканчиков 30 мм.

Из табл. 2 и 4 можно видеть, что на обоих заводах в одинаковых условиях (разливка сверху без промежуточного устройства) задаются близкие по своей величине температуры разливки и в обоих случаях необходимо иметь узкие пределы колебаний температур выпуска (такие же, как в ранее приведенных на рис. 1 английских и немецких плавках). По общему признанию ведение плавки по такому, т. е. очень жесточенному, температурному режиму действительно привело к сокращению брака металла и благоприятно сказалось на стойкости свода и подины.

Из изложенного видно, что перегревы металла над температурой его плавления регламентируются на наших больших печах (190 ÷ 380 т) в пределах 80 ÷ 100° С при разливке сверху для мягких сталей, 100 ÷ 120° С при среднеуглеродистых сталях и в пределах 110 ÷ 130° С для большинства марок стали при разливке через промежуточные устройства до 120 ÷ 140° С для сталей с содержанием углерода 0,8 ÷ 1,0%).

Эти перегревы оказываются несколько меньшими, чем это рекомендовано в Англии и Германии (рис. 1), где их устанавливали применительно к печам меньшей емкости и они связаны с большими, чем на печах Кузнецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов, падениями температур при выпуске и разливке. При разливке низкоуглеродистых сталей, наиболее подверженных образованию горячих трещин, отличие наших норм от английских наибольшее. Для сталей с содержанием 0,5 — 0,6% углерода, наименее подверженных растрескиванию, и для легированных сталей, требующих повышенных температур разливки, допустимые значения температуры металла повышаются. На основании опыта Челябинского металлургического завода при разливке со скоростью 300 — 400 мм/мин качественных сталей сифоном в слитки весом 2,65 — 6,2 т рекомендуется, чтобы температура металла в ковше после выпуска была на 100 — 120° С выше точки ликвидуса [27].

В упомянутой литературе имеются лишь общие указания на то, что такой режим удастся соблюдать при большинстве плавов и что он привел к снижению брака металла и увеличению стойкости печей. Однако имеются ссылки и на наличие отдельных очень грубых ошибок (ошибочные показания термометра) [25]. Это вызывается наличием утечек между термоэлектродами, толстым слоем густого шлака, налипшего на защитный колпачок и резко повысившего тепловую инерцию прибора, и другими причинами. Поэтому, наряду с измерением температуры металла термометрами, всегда практикуется глазомерная оценка нагрева, позволяющая предотвратить такие ошибки. На Кузнецком и Магнитогорском комбинатах, Днепростали и Азовстали глазомерные методы контроля сохраняются одновременно с измерениями термометрами, но параллельно с ними применяют и приближенные чисто качественные оценки:


а) по внешнему виду конца нешлакованного шомпола, извлеченного из металла после возможно более быстрого погружения;

б) по внешнему виду лепешки металла после слива его из пробной ложки на плиту из мягкого листового железа толщиной 15—20 мм с высоты около 150 мм. Плита должна быть наклонена под углом 10°. При обеих оценках устанавливают семибалльную шкалу, как показано в табл. 5, где дана оценка температуры металла при сливе пробы на плиту и при применении шомпола.

Исходя из общего описания, можно, как нам кажется, оценить для углеродистого металла каждый балл ступенями приблизительно по 20 — 25° С перегрева над точкой плавления.

На необходимость уверенно улаживать колебания температур металла в пределах $\pm 15^\circ$ С указывают также американские сталевары, причем они отмечают, что разность температур такого порядка может оказывать серьезное влияние на качество металла [27]. К этому же заключению приходят сотрудники Бюро стандартов США [29].

В табл. 5 книги В. Г. Грузина [11] собрано большое количество данных по температурным пределам разливки, рекомендуемым для фасонного литья. При этом установлено существование нижних пределов для величин перегрева металла над точкой плавления, обеспечивающих достаточную жидкотекучесть металла. Нижний предел повышается при увеличении содержания марганца, хрома, вольфрама, титана, алюминия и других металлов, ведущих к образованию плен на поверхности жидкого металла, а также при увеличении веса и поперечного сечения тела отливки. При заливке в кокили температура металла должна быть выше, чем при заливке в песок, так же как при заливке сырой формы температура металла должна быть выше, чем при заливке сухой формы. Разливка сифоном требует более высокой температуры, чем разливка сверху.

Вид конца шомпола (в разрезе) после определения температуры	Признаки, определяющие температуру металла при сливе пробы на пилу	Оценка температуры металла
	При сливе металла не растекается — «кашеобразный»; в ложке «козел»	Металл очень холодный, никаких присадок вводить нельзя
	Проба растекается плохо. В ложке небольшой «нозелок»	Металл холодный. Можно давать небольшими порциями руду
	Небольшое потемнение в местах падения струи при низком содержании углерода; «козелок» в ложке	Металл холодноват. Можно давать присадки руды и извести. Раскислить нельзя
	Ярко выраженное темное пятно	Температура, достаточная для раскисления кипящего металла и спокойного углеродистого, разливаемого сверху
	Ярко выраженное темное пятно и незначительная приварка лепешки	Температура, достаточная для раскисления мягкого спокойного металла, разливаемого сверху
	Ярко выраженное черное пятно; лепешка крепко приварена	Металл горячий, годен для раскисления спокойных углеродистых марок стали, разливаемых через промежуточные устройства
	Кроме черного пятна, в месте падения струи образуется небольшое сферическое углубление	Температура раскисления хромистых сталей, выпускаемых с большим количеством присадок

Верхний предел для температуры разливки в ряде случаев может быть значительно повышен [11], однако часто приходится сокращать интервал допустимых температур заливки. Это имеет место для отливок большого веса [13] и в ряде случаев для отливок из легированной стали (Г13Л, 18ХНВА и т. д.). При отливках из хромоникель-молибденовых сталей необходимо считаться с тем, что стали подвержены образованию интеркристаллических трещин, если температура заливки форм будет излишне высока. Кроме того, следует принимать во внимание рост пригара, особенно, если формовочные материалы недостаточно качественны. Следует принимать во внимание также возможный при излишне высокой температуре рост пористости металла [13]. Этот вывод подтверждается также экспериментальными данными автора. Поэтому утверждение Н. Н. Доброхотова о необходимости всемерно повышать температуру металла также при заливке фасонного литья [30] не следует считать применимым для всех случаев фасонного литья и при любых технических условиях. По данным В. Г. Грузина [11], допустимые пределы температур заливки фасонного литья значительно ниже, чем показано на рис. 1 и 3 (табл. 2, 3 и 4) для слитков. Интервалы допустимых температур, оцениваемые приборами, согласно приведенным данным составляют по крайней мере 30–40°.

Рекомендуемые температуры стали при заливке форм некоторых деталей машин по В. Г. Грузину даны в табл. 6.

Таблица 6

Детали	Вес и размеры	Марка стали	Пределы действительные, °С
Лопастни гидротурбин, плиты гладкие без ребер, суппорты, подушки	Черный вес более 5 т	Л135 Л125	1510÷1545 1520÷1555
Шкивы, маховики, зубчатые колеса	Диаметр более 1 м	25Х14Л	1535÷1560
Станины, траверсы, плиты с отверстиями и гнездами, стойки, барабаны, цилиндры, загрузочные воронки	Черный вес более 5 т	Л135 Л125	1520÷1545 1530÷1565
Статоры и роторы гидротурбин, корпуса, крышки и рамы редукторов, плиты и балки с ребрами и отверстиями, чаши шлаковые	То же	Л135 Л125	1520÷1555 1530÷1565
Маховики, зубчатые колеса и венцы, опорные кольца, ролики бегунов, ходовые колеса, звездочки	Диаметр менее 1 м	ХН	1520÷1550
Лопастни гидротурбин, барабаны, цилиндры, загрузочные воронки	Черный вес менее 5 т	ХН	1520÷1550
Рама экскаваторов, крановые и вагонные тележки и опоки	Все размеры	Л135	1535÷1555
Шкивы	Диаметр менее 1 м	Л125	1545÷1565
Маховики, шестерни, зубчатые колеса, ролики бегунов, ходовые колеса и звездочки	Диаметр менее 1 м	Л135	1535÷1570
Тонкостенные детали типа тел вращения (фланцы, кольца и др.)	Диаметр менее 300 мм	Л125	1545÷1580
Корпуса цилиндров паровых и газовых турбин	Преобладающая толщина стенки 30 ÷ 45 мм	Жаропрочная Л125	1540÷1560 1555÷1580
Детали корпуса цилиндров паровых турбин	Преобладающая толщина стенки 22 ÷ 30 мм	Л125	1565÷1590
Истирающиеся детали экскаваторов, бульдозеров и др. Броневые плиты, щеки мельниц и дробилок, кожухи и футеровки, бандажи, траки	Черный вес менее 500 кг	Г13Л	1405÷1435

При выплавке легированных сталей соблюдение оптимальных температур выпуска и разлива становится в ряде случаев весьма важным. Это имеет место, прежде всего, в тех случаях, когда по условиям производства нежелательна грубая столбчатая структура. Такой случай возможен не только при изготовлении фасонного литья, но и при выплавке слитков для проката или поковок. При этом могут оказываться относительно небольшие колебания температур. И. Я. Гранат и А. К. Жегалов [31] приводят случай уменьшения длины зоны транскристаллов с 30 мм до 0 при снижении температуры разлива хромоникель-вольфрамовой стали с 1465 до 1430° С. Один из авторов [32] указывает на возможность устранения столбчатой кристаллизации стали с содержанием 0,8% углерода при снижении температуры перегрева над точкой плавления на 40° С. Аналогичные

результаты получены другими исследователями [33]. Недавно автором совместно с Л. Я. Глускиным [14] были подведены итоги многолетней работы по созданию технологии производства стали марки 12Х2Н3МА, разливаемой в листовые и кузнечные слитки весом от 4 до 22 т. Основным условием устранения трещин при прокатке и ковке этой стали является температура металла в ковше перед началом разливки, лежащая в узких пределах 1590 ÷ 1620° С. При наличии в мартеновских печах динасовых сводов такой режим осуществлялся относительно легко, а с переходом на высокоогнеупорные основные своды завод был вынужден широко внедрить измерение температур металла термомпарами по ходу плавки.

На плавках стали марки ШХ15 температура перед выпуском из электропечи емкостью 10 т регламентируется обычно пределами 1540 ÷ 1570° С.

Таблица 7

Показатель	Температура разливки, ° С			
	ниже 1500	1501 ÷ 1550	1551 ÷ 1600	1601 ÷ 1650
Процент образцов с баллом по загрязненности свыше 2,5	4,80	7,90	10,10	13,40
Средний балл загрязненности	1,81	1,88	1,93	1,98

В печи емкостью 30 т по другим данным [34] температура металла перед выпуском должна быть 1580 ÷ 1615° С, а в ковше, сразу после выпуска, 1550 ÷ 1580° С, причем выдержка металла в ковше должна быть 10 мин. Повышение температуры разливки по данным М. Винограда [20] ведет к повышению загрязненности металла, являющейся одним из главных пороков шарикоподшипниковой стали. В табл. 7

приведена зависимость от температуры разливки относительного количества образцов стали марок ШХ15 с баллом по неметаллическим включениям выше 2,5; ориентировочная температура плавления 1465° С.

Снижение температуры разливки для шарикоподшипниковой стали приводит к снижению качества поверхности, ухудшению качества излома и другим дефектам.

Сталь Х23Н18 имеет хорошо установленные пределы оптимальных температур в ковше 1520 ÷ 1550° С (перед выпуском 1545 ÷ 1575° С). Перегрев этого металла ведет к утолщению дендритов, что влечет за собой ухудшение ковкости [12].

Металл, высоколегированный никелем (инвар, платинит), а также хромель и быстрорежущая сталь разливаются при пониженных температурах, приближающихся к температурам плавления. По старым данным яркостная температура разливки этих сталей 1405 ÷ 1415° С [35]. Ковкий никель при раскислении марганцем (2%) и магнием (0,005%) по опытам автора должен выпускаться в ковш при температурах, не превышающих 1560 ÷ 1580° С для индукционной печи емкостью 100 ÷ 200 кг и разливаться при температурах, по возможности, не выше 1480 ÷ 1500° С. Измерение температур в этом случае, естественно, должно обеспечить возможность уверенно оценивать разницу в 30°, так как температура плавления никеля около 1450° С.

Сталь Гадфильда, выплавленная в основных мартеновских печах (переплав отходов стали Гадфильда с применением диффузионного раскисления), при 1410 ÷ 1430° С яркостной температуры давала много трещин на литье.

Оптимальными пределами яркостных температур оказались 1360 ÷ 1380° С [36] (согласно табл. 6 для стали Г13Л 1405 ÷ 1435° С истинной температуры).

Применение кислорода в сталеплавильном производстве, приводящее к значительным перегревам металла, потребует и большей тщательности замера температур в тех случаях, когда этот перегрев нежелателен.

Интересно применение кислорода при дефосфорации керченских чугунов в качающихся печах Азовстали. При исследовании скорости ошлакования фосфора выяснилось, что эта реакция, осуществляемая во время процесса плавления, ускоряется при подъеме температур от 1300 до 1500° С [34]. При более высоком нагреве дефосфорация замедляется. Наиболее интенсивно процесс идет при температурах 1480 + 1500° С, так как при этих температурах высокое содержание углерода меньше всего мешает ходу реакции. Такой режим соответствует достаточно высокой скорости образования железисто-известковых шлаков за этот промежуток времени (скорость нагрева ванны 130 град/час, подача кислорода 1200 + 1300 м³/час для печи 350 т). Существенно, что и в этом случае наблюдается достаточно узкий интервал температур, подлежащих регламентации*. Применение кислорода может резко интенсифицировать скорость нагрева металла.

Немецкие печи на 30 + 60 т еще 20 + 30 лет назад имели скорость нагрева 50 + 70 град/час. Такую же скорость нагрева имела шведская кислая печь емкостью 20 т, описанная Каллингом [38]. Скорость нагрева современных немецких печей по последним данным составляет 85 + 90 град/час [39]. Советские печи обеспечивают без добавки кислорода нагрев 110 + 160 град/час [40]. При продувке кислородом нагрев может доходить до 350 + 400 град/час [37]. При регламентированном нагреве точность измерения температуры должна соответственно возрастать. Действительно, при скорости нагрева примерно 6 + 7 град/мин изменение температуры ванны в течение 3 мин будет находиться в пределах точности прибора ($\pm 20^\circ$ С) и перегрев ванны в этом случае устранить будет трудно.

Необходимо учесть также ряд других задач, которые могут возникнуть перед пирометрией. Например метод оценки цвета жидкого металла (имеющей технологическое значение), которая производилась ранее на глаз, в настоящее время может быть сведен к оценке разности между его истинной и яркостной температурами. В Германии, в связи со значительным распространением в промышленности прибора Биоптикс, давно начали накапливать опыт по таким определениям [2, 41], несмотря на то, что при оценке качества стали таким методом нет еще надежных результатов.

Требуемая точность оценки такой разности температур, как характеристики качества металла, еще не может быть сформулирована, хотя вполне вероятно, что она может быть определена несколько грубее, чем измерение температуры металла, так как колебания разности могут быть большими (90 + 180° С).

В некоторых случаях необходимо, чтобы сталь получилась с очень устойчивой и равномерной величиной зерна, с малым ростом зерна при термообработке, малой прокаливаемостью и т. п. Одним из способов получения канатной стали с определенными характеристиками (по немецким данным) является проведение быстрого режима кипения, но с минимальными перегревами и разогревом металла до температуры разлива перед самым выпуском (сталь должна иметь минимальную выдержку при высоких температурах). Судя по этим данным, точность соблюдения температурного режима (измерения по Биоптиксу) составляет примерно 20° С при большом постоянстве режима окисления [41].

* Сталь этого же завода для получения наилучших результатов должна иметь температуру металла перед раскислением 1600 + 1620° С для Ст. 3 и 1590 + 1610° для Ст. 5 [37].

Из изложенного можно заключить, что современная пирометрия должна обладать приборами, которые могут обеспечить надежное измерение температур в узком диапазоне $20 \div 30^\circ \text{C}$ (иногда 40°C).

О глазомерном контроле

Как уже упоминалось, глазомерный контроль до сих пор в очень многих случаях является основным видом контроля в сталеплавильных цехах. Оценка достижимой точности глазомерного контроля представляет поэтому безусловный интерес, особенно, принимая во внимание те высокие требования к температурным измерениям, которые предъявляет современное производство стали.

Зрительные впечатления в этом случае слагаются из следующих звеньев:

1) особенностей излучения жидкого металла и шлака или раскаленной кладки рабочего пространства;

2) особенностей человеческого глаза;

3) особенностей стекла, защищающего глаза от яркого излучения.

Стекло, сквозь которое смотрит сталеплавильщик, очевидно, в весьма значительной степени определяет характер зрительного впечатления и является основным прибором при глазомерных оценках. Так как глазомерному контролю температуры в мартеновском цехе и используемому в нем специальному стеклу (светофильтру) до сих пор уделяли незаслуженно мало внимания, мы позволим себе остановиться на этих вопросах несколько подробнее.

Основное назначение такого светофильтра заключается в ослаблении яркости излучения кладки печи или металла до такого уровня, чтобы человеческий глаз мог без особого напряжения и без последующего раздражения различить все детали на поверхности металла или в печи. Для этого необходимо, чтобы общий коэффициент пропускания стекла в видимом свете не превосходил примерно $0,5 \div 1\%$.

Глазомерная оценка температуры основана на том, что глаз сталевара оценивает цветовую температуру металла или кладки, используя для этой цели свою зрительную память. Особенностью светофильтра, применяющегося для глазомерной оценки температуры, является наличие двух областей пропускания, в данном случае в синем и красном участках спектра: повышение температуры приведет к усилению голубой окраски, а снижение — вызовет усиление красной окраски.

Преимущество сине-красного стекла заключается в том, что его области пропускания находятся по краям видимой области спектра, т. е. с наибольшим различием в длинах волн. Поэтому нормальный глаз, вооруженный таким стеклом, будет наиболее чувствительным к изменению спектрального состава излучения нагретого тела.

Хотя от сорта и качества такого стекла не может не зависеть точность глазомерных оценок температуры в мартеновских печах, однако до сих пор не существует никаких технических условий на него. Обычно пользуются стеклами с произвольным изменением коэффициента пропусканий по длинам волн. На этих стеклах часто имеются разнообразные оптические дефекты, затрудняющие визирование. Кроме того, заменить разбитое стекло тождественным становится трудным.

Была произведена попытка подобрать наилучшее стекло из выпускаемых отечественной промышленностью фиолетовых и синих светофильтров с установленными оптическими характеристиками. Поставленному выше условию по суммарному пропусканию при толщине 2—3 мм удовлетворяют светофильтры марок ФС1, ФС6, ФС7, СС4, СС5, СС14 и СС8 (по каталогу цветных стекол). Все они различаются соотношением пропускания в красном и синем участках спектра.

Раскаленный огнеупорный кирпич (излучение, близкое к «серому») при рассматривании его через эти стекла выглядит в большей или меньшей степени окрашенным. При низкой температуре объекта, стекла СС4, ФС6 и ФС7 дают интенсивно красное окрашивание, стекло СС14 дает окрашивание, приближающееся к пурпурному. Стекла СС5, СС8 и ФС1 плохо пропускают красный цвет. Холодная кладка в эти стекла выглядит серой, и различие температур ее устанавливается только по яркости. При повышении температуры интенсивность красного цвета уменьшается, и начинает преобладать синий цвет с различной степенью насыщенности*.

Для температуры кладки мартеновской печи порядка $1680 + 1700^{\circ}\text{C}$ наиболее насыщенный голубой цвет получается при наблюдении через стекла СС5, СС8 и ФС1, менее насыщенный — через стекло марки СС14 и почти белый или желтовато-белый — через стекла марок СС4 и ФС6, красный — через стекло марки ФС7. Чем толще стекла СС4, ФС6, ФС7 и СС14, тем краснее наблюдаемое излучение.

Выбор стекла той или иной марки может определяться особенностями цветового зрения и, прежде всего, чувствительностью данного глаза к красному цвету. Однако у различных людей возможна и крайняя слабость цветового зрения (вплоть до дальтонизма — цветовой слепоты) и очень высокая чувствительность его, при которой кривая видности распространяется сравнительно далеко в инфракрасную область, и способность различать самые тонкие оттенки красного цвета [42, 43]. С другой стороны, выбор стекла должен определяться также особенностями того излучения (кладка, металл), которое подлежит оценке. Насколько важно последнее обстоятельство видно из того, что, как известно на практике, определить пригодность стекла или произвести сравнение двух стекол можно только при непосредственном визуировании сталеплавильной печи.

Мы начали с того, что сопоставили светофильтры вышеуказанных марок со стеклами опытных мастеров и сталеваров или просили их выбрать наилучшие. Все сопоставления делались непосредственно у печей. При этом нужно было учитывать, что в отдельных случаях выбор соответствовал не оптимальному варианту, а мог определяться случайными причинами. Выяснилось, что к наиболее часто используемым на практике стеклам ближе всего подходят светофильтры толщиной $2,5 + 3,0$ мм марок СС4 и ФС6 и значительно реже — марок СС14 толщиной 3 мм. При этом можно было заметить, что для высокотемпературных печей с хорошей тягой у сталеваров заметна тенденция выбирать более темные и более красные стекла. Например, на заводе «Серп и Молот» и ряде других заводов с хорошими печами наилучшим стеклом было признано стекло СС4 толщиной 3 мм.

На кислой печи другого завода большинство сталеваров предпочли тоже темное, но с несколько меньшей краснотой стекло марки ФС6 толщиной 3 мм. В нашем распоряжении сохранились осколки стекол, применявшихся на заводе «Коминтерн», на котором имелись высокотемпературные печи с хорошей тягой. Они соответствовали стеклу марки СС4 и ФС6 толщиной 3 мм. Многие сталевары мартеновского цеха № 1 завода им. Дзержинского работали со значительно более светлыми стеклами (ФС6 толщиной $2 + 2,5$ мм). Печи этого цеха отличались холодным ходом и низкой тягой, благодаря чему атмосфера в печи часто была мало прозрачной. Стекла ФС7 толщиной 3 мм были многими забракованы как слишком красные, однако можно видеть такие стекла на электропечах и у отдельных сталеваров мартеновских печей.

* При изменении толщины стекла также происходит некоторое изменение цветового тона.

Мастера часто работают с более светлыми стеклами, чем сталевары (те же марки стекла, но на $0,5 \pm 1$ мм тоньше). Только один мастер предпочел стекла СС5 ($3 \div 4$ мм), ФС1 (3 мм) или СС8 ($3 \div 4$ мм), не пропускающие красного цвета. В одном случае использовалось стекло СС14 толщиной 2 мм. Интересно отметить, что стекло СС14 очень часто считается наилучшим для пламенных печей, но таким стеклом пользуются значительно реже, чем стеклами других марок.

Некоторое различие в стеклах, применяемых мастерами и сталеварами, может быть объяснено тем обстоятельством, что мастерам приходится наиболее тонко оценивать цвета селективно излучающего металла; его излучение в синей области больше приближается к черному излучению, чем в красной. Поэтому при глазомерных определениях температуры металла более синее стекло может иметь некоторое преимущество. Однако нельзя не отметить, что при наблюдении через стекло СС4 разница в цвете металла и пленок на нем получается значительно большей, т. е. это стекло может быть весьма контрастным.

Выбор общего коэффициента пропускания разной величины связан также с различной способностью наблюдателей к адаптации. С этой точки зрения, чем выше температура печи, тем плотнее должно быть выбрано цветное стекло. Однако в каждом данном случае стремятся иметь возможно более высокий коэффициент пропускания стекла.

Решение вопроса о том, какое из стекол — СС4 или ФС6 — более приемлемо, зависит от особенностей цветового зрения. У этих стекол области пропускания сдвинуты к краям видимого спектра в большей степени, чем у стекла марки СС14. Это видно из рис. 2.

Хотя собранные данные не могут считаться исчерпывающими, на их основании можно заключить, что в мартеновском цехе нужно иметь набор стекол различных толщин и марок.

Можно рекомендовать следующий набор:

Стекло ФС6 толщиной	2,5; 3,0 мм
• СС4 •	2,5; 3,0 мм
• СС14 •	3,0 мм

Стекла ФС6 и СС4 толщиной 2 мм применяются редко. Этот набор по маркам стекол может считаться в первом приближении достаточным и окончательно может уточняться в каждом отдельном случае только толщина стекла.

Каждый сталеплавильщик имеет стекло, к которому он привык. При хорошем зрении и сильно натренированной зрительной памяти у него сохраняется ряд зрительных впечатлений, причем у работника высокой квалификации с хорошим зрением и памятью этих впечатлений много и они тоньше и многограннее, чем у работников среднего уровня. В результате часто получаются достаточно надежные оценки температуры печи.

Наиболее точные оценки производились по температуре динасового свода. При наибольшей температуре свода возникает наиболее быстрый нагрев металлической ванны, поэтому, чем опытнее был сталевар и чем смелее он работал, тем ближе к температуре плавления свода поддерживалась температура последнего. О том, с какой поразительной точностью соблюдался в отдельных случаях такой режим, говорят наблюдения, сделанные в свое время на заводе им. Дзержинского над работой лучших сталеваров. Никакой автоматизации процесса нагрева не было, и печь регулировалась на глаз. Наблюдения повторялись неоднократно, причем было отмечено, что во второй половине периода кипения стали перекидка аппаратов производилась точно при температуре наиболее горячей части свода $1670 \div 1680^\circ \text{C}$. Между тем, оплавление свода получалось во всех случаях, когда это удавалось фиксировать, при одной и той же температуре 1690°C .

По этим цифрам можно оценить точность глазомерного контроля не ниже 15° . Такая точность наблюдалась при тщательном подборе стекла у очень опытных сталеваров с большим стажем и глубоким знанием печи. Некоторые сталевары иногда помогали себе наблюдением за скоростью вытапливания шлака из кирпича арки газового окна, которое тогда еще не начи-

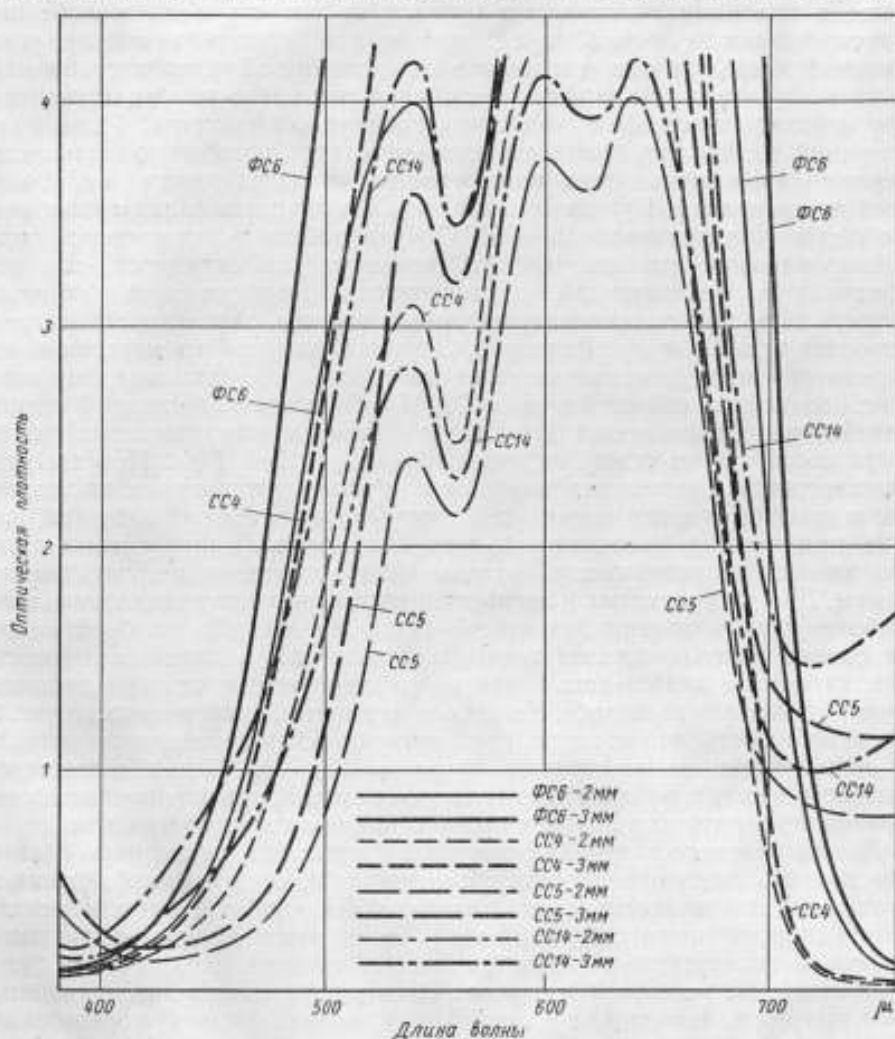


Рис. 2. Оптические плотности светофильтров различных марок.

нали охлаждать. Перекидка аппаратов во второй половине периода кипения производилась, когда капли шлака из арки начинали падать очень часто. В других случаях основным критерием для сталевара были его зрительные впечатления.

Отмечаем еще раз, что такая тонкость зрительных оценок была возможна только при наличии в защитных очках хорошо подобранного синего стекла и при очень большом опыте и хорошем зрении сталевара. Неконтрастное и мутное стекло не позволит делать тонких оценок. Естественно, что на основании приведенного наблюдения нельзя сделать вывод об отказе от применения хороших приборов, измеряющих температуру свода, так

как глаз сталевара может устать. Кроме того, на качество оценки может повлиять изменение общего самочувствия наблюдателя и очень трудно, конечно, на всех рабочих местах иметь людей с исключительным зрением и зрительной памятью.

Не менее интересные наблюдения делались в то же время над глазомерными оценками температуры металла по его струе на желобе при выпуске плавки из печи. Как указывалось, при нормальном составе углеродистого металла в одном и том же цехе при чистой углеродистой шихте опытные пиromетристы во всех трех сменах тщательно измеряли температуру металла на желобе с помощью оптического пиromетра. Результаты измерений сообщались мастерам, которые начали постепенно привыкать оценивать свои впечатления количественно, сверяясь каждый раз с данными пиromетриста. При этом оказалось, что точность глазомерных оценок составляла примерно $15 \pm 20^\circ \text{C}$. При работе в мартеновском цехе с легированными сталями точность таких оценок снижается, так как окраска металла и пленок на нем становится менее постоянной и начинает зависеть не только от температуры, но и от состава, окисленности (загрязненности) металла и др. факторов. Зависимость окраски металла и его температуры от технологии давно привлекала к себе внимание, как один из методов оценки качества металла [2, 41]. Точность глазомерной оценки температуры при работе на близких по составу конструкционных сталях может достигать по опыту последнего времени $25 \pm 30^\circ$. При выпуске в электропечах высоколегированной стали типа пержавеющих, жаропрочных и др. глазомерная оценка температур становится очень грубой или даже практически невозможной, так как эти стали имеют очень плотные пленки на поверхности, чрезвычайно затрудняющие глазомерные оценки. Для углеродистых и легированных сталей конструкционного типа наиболее точные оценки можно делать на желобе. По пробной ложке эти оценки несколько менее точны, возможно, из-за малой поверхности металла и менее длительного зрительного впечатления, чем при наблюдении струи металла на желобе. Но, исходя из данных, приведенных на рис. 2, можно заключить, что точность глазомерной оценки температуры металла по ложке будет соответствовать примерно $25 \pm 30^\circ \text{C}$ при достаточной опытности мастера, наблюдавшего за видом металла, при одновременном измерении температуры в ложке с помощью измерительного прибора.

Для зрительного контроля температуры металла характерно то обстоятельство, что наложение многих объективных и, особенно, субъективных факторов может привести к отдельным грубым ошибкам, которые исключаются применением прибора. Поэтому одновременное применение измерительной аппаратуры и глазомера весьма существенно, так как будет происходить их взаимный контроль. На наших больших заводах применяют критерии, показанные в табл. 5. К этим критериям нужно добавить обычные глазомерные оценки по цвету и яркости металла, при условии обеспечения цеховых работников стеклами надлежащего качества.

Заключение

Из изложенного можно видеть, что те различия по температуре, которые нужно улавливать, чтобы обеспечить хорошую работу на производстве, во всех случаях составляют $20 \pm 40^\circ \text{C}$. Между тем возможная погрешность измерения температуры 1600°C с помощью термоэлектрического комплекта при погрешности термодпары $\pm 1\%$ и потенциометра $\pm 0,5\%$ [44] составляет

$$\pm \sqrt{16^2 + 8^2} = \pm 18^\circ.$$

Таким образом, величина тех разностей температур, которые прихо-

дится оценивать, в этом случае оказывается одного порядка с величиной возможной ошибки измерительного прибора и очень немного отличается от возможной ошибки глазомерных определений.

Увеличивая число измерений, можно, разумеется, повысить их точность. Однако необходимо учитывать, что далеко не всегда на производстве хватает времени на дополнительное измерение и что грубые ошибки при отдельных измерениях дезориентируют цеховой персонал и лишают его необходимой уверенности в работе, т. е. устраняют главное преимущество объективного метода контроля.

Чем больше величина возможной ошибки, тем меньше будут допустимые разбеги температур. Например, при точности измерения $\pm 5^\circ \text{C}$ можно обеспечить установленный по технологическим требованиям интервал температур, например $1600 \div 1620^\circ \text{C}$, если колебания в отсчетах в $1605 \div 1615^\circ \text{C}$ считать допустимыми. При точности измерения $\pm 8^\circ$ допустимый интервал сократится до $1608 \div 1612^\circ \text{C}$, а при точности замера $\pm 10^\circ$ сталевар должен выдерживать температуру металла точно 1600°C . При еще меньшей точности замера заданные интервалы температур $1600 \div 1620^\circ \text{C}$ оказываются нереальными. Из этих соображений ясно, что приведенные нормы для колебания температуры металла в $20 \div 30^\circ \text{C}$ могут с трудом обеспечиваться для всех замеров при возможной ошибке прибора не более $0,5\%$ ($\pm 8^\circ$). Так что перед приборостроителями необходимо уже ставить задачи о снижении ошибок до $\pm 5^\circ$, т. е. до $\pm 0,3\%$.

Нет никакого сомнения в том, что главные затруднения, возникающие при внедрении приборов для измерения температуры в условиях цеха, заключаются в том, что они имеют точность, недостаточно превышающую во всех случаях точность глазомерного контроля, и что возможны отдельные, весьма грубые случайные ошибки.

Среди мероприятий по повышению точности измерений температур с помощью термомпар, список которых могут составить специалисты, хотелось бы остановиться на следующих.

1. Решительно отказаться от применения на заводах платино-платинородиевых термомпар и перейти на работу с термомпарами, состоящими только из сплавов платины и родия различных концентраций [45]. При применении термомпар из других металлов нужно иметь на заводах платинородиевые контрольные термомпары.

2. При применении вольфрам-молибденовых термомпар необходимо принять срочные меры для повышения однородности вольфрамовых и молибденовых проволок и добиться предельно возможного ужесточения допустимых погрешностей для термомпар из них.

3. Разработать жесткую систему контроля за качеством термоэлектродной проволоки и электроизмерительных приборов с тем, чтобы погрешность измерения термоэлектрического комплекта не превышала $\pm 5^\circ \text{C}$.

4. Заменить применяемые иногда в сталеплавильных цехах милливольтметры — потенциометрами, повысив их быстродействие, чтобы сократить продолжительность пребывания термомпары в металле.

5. Повсеместно заменить кварцевые наконечники металло-керамическими и термостойкими корундовыми, для чего организовать массовое изготовление последних.

6. Продолжать работы по усовершенствованию конструкции термомпар ЦНИИТМАШ.

7. Всесторонне обсудить вопрос об упорядочении измерений температуры металла под густыми шлаками и в ковше, когда наконечник термомпары ошлаковывается и инерция прибора резко возрастает.

8. Издать массовым тиражом подробные директивные указания по эксплуатации приборов для измерения температуры жидкого металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доброхотов Н. Н., Современная технология выплавки стали в мартеновских печах, Изд. АН УССР, Киев, 1951.
2. Naeser G., Engels G., St. Eis., № 15, 1949.
3. Naeser G., Mitt. K. W. Inst., L. 2, 1936.
- 3а. Андреев И. А. и Розенберг М. З., Экспериментальная техника и методы исследований при высоких температурах. Изд. АН СССР, 1959, стр. 655.
4. Шенк Т., Физическая химия металлургических процессов, часть II, ДНТВУ, 1936.
5. Гордов А. Н., Эргардт Н. Н., «Заводская лаборатория», № 6, 1957, стр. 727.
6. Mauger u. Bischof, Arch. Eisenh., 1931—1932, S. 549.
7. Андреев И. А., «Сталь», № 2—3, 1934, стр. 17—27.
8. Андреев И. А., Кузнецов М. П., Домез, М., № 4, 1936.
9. Андреев И. А., Бархатов А., «Сталь», № 9—10, 1943, стр. 14—19.
10. Koenig H., St. Eis., № 24, 1953, S. 1603—1609.
11. Грузин В. Г., Контроль температуры жидких железных сплавов, Металлургияиздат, М., 1955.
12. Хан Б. Х., Вопросы производства стали, Изд. АН УССР, Киев, вып. 3, 1956.
13. Нехендзи Ю. А., Стальное литье, Metallurgizdat, М., 1948.
14. Андреев И. А., Гаускин Л. Я., Сборник «Металлургия», Судпромгиз, 1958, стр. 35—37.
15. Отливанов С. Т., Соколов И. А., «Сталь», № 5, 1956, стр. 409—414.
16. Пугачев Д. К., «Сталь», № 1, 1957, стр. 369—370.
17. Guthmann K., St. Eis., № 14, 1951, S. 728—731.
18. Iron u. Steel. Inst., № 165, 1950, S. 41—66.
19. Werthebach P., St. Eis., № 4, 1952, S. 195—197.
20. Виноград М., Неметаллические включения в шарикоподшипниковой стали, Metallurgizdat, М., 1954.
21. Кузнецов М. П., Андреев И. А., Бюллетень научно-исследовательских работ завода им. Дзержинского, № 3—4, 1935, стр. 63—79.
22. Boos G., Willemis J. W., St. Eis., № 4, 1955.
23. Guthmann K., St. Eis., № 8, 1951, S. 399.
24. Wartenberg P., Mackenzie M. a. Donald A. J., St. Eis., № 4, 1952, S. 195.
25. Васильев А. Н., Подыноги И. Е., Никитин П. Д., Опыт работы передовых мастеров-сталеплавильщиков Кузнецкого металлургического комбината, Metallurgizdat, М., 1956.
26. Васильев А. Н., Труды научно-технического общества черной металлургии, том XVIII, 1957, стр. 396—397.
27. Колосов М. И. и Кульбицкий А. П., Разливка стали, М., 1957.
28. Мартеновское производство стали (основной процесс). Комитет физ. химич. стале-плавления. Американ. общ. горных инженеров и металлургов, Metallurgizdat, М., 1947, стр. 240.
29. Roeser W. a. Wensel H. T., J. Res. nat. Bur. Stand., № 26, 1941, S. 273—287; St. Eis., 1951, S. 399—402.
30. Доброхотов Н. Н., Литейное производство, № 7, 1952, стр. 2—6.
31. Грязев И. Я., Жегалов А. К., Кристаллизация и структура стального слитка, ОГИЗ, 1928.
32. Matuschka, Arch. Eisenh., № 4, 1931.
33. Трубин К. Н., Ойкс Г. Н., Металлургия стали, Metallurgizdat, 1957.
34. Зайцев И., «Сталь», № 9, 1957, стр. 788—792.
35. Лейкин В. Е., Плавка стали в электропечах, Metallurgizdat, М., 1946.
36. Хохлов П. Т., «Сталь», № 2, 1957, стр. 180.
37. Харитонов А. С., Булькин М. Т., Акимов А. Г., Гланков Г. М., Белоголовский М. Ш., «Сталь», № 8, 1958, стр. 706—709.
38. Андреев И. А., «Сталь», № 9—10, 1942.
39. Schmitt W., St. Eis., 1955, S. 1638.
40. Меджибожский М. Я., Соколов И. А., «Сталь», № 3, 1957, стр. 220—227.
41. Hauck M., Ellender N., St. Eis., № 16, 1950, S. 689—698.
42. Вавилов С. И., Глаз и Солнце, АН СССР, 1950.
43. Крачков С. В., Глаз и его работа, АН СССР, 1950.
44. Метод измерения температур в промышленности, Коллектив авторов под редакцией А. Н. Гордова, Metallurgizdat, М., 1952.
45. Эргардт Н. Н., Канд. диссертация, ВНИИМ, 1957.

А. П. АДАХОВСКИЙ, А. Н. ГОРДОВ, Г. Б. ЛАПП,
З. С. ЛЕБЕДЕВА, В. Л. МАКСИМОВА, Г. Ф. ОМЕЛЬ-
ЧЕНКО, П. И. ПРОКОПЬЕВ, Н. Н. ЭРГАРТ

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ТИПОВ ТЕРМОПАР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ДО 1800° С

В последние годы сильно возросли требования к точности измерений высоких температур контактными методами. Так, в современной металлургии, широко использующей в промышленной практике температурные измерения, требуется измерение температур отдельных марок стали в процессе их варки и разливки с погрешностью, не превышающей $\pm 10^\circ \text{C}$. Если учесть, что половина этой величины обуславливается погрешностями используемого электронизмерительного прибора, то можно прийти к заключению, что суммарная погрешность термопары, вызванная ее нестабильностью, термоэлектрической неоднородностью и погрешностью градуировки, не должна превышать $\pm 5^\circ \text{C}$ при температурах $1500 \div 1700^\circ \text{C}$.

Применение в последние годы вольфрам-молибденовых термопар и аналогичных термопар с присадкой алюминия в молибденовом термоэлектроде не решает задачи из-за недостаточной их стабильности. По той же причине оказываются мало пригодными обычные платинородий-платиновые термопары [1].

Вследствие большой химической активности при высоких температурах платиновый термоэлектрод быстро загрязняется от находящейся с ним в контакте армирующей керамики, и термопара быстро снижает свою т. э. д. с. Поэтому перед приборостроителями поставлена задача разработать, исследовать и внедрить в промышленную практику новые типы высокостабильных термопар для длительного измерения температур до $1700 \div 1800^\circ \text{C}$.

Известно, что платинородиевый электрод в платинородий-платиновой термопаре оказывается значительно более устойчивым против загрязнений, чем платиновый, и его термоэлектрические характеристики мало изменяются в процессе эксплуатации термопары. Поэтому авторы работы исследовали термопары, оба электрода которых изготовлены из сплавов платины и родия с различными процентными соотношениями. Аналогичный путь был выбран и зарубежными исследователями.

Работы по согласованному плану проводили четыре организации:

1. Свердловский совнархоз изготовлял платинородиевые проволоки с различным содержанием родия диаметром 0,3; 0,5; 0,8; 1,0 мм и исследовал их термоэлектрическую однородность.

2. Свердловский филиал ВНИИМ накапливал и анализировал данные для установления допустимых отклонений т. э. д. с. термопар от средней градуировки.

3. ВНИИМ разрабатывал метод градуировки термопар и изучал их градуировочные характеристики с анализом различия характеристик термопар из разных плавов.

4. ВНИИМ изучал влияние контакта при высоких температурах термоэлектродов и армирующей керамики различного состава и исследовал стабильность термопар в разнообразных условиях эксплуатации.

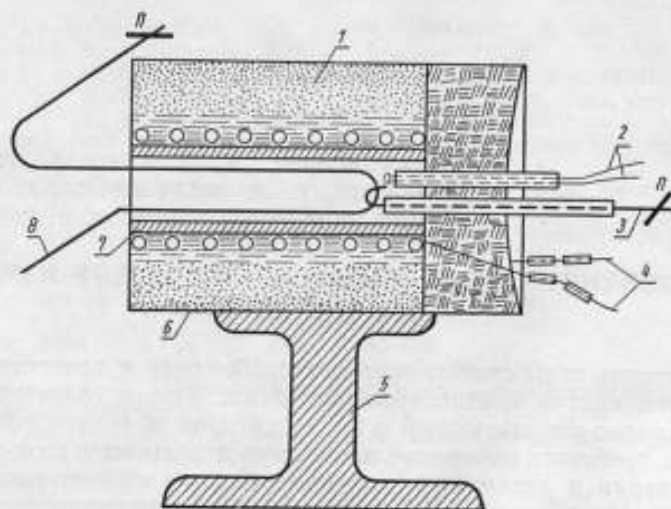


Рис. 1. Схема печи для определения т. э. д. с. неоднородности электродного материала.

Общее метрологическое руководство работами взял на себя ВНИИМ. Инициатором данной работы был инженер Д. Л. Оршанский, который принял в ней участие.

В Свердловском совнархозе налажено серийное производство проволок из сплавов ПР-1, ПР-6, ПР-10, ПР-13, ПР-20, ПР-30, ПР-40 — платинородиевых сплавов, содержащих соответственно 1, 6, 10, 13, 20, 30 и 40% родия. Основой этих сплавов служила платина марки «Экстра» с температурным коэффициентом сопротивления $\alpha \approx 0,00390 \text{ град}^{-1}$.

Термоэлектрическая однородность на заводе определялась на полуавтоматической установке, состоящей из печи для нагрева места контакта испытуемой проволоки с электродом сравнения, перематывающего устройства и лабораторного потенциометра.

Степень однородности термоэлектродного материала определялась по величине т. э. д. с., возникающей в месте контакта испытуемой проволоки и электрода сравнения. В качестве электрода сравнения применялся отрезок проволоки от одного из концов испытуемой бухты.

Печь установки (рис. 1) состояла из фарфоровой трубки 7 диаметром ~15 мм и длиной 90 мм, платинового нагревателя 4, теплоизоляции 1, кожуха 6 и подставки 5. Температура в полости печи определялась с помощью платинородий-платиновой термопары 2. Испытуемая проволока 8 при измерениях втягивалась с помощью электрода сравнения 3 (армированного фарфоровой соломкой) внутрь печи, образуя в ней петлю. После выдержки в течение 10—20 сек при температуре 1200° С измерялась



Рис. 2. Кривые т. э. д. с. неоднородности электродов ПР-30 и ПР-6.

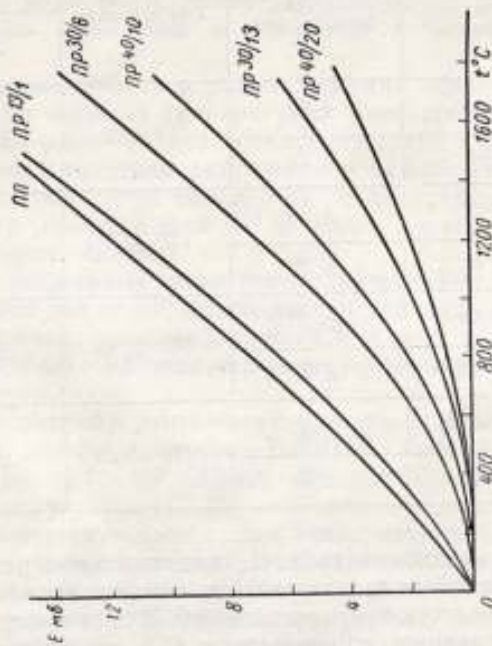


Рис. 3. Градуировочные кривые термопар типа ПР.

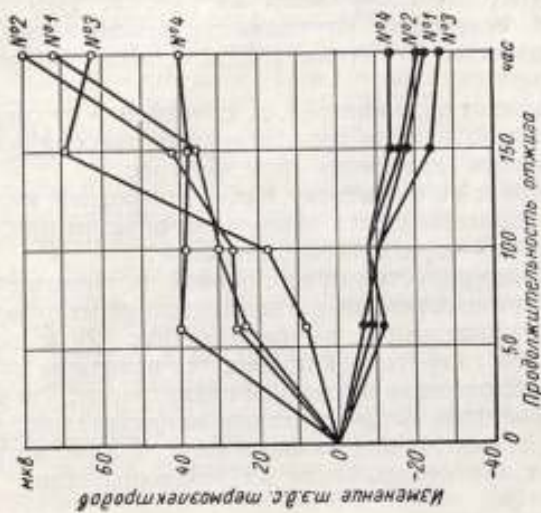


Рис. 4. Изменения показаний платинородий-платиновых термопар с термоэлектродами различных диаметров после отжига их при 1200° С в воздушной среде.

Термопары с диаметром электродов: № 1 — \varnothing 0,3 мм; № 2 — \varnothing 0,5 мм; № 3 — \varnothing 0,8 мм; № 4 — \varnothing 1,0 мм.

т. э. д. с. (в точках $P - P$). По окончании измерения проволока освобождалась, перематывалась на 1, 2 или 5 м, и операция возобновлялась.

Данные т. э. д. с. (ΔE мкв), полученные по материалам, изготовленным лабораторными плавками, для сплавов ПР-6 и ПР-30 в зависимости от их повторяемости (N , %) изображены на рис. 2. При производственных же плавках вследствие улучшения перемешивания металла при больших его количествах величины т. э. д. с. неоднородности проволок уменьшаются.

Определяя допустимые отклонения т. э. д. с. термопар от средней градуировки, приходится исходить из двух основных требований:

- 1) наибольшая точность измерения температуры;
- 2) минимальный возврат в переработку термоэлектродных материалов.

Первое требование удовлетворяется наилучшим образом при наиболее жестких допусках, второе — при наиболее широких.

Для получения величин допустимых отклонений на термоэлектродный материал и термопары при изготовлении и комплектации их заводом были использованы данные, приведенные на графике (рис. 2) и во второй графе табл. 1. В четвертой графе табл. 1 приводятся величины максимальных отклонений т. э. д. с. термопар от средней градуировки. Эти величины получены расчетом (как средние арифметические) из приведенных во второй графе экспериментальных данных для каждого электрода рассматриваемой термопары, полученных при исследовании их неоднородности.

Таблица 1

Тип электрода	Отклонения от значений образца, мкв	Тип термопар	Максимальные отклонения от значений образца		
			мкв	°С	$\frac{1}{t}$ от измеренной t
ПР-13	± 27	ПР 13/1	± 25	$\pm 2,0$	$\pm 0,2$
ПР-1	± 22				
ПР-30	± 20	ПР 30/6	± 24	$\pm 2,5$	$\pm 0,2_2$
ПР-6	± 28				
ПР-30	± 20	ПР 30/13	± 23	$\pm 4,0$	$\pm 0,3_6$
ПР-13	± 27				
ПР-40	± 18	ПР 40/20	± 20	$\pm 3,2$	$\pm 0,3$
ПР-20	± 22				

Как видно из табл. 1, максимальное различие т. э. д. с. термопар, изготовленных из материалов, которые испытаны на заводе на неоднородность, не должно превышать $\pm 0,35\%$ от измеряемой температуры. Исходя из этих данных, на различие т. э. д. с. термопар типа ПР, комплектуемых заводом, установлена допустимая величина, выраженная в градусах и равная $3 \cdot 10^{-3} t$.

Но, несмотря на полученные удовлетворительные результаты испытаний отдельных электродных проволок на однородность, рекомендовать такую или какую-либо другую аналогичную установку для массового

применения рискованно, так как она не характеризует величины паразитных т. э. д. с., образующихся при использовании испытанных термоэлектродов в эксплуатационной печи*.

С целью выбора наиболее приемлемого огнеупорного материала для армировки термоэлектродов и изоляции их друг от друга было проведено исследование влияния длительного контакта проволок из платинородиевых сплавов с порошками различных огнеупорных материалов. Исследовалось влияние на сплавы ПР-1, ПР-13 и ПР-30 огнеупорных окислов циркония, тория, бериллия и алюминия при 1500° С.

Методика исследования была аналогична применявшейся Шоссеном [2] и Эррингером [3]. Испытуемый образец проволоки предварительно сличался методом поэлектродного сличения [4] с образцом сравнения того же состава и определялась развиваемая между ними т. э. д. с. при 1000° С. Затем испытуемый образец помещался в колпачок из огнеупорного окисла и засыпался порошком окисла того же состава. Далее, колпачок с образцом погружался в печь с воздушной средой и отжигался при температуре 1500° С в течение нескольких часов. Затем колпачок охлаждался, из него извлекался образец и опять определялась т. э. д. с., развиваемая испытуемым образцом сравнения при 1000° С. Операция нагрева повторялась.

В результате исследований было установлено:

1. Материалами, вызывающими минимальные изменения термоэлектрических свойств платинородиевых сплавов, являются окись тория, окись бериллия и окись алюминия. Окись циркония оказывает очень сильное влияние на т. э. д. с. платинородиевых сплавов.

2. С увеличением диаметра термоэлектродов изменение их т. э. д. с., вызванное воздействием огнеупорных окислов, уменьшается. Это можно объяснить уменьшением (по мере роста диаметра) отношения площади поверхности соприкосновения проволоки с порошком к объему проволоки.

3. По мере роста содержания родия в сплаве влияние контакта его с огнеупорной керамикой при высоких температурах уменьшается.

Учитывая, что окись тория радиоактивна, а окись бериллия в порошке ядовита, в качестве материала для армировки термопар из платинородиевых сплавов для измерения температур свыше 1500° С следует рекомендовать окись алюминия. Для термопар типа ПР до 1300° С можно применять армировку из плавленного кварца.

При оценке пригодности выбранных типов термопар, наиболее существенными требованиями к ним являются: стабильность показаний, монотонность градуировочной кривой, большая величина т. э. д. с. и ее изменения с температурой (в мкВ/град) в рабочем интервале температур и, наконец, удобство в эксплуатации.

Исходя из указанных требований и учитывая результаты испытаний термоэлектродных материалов на стабильность, ВНИИМ провел градуировку термопар типов ПР 30/6, ПР 30/13, ПР 40/20, ПР 40/10 и ПР 13/1 методом малого погружения [4]. По этой методике для каждой термопары определялась величина т. э. д. с. при температурах затвердевания цинка, сурьмы, серебра, меди, никеля, палладия и платины. Так как применялись технически чистые металлы, то их температура определялась перед градуировкой термопар образцовыми приборами: для цинка, сурьмы, серебра и меди — образцовой платинородий-платиновой термопарой; для никеля, палладия и платины — образцовым оптическим

* Вопрос о выборе обоснованной и удобной методики исследования неоднородности термоэлектродного материала в настоящее время еще не решен и требует дополнительного изучения.

пирометром. Кроме того, была определена величина т. э. д. с. термопар при температурах 0 и 100° С.

Электроды термопар армировались на длине около 150 мм двухканальной соломкой, изготовленной из окиси алюминия с однопроцентной примесью окиси титана, которая прибавлялась к основной массе для повышения термостойкости изделий, и далее кварцевой одноканальной соломкой. При погружении термопар в металлы с температурой затвердевания свыше 1400° С использовались колпачки из окиси алюминия

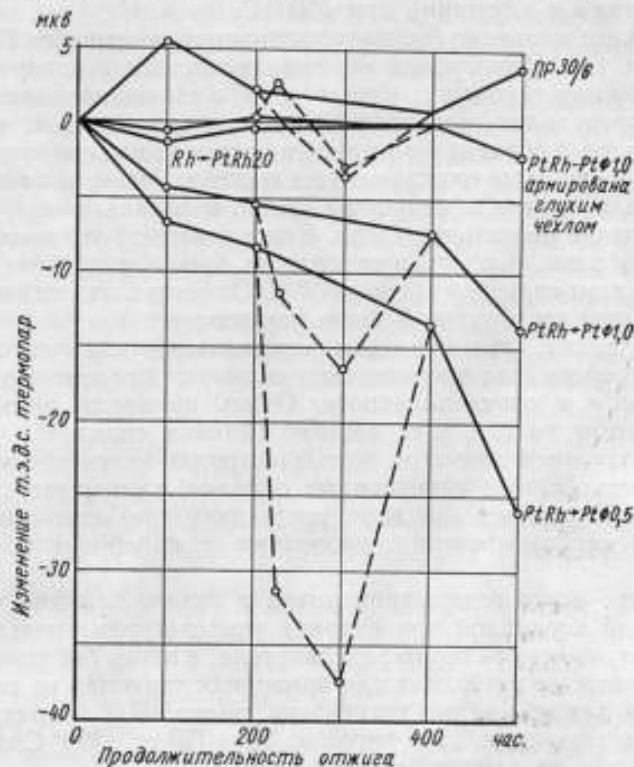


Рис. 5. Изменение показаний термопар различных типов и диаметров после отжига при 1400° С.

с окисью титана, а с температурой затвердевания ниже 1400° С — колпачки из прозрачного кварца.

Погрешность градуировки термопар не превышала $\pm 0,2\%$ от измеряемой температуры.

Для получения более точных градуировочных значений, а также для оценки воспроизводимости т. э. д. с. были проградуированы 19 термопар типа PR 30/6, изготовленные из материалов пяти различных плавок; 11 термопар типа PR 13/1 (изготовленные из материала трех плавок); 9 термопар типа PR 30/13 (изготовленные из материала трех плавок). Градуировочные данные термопар (средние взвешенные) PR 30/6, PR 13/1 и PR 30/13 (мв), изготовленных из материалов различных плавок, приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Термопары градуировались при температуре свободных концов 0° С. Однако следует отметить, что при работе в промышленных условиях с термопарами типов PR 30/6, PR 40/10, PR 30/13 и PR 40/20 специального термостатирования свободных концов (если их температура не превышает 100° С) не требуется.

Таблица 2

Количество исследованных		Температура, °С								
термопар	плавки	20	100	416,5	628,5	960,4	1082	1453	1552	1765
Термопара ПР 30/6										
31 $\bar{\delta}_{ПР}$	17 % t	0,001 ₀	0,036 ₂	0,89 ₀ ±0,7	2,02 ₀ ±0,4 ₂	4,58 ₀ ±0,2 ₂	5,73 ₀ ±0,2 ₀	9,62 ₁ ±0,3 ₁	10,78 ₂ ±0,8	13,48 ₀ ±0,2 ₂
Термопара ПР 13/1										
11 $\bar{\delta}_{ПР}$	3 % t	0,074	0,458	2,76 ₂ ±0,2 ₄	4,69 ₂ ±0,2	8,16 ₂ ±0,2 ₂	9,56 ₂ ±0,2 ₁	13,95 ₀ ±0,2 ₄	15,11 ₂ ±0,1 ₂	—
Термопара ПР 30/13										
9 $\bar{\delta}_{ПР}$	3 % t	0,075	0,026	0,17 ₀ ±1,4	0,60 ₀ ±1,3	1,73 ₀ ±0,8	2,28 ₀ ±0,7	4,19 ₀ ±1,0	4,79 ₂ ±0,9	6,22 ₂ ±1,3

Как видно из табл. 2, т. э. д. с. термопар типов ПР 30/6 и ПР 30/13, изготовленных из материалов различных плавки, отличаются друг от друга больше, чем допускается установленными отклонениями. Однако следует учитывать, что полученные величины расхождений т. э. д. с. термопар частично обусловлены не только различиями в партиях материала, но и погрешностью градуировки термопар ($\pm 0,2\%$ от температуры).

Как было сказано выше при описании работ Свердловского филиала ВНИИМ, для термопар ПР 30/6 эти погрешности могут быть существенно уменьшены при условии комплектации термопар заводом. Это подтверждается тем, что при комплектации ВНИИМ партии термопар, изготовленных из 12 различных плавки, расхождения между данными их градуировки не превышали $\pm 1,5^\circ\text{C}$ во всей области температур применения.

Отечественная промышленность освоила серийный выпуск термопар типа ПР 30/6 для внедрения на производственных предприятиях.

Из всех исследованных типов термопары типа ПР 13/1, изготовленные из материалов различных плавки, имеют наименьшие расхождения в т. э. д. с.

Расхождения данных градуировки термопар типа ПР 30/13, изготовленных из материалов различных плавки, достигают $\pm 1,4\%$ от измеряемой температуры. Трудность работы с этими термопарами увеличивается также в связи с тем, что у них мала величина $\frac{de}{dt}$. В табл. 3 приведены величины $\frac{de}{dt}$ (мкВ/°С) для различных типов термопар.

Исследования на стабильность т. э. д. с. при длительной эксплуатации были подвергнуты термопары:

- 1) платинородий-платиновые (ПР 10/0) при 1200°C в течение 200 ч и при 1400°C в течение 500 ч;
- 2) платинородий-платинородиевые (ПР 30/6) при 1400°C в течение 500 ч и при 1500°C в течение 200 ч;
- 3) родий-платинородиевые (ПР 100/20) при 1400°C в течение 200 ч.

Таблица 3

Тип термопар	Температура, °С						
	416,5	628,5	960,4	1082	1453	1552	1755
ПР 30/6	5	7	9	9	11	11	11
ПР 30/13	2	2	4	5	6	6	6
ПР 13/1	9	10	12	12	13	14	—
ПР 40/20	2	3	5	6	8	8	9
ПР 40/10	3	4,5	7	8	10	10	10

Для определения стабильности т. э. д. с. термопары устанавливались в трубчатую длинную печь таким образом, чтобы их рабочие спай находились в центре равномерного температурного поля печи. Длина участка термопары, находящегося в равномерном температурном поле, равнялась 100 мм. Термопары подвергались длительному отжигу циклически по 100 ч. До начала отжига и после каждого цикла производились контрольные измерения т. э. д. с. термопар по электродным методом [5] в печи с малым погружением при температуре 1000°С.

Нагрев при 1200, 1400 и 1500°С производился в воздушной атмосфере, причем при 1400°С существовал непосредственный контакт термопары с образцом из жаростойкого сплава. Термопары армировались трубками и бусами из окиси алюминия.

Для отжига термопар ПР 10/0 при 1200°С использовалась печь с нагревателем из сплава 1Х25Н5. Рабочее пространство печи ограничивалось трубой из пирометрического фарфора. В ходе исследований было установлено, что изменения т. э. д. с. термопар происходят в основном за счет изменения термоэлектрических характеристик платиновых электродов, что наглядно иллюстрируется рис. 4. Аналогичный результат был получен и другими исследователями [1, 2, 3].

Известно, что изменения физико-химических свойств термоэлектродов, определяющих их т. э. д. с., начинаются с поверхности, а затем распространяются в глубь и по длине. Была подвергнута исследованию стабильность показаний платинородий-платиновых термопар с термоэлектродами различных диаметров, а именно: 0,3; 0,5; 0,8; 1,0 мм. При этом было обнаружено (так же как и в опыте с керамическими порошками), что термопары с термоэлектродами большего диаметра более стабильны, чем термопары с термоэлектродами меньшего диаметра (рис. 4).

Некоторое отличие в поведении термопар с термоэлектродами диаметром 1,0 мм (повышение показаний после 100 ч отжига при 1200°С) может быть объяснено погрешностью измерений. Термоэлектроды платинородий-платиновых термопар были подвергнуты металлографическому, рентгеноструктурному и спектральному исследованиям в их исходном состоянии и после 200-часового отжига при 1200°С. Металлографический и рентгенографический анализы были произведены доцентами Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина канд. техн. наук И. Е. Горшковым и М. И. Замоториным.

Ни металлографический, ни рентгенографический анализы не установили причин изменения термоэлектродвижущей силы термопар, за исключением обнаружения сильного роста зерна. Спектральным анализом (после отжига) в платиновых термоэлектродах были обнаружены примеси родия, магния, кальция, кремния и меди, которые, по-видимому, и являются

причиной изменения т. э. д. с. платиновых термоэлектродов, а следовательно, и термопар.

Отжиг термопар ПР 30/6 производился в трубчатой печи с нагревателем из сплава ПР-6. Рабочее пространство печи ограничивалось трубой из корундиза, обожженной при 1700° С в течение 20 ч. В качестве термоэлектродов сравнения были использованы термоэлектроды аналогичных термопар.

В результате исследования было установлено, что изменения т. э. д. с. термопар происходят в большей мере за счет изменения термоэлектрической характеристики термоэлектрода ПР-6. Средние изменения показаний термопар после отжига по сравнению с показаниями до отжига были измерены в сличительной печи по электродным методом и на индукционной печи путем сравнения показаний испытуемых и контрольной термопар.

Средние изменения градуировок испытуемых термопар, измеренные двумя различными способами, практически совпадают.

Отжиг термопар при 1400° С (см. рис. 5) производился в печи, изготовленной для горячих испытаний металлов в воздушной атмосфере. Рабочее пространство печи ограничивалось алундовой трубой. Термопары работали в этой печи в непосредственном контакте с образцом из жаростойкого сплава.

Проведенными исследованиями установлено следующее:

1) с увеличением диаметра термоэлектродов платинородий-платиновых термопар изменения т. э. д. с. в результате отжига уменьшаются;

2) платинородий-платиновая термопара диаметром 1,0 мм, защищенная от воздействия окружающей среды глухим чехлом из окиси алюминия, после 500-часового отжига при 1400° С практически не изменила своих показаний.

Родий-платинородиевые (ПР 100/20) термопары вследствие чрезвычайной хрупкости родиевого термоэлектрода были сняты с испытаний: одна после 100-часового отжига, другая после 200-часового отжига, хотя практически их показания остались без изменения.

Термопары ПР 30/6 диаметром 0,5 мм с оголенным спаем, находящимся в контакте с жаростойким образцом, мало изменили свои показания.

Для выяснения областей применения новых термопар были проведены испытания термопар типа ПР 30/6 в вакууме при давлении $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. при температуре 1500° С. Первоначально термопары, армированные бусами, которые изготовлены из окиси алюминия с примесью окиси титана, были установлены в печь без герметичной защиты (колпачка). В этих условиях термопары загрязнялись вольфрамом, распыляющимся с нагревателя. Изменение градуировок термопар после 100 ч нагрева вызывает погрешность измерения температуры около 120° С. Стабильность показаний термопар проверялась сличением их т. э. д. с. с т. э. д. с. образцовой термопары при 1000° С. Глубина погружения термопар при сличении в первоначальных и повторных испытаниях равнялась глубине погружения в вакуумной печи.

При последующих испытаниях термопары были защищены от загрязнений корундовым колпачком. Диаметр электродов этих термопар 1,0 мм. Армированы они были бусами из окиси бериллия. После 200-часового отжига при температуре 1500° С погрешность показаний термопар находилась в пределах погрешности их поверки при 1200° С.

Термопары типа ПР 30/6 были подвергнуты также испытаниям в процессе измерения температур жидкой стали в тигле индукционной печи в цехе металлургического завода. Армировка термопары в жезле и колпачке была осуществлена по методу, предложенному А. К. Маклашиным [6]. Контроль стабильности градуировок испытуемых термопар ПР 30/6 осуществлялся периодически после ряда их погружений путем сравнения

с контрольной платинородий-платиновой термопарой, рабочий конец которой обновлялся перед каждым погружением.

Измерения т. э. д. с. испытуемых и контрольной термопар производились переносным потенциометром типа ПП. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Номер контрольного измерения	Показания термопары, °С		Погрешность показания, °С
	испытуемая	контрольная	
Термопара № 1			
40	1550	1546	+4
60	1570	1576	-6
92	1615	1620	-5
93	1630	1632	-2
107	1590	1587	+3
Термопара № 2			
2	1555	1550	+5
67	1565	1566	-1
89	1620	1613	+7
90	1660	1656	+4
112	1710	1710	0

Примечание. Термопары вышли из строя после 107 и 112 измерений при ремонте вследствие обрыва термоэлектродов при извлечении их из молибденового наконечника.

Таким образом, испытания показали высокую стабильность термопар типа ПР 30/6 при многократном измерении ими температур жидкой стали без обновления рабочего спая.

Из проведенной комплексной работы можно сделать заключение, что в настоящее время наиболее точно измеряющими температуры расплавленных металлов и температуры выше 1400° С в течение нескольких сот часов являются термопары типа ПР 30/6. При эксплуатации их в промышленных условиях армировка и охранные колпачки должны быть выполнены из окиси алюминия с примесью окиси титана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордов А. Н., Эргардт Н. Н., «Заводская лаборатория», № 6, 1957.
2. Chaussain M., *Founderie*, v. 77, 1952, p. 955.
3. Ehringer H., *Metall*, Bd. 15/16, 1954, p. 596.
4. Брагин Б. К., «Измерительная техника», № 2, 1956.
5. Эргардт Н. Н., «Измерительная техника», № 6, 1957.
6. Маклашин А. К., *Теплоэнергетические приборы и регуляторы*, Лонитопробор, вып. 1, 1952.

А. А. РУДНИЦКИЙ

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОКАЗАНИЙ ТЕРМОПАР ИЗ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Предел измерения температуры с помощью термопары определяется температурой плавления ее термоэлектродов. Однако термопара может работать устойчиво при температурах, лежащих много ниже такого предела. Причина этого заключается в окисляемости термоэлектродов, летучести и диффузии металлов в горячем спае, химических реакциях между материалом термоэлектродов, окружающей средой и изолирующей керамикой.

На воздухе в окислительной атмосфере из благородных термопар только хромель-алюмелевая термопара работает достаточно устойчиво до 1100°C . Для более высоких температур применяют термопары из вольфрама, молибдена и их сплавов. В окислительной атмосфере эти металлы могут выдерживать без разрушения всего несколько минут при температурах $1500 + 2000^{\circ}\text{C}$. Температура плавления вольфрама, молибдена и их сплавов, во всяком случае, выше 2500°C . В вакууме или атмосфере инертного газа могут быть изготовлены термопары с устойчивыми характеристиками. Для измерения температуры жидкой стали применяют именно такие термопары, они выдерживают несколько кратковременных погружений в металл без разрушения, сохраняя относительную устойчивость показаний.

Преимуществом термопар из благородных металлов является возможность применения их в окислительной атмосфере.

Восстановительная среда оказывает вредное влияние на платину и ее сплавы, изменяя термоэлектродвижущую силу (т. э. д. с.) и придавая хрупкость термоэлектродам. Восстановители, например, углерод или водород, способны растворяться в платине и восстанавливать металлы, содержащиеся в керамике, которые, в свою очередь, реагируют с платиной [1]. Наиболее чувствительной к влиянию керамики и внешней среды является чистая платина. Сплавы платины с родием менее реакционноспособны.

Температурный предел устойчивости показаний платинородий-платиновой термопары принимается 1300°C . Для уменьшения диффузии родия в горячем спае, повышения температуры плавления термоэлектродов и повышения устойчивости термоэлектрических свойств в оба термоэлектрода вводят родий. В настоящее время известно большое количество сплавов платины с родием, применяемых для изготовления термоэлектродов термопар типа ПР 13/1 [2], ПР 20/5 [3], ПР 30/6 [4], ПР 40/20 [5]

и ПР 100/20 [6]. Верхний предел измерения температуры этими термопарами определяется температурой плавления термоэлектрода, содержащего меньшее количество родия. Максимальное содержание родия в отрицательном термоэлектроде двух последних типов термопар составляет 20%. Температура плавления этого сплава, равная 1884°С [5], является предельной температурой, при которой возможно применение термопар типа ПР 40/20 и ПР 100/20.

Для более высоких температур (2000 ÷ 2200°С) применяется термопара (иридий + 60% родия) — иридий [7]. Температура плавления иридия составляет 2443°С, температура плавления сплава точно не определена, но очевидно она выше 2000°С. Этой температурой определяется верхний предел измерения температуры с помощью такой термопары.

Очень большое значение имеет вид градуировочных характеристик термопар (рис. 1).

Наиболее высокую т. э. д. с. развивает термопара типа ПР10/0. Очень малая т. э. д. с. термопары типа ПР 30/6 (0 ÷ 200°С) позволяет применять ее без термостатирования свободных концов для технических измерений. Термопара типа ПР 100/20 развивает еще меньшую

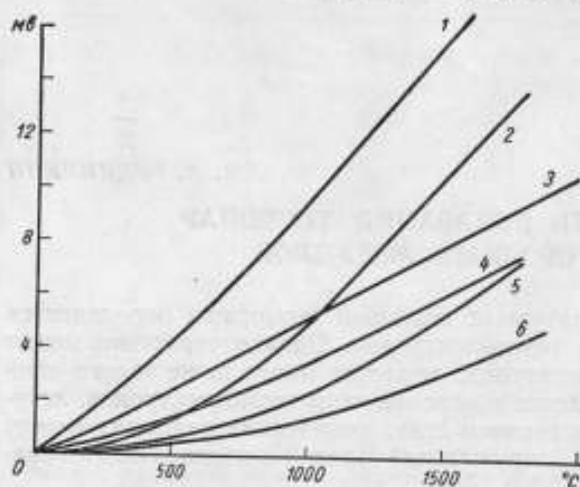


Рис. 1. Термоэлектродвижущие силы термопар.

1 — (Pt + 10% Rh) — Pt; 2 — (Pt + 30% Rh) — (Pt + 6% Rh);
3 — (Ir + 60% Rh) — Ir; 4 — (Pt + 20% Rh + 10% Ir) —
(Pt + 20% Rh); 5 — Rh — (Pt + 20% Rh); 6 — (Pt + 40% Rh) —
(Pt + 20% Rh).

т. э. д. с. и тоже может быть применена без термостатирования свободных концов. Т. э. д. с. термопары ПР 40/20 очень мала и для ее измерения с достаточной для практики точностью требуется применение специальных приборов. Термопара (иридий + 60% родия) — иридий имеет почти прямолинейную характеристику, что чрезвычайно удобно в работе, однако она требует термостатирования свободных концов или применения компенсационных проводов.

Характеристики термоэлектродов из родия и иридия воспроизводимы с большим трудом. Изготавливаемые в настоящее время различные образцы проволоки из родия иногда значительно отличаются друг от друга. То же можно сказать и о термоэлектродах из иридия. Очевидно, для создания стандартных градуировок таких термопар необходимо изготовление этих металлов достаточной чистоты с установившимися термоэлектрическими свойствами.

Воспроизводимость термоэлектрических свойств как чистой платины, так и ее сплавов с родием достигается в производстве с большой точностью.

Платина и ее сплавы, содержащие до 30% родия, обладают высокой пластичностью, и изготовление из них термоэлектродов не представляет никаких затруднений. Родий же, иридий и сплавы иридия протягиваются в проволоку только в горячем состоянии. Это значительно усложняет и удорожает производство.

Для замены родия были произведены опыты по подбору сплава, обладающего лучшими технологическими свойствами. Создание такого сплава позволило бы стандартизовать градуировку термопары до 1800°C .

Изучение термоэлектрических свойств выбранных сплавов показало, что достаточной т. э. д. с. обладает тройной сплав платина—родий—иридий. Термопара (платина +20% родия +10% иридия) — (платина +20% родия) развивает т. э. д. с., близкую к т. э. д. с. термопары ПР 100/20, и обладает удовлетворительной для практики устойчивостью.

Устойчивость термоэлектрических характеристик различных термоэлектродов проверялась при 1550°C и 1800°C в печах с обмоткой из сплава платины +30% родия. Предварительно термоэлектроды отжигались при 1200°C в течение 2 ч. Термопара заключалась в 2-канальные капилляры из различной керамики. Температура определялась по тем же термопарам. После длительной выдержки определялись значения т. э. д. с. термопар в реперных точках плавления палладия (1552°C), когда испытания велись при 1550°C , и платины (1769°C), если испытания велись при 1800°C .

При температуре 1550°C испытания производились в капиллярах из окиси алюминия. Средние изменения показаний термопары ПР 10/0 за 100 ч работы (при испытании 400 ч) составляют 20°C , или 1,3%.

Для термопары ПР 30/6 испытания производились в течение 500 ч. Среднее изменение показаний за 100 ч работы составило 7°C , или 0,45%.

Термопара ПР 100/20 испытывалась 1000 ч. Среднее изменение показаний за 100 ч работы было 1°C , или 0,07%. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

Если принять допустимую погрешность при измерении температуры 1%, то при 1550°C эта ошибка возникнет для термопары ПР 10/0 через 75 ч, для термопары ПР 30/6 — через 230 ч и для термопары ПР 100/20 — через 1500 ч.

При 1800°C испытания производились с термопарами, предварительно отожженными при 1200°C в течение 2 ч. Продолжительность выдержки термопары при температуре 1800°C была 50 и 100 ч. После этого производилось измерение т. э. д. с. при температуре плавления платины (рис. 3).

Термопара ПР 100/20 была испытана в керамике из окиси алюминия, окиси бериллия и синоксала. Изменение т. э. д. с. в этих условиях не превышает $\pm 1\%$.

В термопаре (платина +20% родия +10% иридия) — (платина +20% родия), где положительным термоэлектродом служит тройной сплав вместо чистого родия, происходят более сложные явления. В процессе отжига повышается абсолютная т. э. д. с. положительного термоэлектрода. Поэтому в первоначальный период т. э. д. с. термопары сразу быстро возрастает. Если предварительный отжиг происходил при 1200°C , т. э. д. с. увеличивается за 25 ч на 4%. При дальнейшей работе это отклонение уменьшается. Отжиг положительного термоэлектрода при 1350°C в течение 2 ч приводит к уменьшению величины положительности отжига т. э. д. с. до 2%. Очевидно, увеличением продолжительности отжига

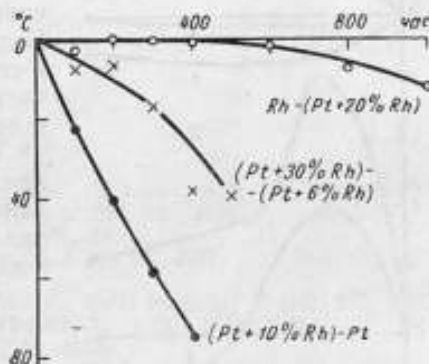


Рис. 2. Изменение показаний термопар при 1550°C в зависимости от времени работы.

положительные изменения могут быть уничтожены полностью. При дальнейшей работе т. э. д. с. термопары падает ниже первоначального значения на 1,36% за 100 ч работы. Это явление объясняется испарением и диффузией иридия в отрицательный термоэлектрод. Несмотря на несколько большую ошибку измерения, термопара (платина + 20% родия + 10% иридия) — (платина + 20% родия) имеет существенные преимущества. В ней малопластичный родиевый термоэлектрод заменен легкообрабатываемым сплавом платина — родий — иридий. Кроме того, отпадает необходимость получения родия с устойчивыми термоэлектрическими свойствами. Получение сплава стандартного состава и свойств много легче, чем изготовление чистейшего металла с постоянными заданными свойствами.

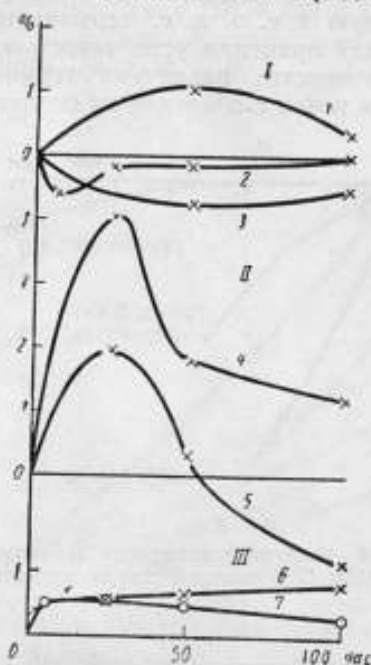


Рис. 3. Изменение показаний термопар при 1800° С в зависимости от времени работы в различной керамике.

1 — Rh — (Pt + 20% Rr); 1 — Al_2O_3 ;
2 — BeO; 3 — SiOxSx;
II — (Pt + 20% Rh + 10% Ir) — (Pt + 20% Rh);
4 — отжиг 1200° С; 5 — отжиг 1350° С;
III — (Ir + 60% Rh) — Ir; 6 — Al_2O_3 ;
7 — BeO.

Термопара ПР 30/6 при 1550° С в изоляции из корундиза в окислительной атмосфере может работать 230 ч с погрешностью до 1%; при 1800° С ее показания неустойчивы.

Термопара ПР 100/20 может работать устойчиво в капиллярах из корундиза в окислительной атмосфере до 1500 ч с погрешностью не более 1%. При 1800° С в окислительной атмосфере в капиллярах из окиси алюминия, окиси бериллия и синоксала термопара работает с погрешностью $\pm 1\%$ в течение 100 ч.

Недостатками этой термопары являются отсутствие в настоящее время родия с установившимися термоэлектрическими свойствами и низкая пластичность его при изготовлении проволоки. Этот недостаток может быть сведен до минимума при наличии термоэлектродов из родия повышенной чистоты.

В термопаре (платина + 20% родия + 10% иридия) — (платина + 20% родия) термоэлектроды могут быть изготовлены с установившимися термоэлектрическими свойствами. Технология их изготовления доста-

твенные преимущества. В ней малопластичный родиевый термоэлектрод заменен легкообрабатываемым сплавом платина — родий — иридий. Кроме того, отпадает необходимость получения родия с устойчивыми термоэлектрическими свойствами. Получение сплава стандартного состава и свойств много легче, чем изготовление чистейшего металла с постоянными заданными свойствами.

Термопара (иридий + 60% родия) — иридий была испытана при 1800° С в керамике из окиси алюминия и окиси бериллия. Во время работы т. э. д. с. повышается.

В окиси алюминия за 100 ч наибольшее изменение достигает 0,8%.

Двухчасовая выдержка в углеродистой атмосфере при 1550° С термопары родий — (платина + 20% родия), помещаемой в капилляры из окиси алюминия, показала, что свойства ее не изменяются, и термоэлектроды не становятся хрупкими. Эти опыты показывают, что восстановительная атмосфера опасна своим влиянием на керамику, так как она восстанавливает окислы металлов, реагирующих затем с термоэлектродными.

В заключение можно сказать, что изучены градуировочные характеристики и устойчивость показаний высокотемпературных термопар из благородных металлов.

точно проста. Поэтому такая термопара более удобна по сравнению с термопарой ПР 100/20. Однако при 1800° С устойчивость ее термоэлектрических свойств ниже.

Термопара (иридий + 60% родия) — иридий имеет градуировочную характеристику, близкую к прямой. Это создает некоторое удобство при градуировке и интерполяции т. э. д. с. Но такая термопара требует обязательного термостатирования холодных спаев или применения компенсационных проводов. Термопара работает в капиллярах из окиси алюминия или окиси бериллия в окислительной атмосфере при 1800° С с погрешностью около 0,8%. Верхний предел применимости термопары лежит около 2100 ÷ 2200° С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eringer H., Metall, 8, H. 15/16, 596, 1954; Chausain M. M., Fonderie (77), 2955, 1952; Fonderie Trage Journal, 91, № 1823, 147; № 1824, 189, 1951.
2. Metcalf A. G., Brit. appl. Phys., 1, 256, 1950.
3. Chaston I. C., Platinum Metals Review, 1 (1), 20, 1957.
4. Arch. Techn. Mess., 205, 50, 1953.
5. Jewell R. C., Knowles E. G., Land T., Metal Industry, 87 (11), 217, 1955.
6. Рудницкий А. А., Тюрин И. И., Ж. Н. Х., 1 (5), 1074, 1956.
7. Feussner O., Z. Techn. Phys., 54, 155, 1933.

С. К. ДАНИШЕВСКИЙ

НОВЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В настоящее время на большинстве отечественных заводов для измерения температуры жидкой стали в тиглях индукционных печей, в ваннах мартеновских и электродуговых печей и в ковшах применяются вольфрам-молибденовые и платинородий-платиновые (ПР 10/0) термопары.

Перед Центральной лабораторией автоматики (ЦЛА) была поставлена задача исследовать другие типы термопар платиновой группы, позволяющие повысить температурный предел измерений до $1700 \pm 1800^\circ \text{C}$ и обладающие более стабильными характеристиками. Одновременно с этим ставилась задача отыскания новых термоэлектродных материалов для повышения температурного предела измерения.

Важнейшими характеристиками термопар, определяющими их пригодность для применения в тех или других условиях, являются, как известно, стабильность термоэлектрических свойств, абсолютная величина т. э. д. с., крутизна градуировочной кривой, механическая прочность термоэлектродного материала, предельные температуры для длительных и кратковременных измерений.

Было решено исследовать в промышленных условиях три типа термопар платиновой группы: ПР 10/0; ПР 13/1 и ПР 30/6. Испытания проводились на заводе «Электросталь». Надо отметить, что надежная работа термопары в промышленных условиях определяется не только качеством и свойствами термоэлектродного материала, но также и конструкцией арматуры термопары, которая при неудачном выполнении может свести на нет высокие качества самих термоэлектродов.

Для сопоставления различных конструкций термопар ЦЛА разработала техническое задание, по которому в Львовском совнархозе изготовлено три типа опытных образцов арматуры термопар для электродуговых и мартеновских печей. Каждый тип арматуры был изготовлен в двух вариантах: с короткими (130 мм) и длинными термопарами (рис. 1).

Во всех типах арматуры при промышленных испытаниях применялись термопары ПР 10/0 и ПР 30/6. Кроме этого, измерялись температуры жидкой стали в тиглях индукционных печей с использованием термопар ПР 13/1 (рис. 2).

Т. э. д. с. термопар регистрировалась на потенциометре ЭПТ-120 (Челябинский завод) с градуировкой ПП 0— 1600°C . Прибор перед испытаниями был переделан по типу ЭП-107 (скорость передвижения диаграммной бумаги 3,25 об/мин). При подключении к прибору термопары ПР 30/6

участок шкалы прибора $950 \div 1255^\circ \text{C}$ соответствовал интервалу температур $1400 \div 1700^\circ \text{C}$.

Для термопар ПР 30/6 компенсационными (удлинительными) проводами являлись медные провода; для термопар ПР 10/0 — провода типа ТП.

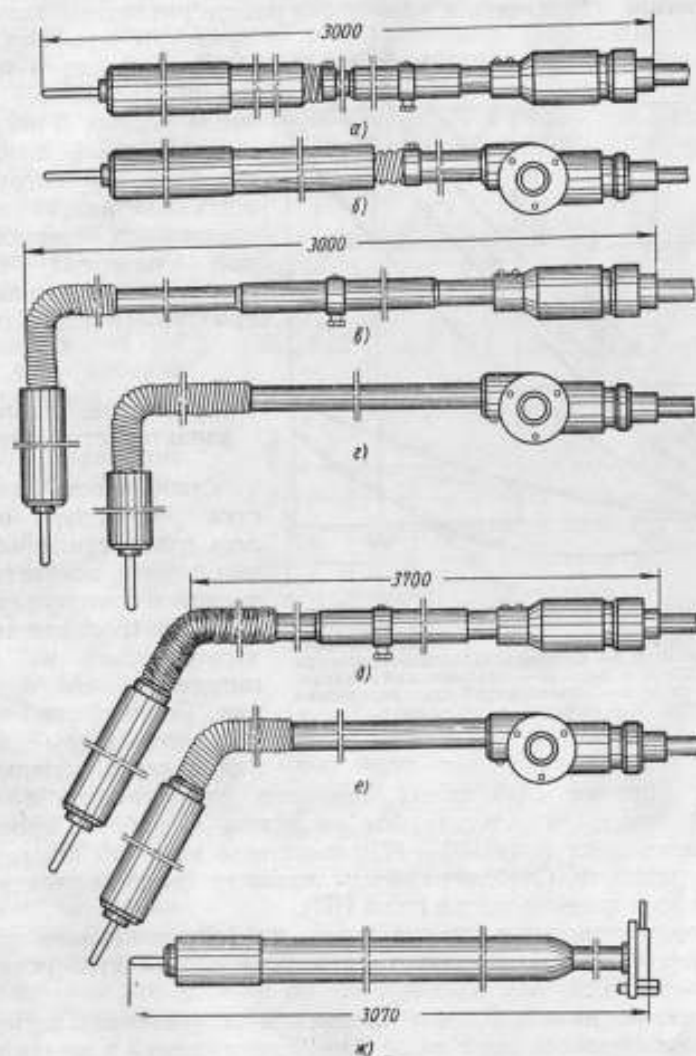


Рис. 1. Конструкции термопар, прошедших промышленные испытания: а — ТПП-117; б — ТПП-107; в — ТПП-127; г — ТПП-137; д — ТПП-087; е — ТПП-097; ж — КМК.

Градуировка термопары ПР 30/6 была выполнена в высокотемпературной печи ЦЛА. Средняя квадратичная погрешность результата градуировки составляет около $\pm 7^\circ$ *.

В начале испытаний спай термопар изготовлялся сваркой при помощи специального приспособления. В дальнейшем спай изготовлялся в виде

* Средняя квадратичная погрешность измерения температуры доньшка наконечника оптическим пирометром (ОП-48). Такой способ градуировки термопар из сплавов платины нельзя признать приемлемым. Присутствие в рабочем пространстве печи этого типа CO и CO_2 от графитового нагревателя приводит к порче термопар. Ред.

скрутки, так как было установлено, что способ его изготовления не отражается на правильности показаний термопары.

При промышленных испытаниях главное внимание обращалось на стабильность характеристик термопар, механическую прочность термоэлектродов, а также надежность и удобство в работе различных конструкций арматуры термопар.

Для проверки термопары разармировались сначала после первых 5 погружений, а затем после каждых следующих 10 погружений в жидкий металл, после чего исследовались термоэлектродный материал термопар, состояние различных узлов арматуры и изоляция.

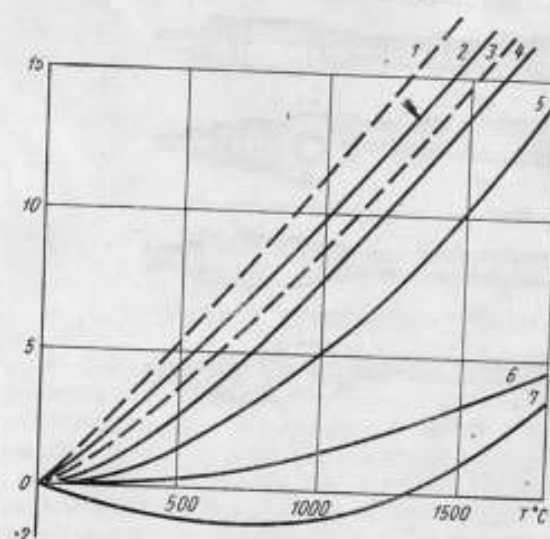


Рис. 2. Характеристики применяемых термопар.

1 — вольфрам-ренийевая ВР 3/15; 2 — платинородий-платиновая ПР 10/0; 3 — платинородий-платинородиевая ПР 13/1; 4 — ЦНИИЧМ-1; 5 — платинородий-платинородиевая ПР 30/6; 6 — платинородий-платинородиевая ПР 40/20; 7 — вольфрам-молибденовая.

измерения. Горячие спай обеих термопар скручивались платиновой проволокой, после чего термопары вводились в рабочее пространство трубчатой печи на глубину 100 ± 110 мм, т. е. в зону наибольшего температурного градиента. Свободные концы термопар присоединялись к зажимам переносного потенциометра (типа ПП).

Сличение производилось также путем дифференциального подключения термопар к потенциометру. Температура в трубчатой печи составляла $850 \pm 900^\circ\text{C}$.

Исследование показало, что изменения характеристик термопары ПР 30/6 не наблюдалось даже после 20—25 погружений в жидкий металл. Погрешность же термопары ПР 10/0 наблюдалась уже после первых 5 погружений и в дальнейшем продолжала возрастать: через 15—30 погружений она достигала $-8 \div -15^\circ\text{C}$ при $850 \pm 900^\circ\text{C}$ (рис. 3, в).

Следует ожидать, что погрешность термопары при рабочих температурах ($1500 \pm 1650^\circ\text{C}$) будет примерно в 1,5—2 раза больше, чем при температуре $850 \pm 900^\circ\text{C}$, т. е. около $-15 \div -30^\circ\text{C}$ (рис. 3). Такое заключение вытекает также из результатов исследований термопар ПР 10/0 на Кузнецком металлургическом комбинате (КМК), проводившихся ЦЛА совместно с работниками комбината в мае 1956 г. При испытаниях было отобрано несколько рабочих термопар, выдержавших без возобновления спая 20 и более погружений в ванну мартеновской печи. Показания этих термопар сличались с показаниями контрольных термопар ПР 10/0 в тигле индукционной печи и в трубчатой печи.

Определение стабильности характеристик термопар

Стабильность характеристик термопар определялась путем сличения в трубчатой печи показаний испытуемой и контрольной термопары. Контрольная термопара изготовлялась из того же материала, что и испытуемая. Горячий спай контрольной термопары возобновлялся через каждые 3—4

Перед контрольными измерениями в тигле индукционной печи термопары связывались таким образом, чтобы их рабочие концы были на одном уровне, после чего термопары погружались в металл (рис. 3, б).

Термопары к прибору (потенциометр типа ЭП-107 со шкалой $900 \div 1700^\circ\text{C}$) подключались поочередно (дважды) через переключатель. Подход стрелки потенциометра к устойчивому показанию происходил всегда с одной стороны, что исключало возможные погрешности за счет вариации прибора.

Перед сопоставлением показаний термопар в трубчатой печи рабочие концы термопар связывались платиновой проволокой, после чего термо-

пары вводились в рабочее пространство печи, в зону с наибольшим температурным градиентом. Было установлено, что погрешность одних и тех же термопар при проверке в индукционной печи (температура $1500 \div 1550^\circ\text{C}$) примерно в 1,5–2 раза больше их погрешности, обнаруживаемой при проверке в трубчатой печи (температура $900 \div 1050^\circ\text{C}$). Так, в первом случае погрешность достигала величины $-23 \div -25^\circ\text{C}$ (рис. 3, а), а во втором — $-13,0 \div -13,5^\circ\text{C}$.

Результаты испытаний термопар ПР 13/1 в тиглях индукционных печей (температура $1500 \div 1550^\circ\text{C}$) показали, что эта термопара по стабильности своих термоэлектрических свойств занимает промежуточное положение между термопарами ПР 30/6 и ПР 10/0. Так, после 20–30 погружений без возобновления спая погрешность термопары, как правило, не превышала $-5 \div -8^\circ\text{C}$ (рис. 3).

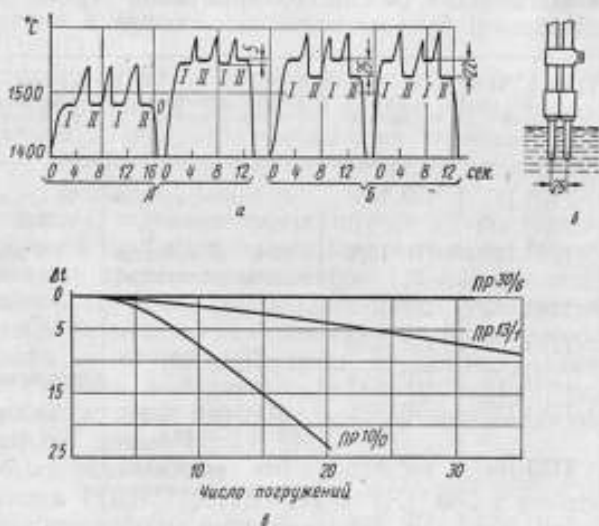


Рис. 3. Определение стабильности ПР термопар: а — определение погрешности рабочих ПР термопар: А — новых термопар; Б — после более 20 погружений. I — показания контрольной термопары; II — показания рабочей термопары; б — положение контрольной и испытуемой термопар при проверке; в — изменение погрешности ПР термопар в зависимости от числа погружений на одном спая.

Определение механической стойкости термоэлектродов

Механическая стойкость термоэлектродов определялась путем двух-трехкратного небольшого их изгиба вблизи рабочего конца. Значительные изгибы не допускались во избежание наклепа или местного структурного перерождения материала при высоких температурах, вызывающего хрупкость термоэлектродов при дальнейших измерениях. Такая проверка термоэлектродов на механическую стойкость производилась через первые 5 и в дальнейшем через каждые 10 погружений термопары в жидкий металл.

Как показали исследования, механическая стойкость термопар ПР 10/0 больше, чем термопар ПР 30/6. Механическая стойкость термопары

ПР 13/1 занимает промежуточное положение. Так, термопары ПР 10/0 без возобновления спая выдерживали от 10 до 16 погружений. В случае дополнительной защиты рабочего конца молибденовым наконечником срок службы термопар возрастал примерно в 1,5 ÷ 2,0 раза. Термопары ПР 30/6 выдерживали от 4 до 7 погружений при неотожженной проволоке и от 5 до 22 погружений при отожженной. Количество погружений без возобновления спая во многом зависело от аккуратного обращения с термопарой. Отжиг производился в течение 3 ч при яркостной температуре около 1100° С. Длина отжигаемого участка проволоки составляла около 3 м. В таблице приводятся данные механической стойкости термопары в зависимости от способа армировки термоэлектродов и их термической обработки.

Тип арматуры	Тип термопары	Способ армировки термоэлектродов	Термическая обработка термоэлектродов	Длительность работы спая (количество погружений)	Тип печи
ТПП-137	ПР 10/0	С молибденовым наконечником	Неотожженные	30	Электро- дуговая
ТПП-137	ПР 10/0	Без молибденового наконечника	То же	12	
ТПП-107	ПР 10/0	То же	•	16; 10	
ТПП-137	ПР 30/6	•	•	4; 9; 7	
ТПП-137	ПР 30/6	•	Отожженные	5; 22	
ТПП-137	ПР 30/6	Стальная защитная трубочка	То же	5; 5; 5; 10; 7	Мартенов- ская
ТПП-107	ПР 30/6	Без молибденового наконечника	•	13	
ТПП-107	ПР 30/6	То же	•	5; 14; 12	
КМК	ПР 10/0	•	•	20	

Сравнивая все три типа термопар, следует признать, что с точки зрения стабильности термоэлектрических свойств неоспоримым преимуществом обладает термопара ПР 30/6.

Количество измерений, которые можно сделать этой термопарой без возобновления спая, лимитируется механической стойкостью термоэлектродов (особенно ПР 30). Однако можно полагать, что при аккуратном обращении с термопарой во время эксплуатации количество измерений на одном спая можно довести до 25 ÷ 35 (при измерениях в мартеновских или электродуговых печах).

Количество измерений, которые целесообразно делать термопарой ПР 10/0 без возобновления спая, лимитируется ее недостаточной стабильностью. Исходя из этого, количество измерений без возобновления спая не следует доводить более чем до 8 ÷ 10 во избежание получения заметных погрешностей.

Как уже говорилось, большое значение для удлинения срока работы термопар в производственных условиях имеет правильное и рациональное конструктивное решение ее арматуры. Ниже будут рассмотрены основные типы конструктивных решений арматуры испытывавшихся термопар.

Пригодность той или другой конструкции арматуры оценивалась, исходя из ее надежности, стойкости и удобства эксплуатации. Сопротивление изоляции между электродами, а также электродами и корпусом определялось мегомметром на 500 в, как правило, через каждые 5 ÷ 10 погружений. Сопротивление изоляции у вновь собранной термопары составляло

100 мм и выше. У термопар, снабженных молибденовым наконечником, сопротивление через 10 + 15 погружений уменьшалось до 10 + 20 ком, что можно объяснить образованием налета окиси молибдена (MoO_3) на изоляционных трубках. У термопар без молибденового наконечника сопротивление изоляции практически не менялось.

Для испытаний были представлены следующие типы арматуры термопар: ТПП-127 и ТПП-137 для электродуговых печей; ТПП-117, ТПП-087, ТПП-107 и ТПП-097 для мартеновских печей конструкции Кузнецкого металлургического комбината.

Каждый тип арматуры термопар был представлен в двух вариантах: с короткими электродами (ТПП-117, ТПП-127 и ТПП-087) и с длинными термоэлектродами и катушками с запасом термоэлектродной проволоки (ТПП-107, ТПП-137 и ТПП-097).

В арматуре термопар первого варианта термоэлектроды имели длину 130 мм. Соединение их с удлинительными проводами внутри трубы термопары осуществлялось сваркой. При разрушении спая термоэлектрод заменялся новым. Внутри трубы термопары удлинительные провода армировались двухканальными фарфоровыми трубками.

В арматуре второго варианта термоэлектроды внутри трубы термопары армировались фарфоровыми трубками, имеющими 4 канала. Через 2 канала пропускались стальные проволоки диаметром 1,2 мм для придания жесткости армированной трубкам термопаре. Такое устройство армировки освобождало термоэлектроды от механических нагрузок и способствовало увеличению срока их службы. Запасная термоэлектродная проволока наматывалась на катушки, находящиеся в головке термопары. При разрушении спая термоэлектроды вытягивались на необходимую длину, после чего изготовлялся новый спай.

В процессе испытаний было установлено:

1. Арматура термопар типов ТПП-117, ТПП-127 и ТПП-087 с короткими термоэлектродами не может быть рекомендована для измерения температуры жидкой стали из-за отсутствия специальных компенсационных проводов и неудобства в эксплуатации. Было установлено, что температура в месте спая термоэлектродов с компенсационными (удлинительными) проводами (длина термоэлектродов 130 мм) через 20 сек (время, необходимое для достижения установившегося значения температуры) после погружения термопары в ванну электродуговой печи (арматура типа ТПП-127) возрастает до 100°C , а через 15 сек после погружения в ванну мартеновской печи (арматура типа ТПП-117) доходит до $120 + 140^\circ\text{C}$. Через 2—3 мин после извлечения термопары из печи температура в месте спая у обеих термопар повышается соответственно до 800 и 900°C (рис. 4).

При таких температурах существующие компенсационные провода (сплав ТП и медь) сильно окисляются и становятся хрупкими.

Температура места спая термоэлектродов с компенсационным проводом внутри арматуры контролировалась путем установки в этом месте горячего спая армированной в фарфоровые трубки хромель-алюмелевой термопары (диаметр термоэлектродов 0,7 мм). Температура регистрировалась на потенциометре типа ЭП-107 градуировки ХА, $0 + 1100^\circ\text{C}$ со скоростью вращения диаграммной бумаги 3,25 об/мин. Была измерена также температура в защитной трубке на расстоянии 500 мм от сгиба (арматура типа ТПП-127). В этом месте температура через 20 сек возрастала примерно на $15 + 20^\circ\text{C}$, а через 4 мин после извлечения термопары из печи — достигала наибольшего значения (300°C).

Была сделана попытка применить внутри трубы в качестве удлинительных проводов для термопары ПР 30/6 проволоку из константана

диаметром 0,7 мм, которая при указанных выше температурах оставалась достаточно пластичной. Однако применение проволоки также было признано нецелесообразным вследствие того, что свободные концы термопары ПР 30/6 при температурах выше 100° С начинают развивать т. э. д. с., а это вызвало бы дополнительную погрешность (порядка 5 + 7°) при измерениях, особенно в мартеновских печах. Кроме того, константановая проволока оказалась недостаточно однородной.

При наличии даже специальных компенсационных проводов применение арматуры этого варианта связано с большими эксплуатационными

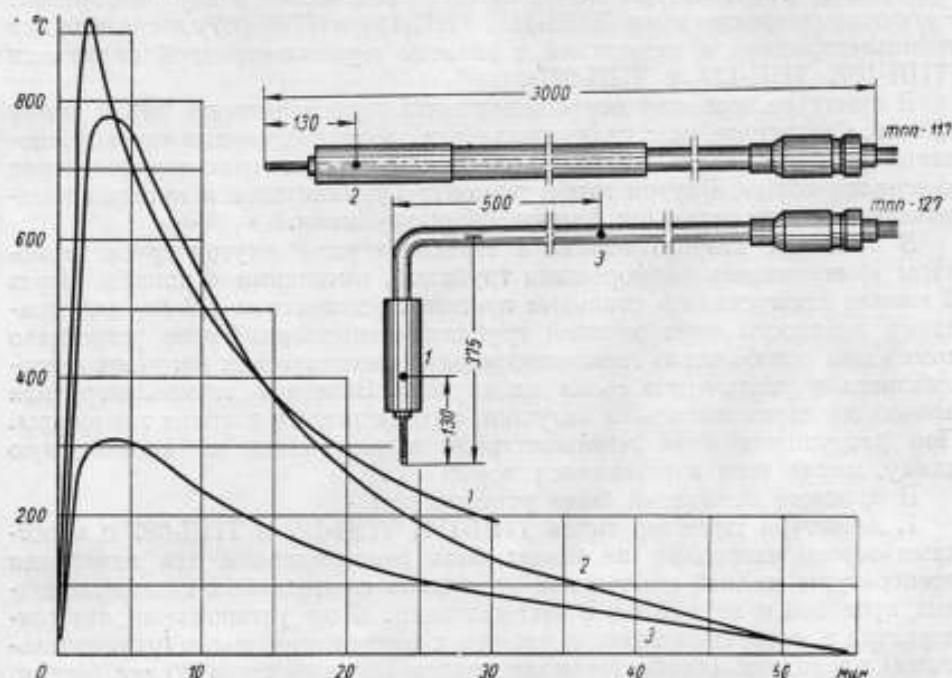


Рис. 4. Изменение температуры внутри чехла термопары во время измерений.
1, 2, 3 — кривые измерения температур в соответствующих местах на арматуре термопары.

трудностями и необходимостью увеличения количества армированных термопар в 2—3 раза, так как очередной замер данной термопарой может быть произведен не ранее чем через час после предыдущего замера вследствие медленного остывания места спая термопары с компенсационными проводами.

2. Арматура термопары типа ТПП-127 для измерения температуры жидкой стали в мартеновских печах также была признана непригодной вследствие неудобства ввода ее в смотровое окно (загнут конец трубы), сравнительно большого веса (15+16 кг без обмазки) и недостаточной жесткости конструкции.

Указанный тип арматуры термопары при увеличении жесткости целесообразно применять для измерения температуры жидкой стали в мартеновских печах только при помощи специальной тележки. Термопары на тележках обычно находят применение в новых больших цехах.

3. Арматура термопары Кузнецкого металлургического комбината также неудобна в эксплуатации, хотя она имеет и некоторые положительные качества, к которым можно отнести жесткость конструкции (цельно-

тянутая прямая труба из нержавеющей стали диаметром 25/20); достаточно термостойкую обмазку, нанесенную на металлическую сетку (выдерживает $10 \div 12$ погружений); хорошую защиту термоэлектродов от загрязнений; наличие двух стальных проволок, снимающих механическую нагрузку с термоэлектродов.

К недостаткам конструкции следует отнести: крайне сложную и неудобную перезарядку, требующую специально оборудованного помещения; необходимость при возобновлении спая извлекать термопару из трубы и разармировать; недостаточно удачную конструкцию головки, не предохраняющую от попадания в контактные гнезда грязи и др.; недостаточную термическую и механическую стойкость шамотного блока (в блоке образуются трещины после $3 \div 5$ погружений); необходимость защиты

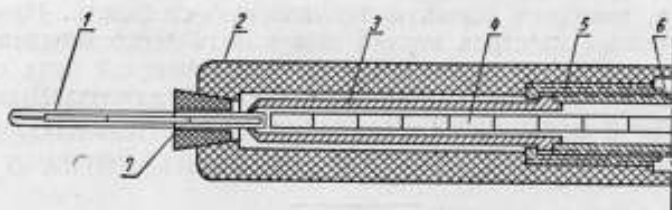


Рис. 5. Армирование термоэлектродов без молибденового наконечника.

1 — наконечник кварцевый с пробкой; 2 — блок графитовый; 3 — втулка стальная; 4 — изоляционные бусы; 5 — гайка накидная; 6 — труба; 7 — трубка стальная.

металлической трубки термопары обмазкой перед каждым погружением в металл; применение для защиты термоэлектродов вблизи горячего спая фарфоровой соломки (после $3 \div 4$ погружений соломка трескается и оплавляется, привариваясь к термоэлектродам). В процессе испытаний армировка термоэлектродов всех типов термопар вблизи горячего спая осуществлялась различными способами:

1) термоэлектроды армировались двухканальными глиноземистыми трубками диаметром $3,2 \times 2 \times 0,7$ мм, длиной 40 мм, затем вставлялись в молибденовый наконечник, поверх которого укреплялся кварцевый наконечник;

2) армировка осуществлялась, как указано выше, но без молибденового наконечника. Дополнительно для предохранения термоэлектродов от проникновения графитовой пыли до половины длины кварцевого наконечника вставлялась стальная трубка, через которую пропускались глиноземистые двухканальные трубки (рис. 5);

3) термоэлектроды армировались в защитные глиноземистые трубки (п. 1) и вставлялись в кварцевый наконечник.

Испытания показали, что применение защитного молибденового наконечника нецелесообразно. Применение наконечника увеличивает тепловую инерцию термопары примерно в 2 раза ($25 \div 33$ сек вместо $10 \div 15$ сек без молибденового наконечника) и требует наличия калиброванных кварцевых наконечников или использования кварцевых наконечников заведомо большего диаметра, что приводит к дополнительному увеличению инерции. Кроме того, изготовление молибденовых наконечников сравнительно сложно вследствие хрупкости материала. Следует также иметь в виду, что в случае разрушения кварцевого колпачка наконечник из молибдена не предохранит термоэлектроды от разрушения, так как молибден легко растворяется в жидкой стали.

Защита термоэлектродов молибденовым наконечником или стальной трубкой лишь усложняет конструкцию термопары.

Таким образом, из испытанных типов арматуры термопар наиболее полно отвечающими требованиям эксплуатации были признаны термопары ТПП-137 для электродуговых печей и ТПП-107 для мартеновских печей.

Конструкция арматуры термопары ТПП-137 достаточно надежна (выдержала более 80 погружений и осталась вполне пригодной к дальнейшей работе), удобна в эксплуатации (возобновление спая может быть легко произведено на рабочем месте у печей, перезарядка достаточно проста) и может свободно обслуживаться одним человеком (вес термопары около 8 кг).

Конструкция арматуры типа ТПП-107 имеет все положительные качества арматуры типа ТПП-137. Вместо обмазки применяются графитовые втулки, имеющие хорошую термическую стойкость. При необходимости вышедшая из строя втулка может быть легко заменена. После более 40 погружений термопары в ванну мартеновской печи состояние графитовых втулок было вполне хорошее. Вес арматуры термопары около 12 кг.

Ф. В. БОЧКОВ

К ВОПРОСУ О ДЛИТЕЛЬНОМ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВЛЕННЫХ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ В СВЯЗИ С АВТОМАТИЗАЦИЕЙ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

В 1955—1957 гг. КБ «Цветметавтоматика» проводило исследования возможности длительного измерения температуры расплавленных латуней и бронз с целью автоматизации процесса плавки на индукционных печах типа «Аякс». Работа проводилась в содружестве с ВНИИТС, ЦНИИЧМ и Кольчугинским заводом им. С. Орджоникидзе.

Трудность решения задачи состояла в выборе для термопары защитного наконечника, обладающего одновременно высокой термостойкостью, теплопроводностью, химической стойкостью, малой активностью к термоэлектродам и малой растворимостью в расплавленных металлах.

Исследовались наконечники из таких керамических материалов, как корундиз, синоксаль, окись алюминия, двуокись циркония, кварц и др., и из керметов: окись алюминия + 77% хрома, окись алюминия + 77% молибдена, карбид титана + 20% кобальта, карбид титана + 10% никеля и др. Исследовались также наконечники из молибдена.

Растворимость исследовалась путем непрерывной варки цилиндров из вышеуказанных материалов в расплавленной бронзе (7 суток) и бескислородной меди (14 суток) и последующим определением изменений их размеров.

Исследование показало, что в бескислородной меди никакой растворимости у всех материалов не наблюдается, а в расплавленной бронзе растворимость существует только у керметов, но она пренебрежимо мала и не препятствует проведению длительного измерения температуры.

Исследование химической стойкости показало, что наконечники из всех материалов, кроме молибдена, в воздухе при температурах 1100—1200° С заметно не окисляются. Молибденовый наконечник при этих температурах образует летучие окислы и постепенно сгорает с поверхности, уменьшая свои размеры. Однако этот процесс при разовых кратковременных погружениях в расплавленную латунь и бронзу протекает настолько медленно, что молибденовый наконечник обеспечивает без замены необходимое количество измерений в течение полной кампании печи (30 суток).

Исследования инерционности термопар с защитными наконечниками из различных материалов показали, что малой инерционностью термопары обладают с наконечниками из керметов и молибдена вследствие более высокой теплопроводности последних по сравнению с керамикой.

Инерционность термопары с наконечниками из керметов равна 12—15 сек, а из молибдена 8—9 сек.

Влияние материалов наконечника на термоэлектрические свойства платиnorodневых и платиновых электродов исследовалось путем прокалки последних в порошках из этих материалов и последующей поверки методом сличения одноименных электродов. Прокалка и поверка проводились при температуре 1100° С. Результаты исследования показали, что из-за загрязняемости термоэлектродов материалом наконечника при непрерывной прокалке в течение суток отклонения от стандартной градуировки у прокаленных электродов составили:

В окиси алюминия + 77% молибдена	3° С
В окиси алюминия + 77% хрома	7° С
В карбиде титана + 10% хрома	2° С
В карбиде титана + 10% никеля	13,5° С
В карбиде титана + 20% кобальта	15° С
В молибдене	9° С

Так как эти отклонения не выходят за пределы интервала допустимых температур розлива латуней и бронз, можно считать, что загрязняемость термоэлектродов из-за контакта с керметами и молибденом не препятствует производству разовых кратковременных измерений температуры в течение полной кампании печи.

Важнейшим свойством защитных наконечников для термопар является их термостойкость. Этой величиной в основном определяется срок службы наконечников. Наконечники с малой термостойкостью не пригодны для производства большого количества разовых кратковременных измерений температуры расплавленных металлов. Термостойкость исследовалась методом разовых погружений наконечников в расплавленный металл. Число погружений до разрушения определяло величину термостойкости наконечников. Погружения производились в расплавленную алюминиевую бронзу БАЖ при температуре 1200° С с выдержкой в металле в течение 2 мин и последующим охлаждением наконечников до температуры окружающего воздуха.

По условиям работы печей типа «Аякс» в течение полной кампании печи должно проводиться не менее 600 разовых кратковременных измерений температуры расплавленного металла. Поэтому наконечник должен выдерживать не менее 600 погружений.

В таблице, помещаемой ниже, приведены результаты испытаний на термостойкость в расплавленной алюминиевой бронзе БАЖ наконечников из различных материалов и изготовленных разными методами.

Из таблицы можно сделать следующие заключения:

1) наконечники из всех керамических материалов имеют низкую термостойкость и не пригодны для кратковременных разовых измерений температуры расплавленных металлов в течение полной кампании печи;

2) метод гидростатического прессования обеспечивает значительно более высокую термостойкость наконечников из одних и тех же материалов (керметы), чем метод протяжки;

3) наконечники, изготовленные гидростатическим прессованием из карбида титана + 20% кобальта, обладают наивысшей термостойкостью (свыше 600 погружений до разрушения) и пригодны для разовых кратковременных измерений температуры расплавленной бронзы в течение полной кампании печи. Наконечник из молибдена обладает еще более высокой термостойкостью, чем наконечники из керметов.

Таким образом, в результате исследований установлено, что длительно (в течение полной кампании печи) методом разовых кратковременных

Материал наконечника	Число погружений до разрушения		Материал наконечника	Число погружений до разрушения	
	изготовлен методом			изготовлен методом	
	протяжки	гидроста- тического прессова- ния		протяжки	гидроста- тического прессова- ния
Корундиз	0	—	Окись алюминия + +77% хрома	8	354
Спноксаль	0	—	То же	—	120
Окись алюминия	0	—	•	—	226
Муллит	0	—	•	—	486
Окись магния	0	—	•	—	257
Двуокись циркония	1	—	•	—	125
Окись алюминия + +30% окиси хрома	0	—	•	—	16
Окись алюминия + +1% окиси титана	0	—	•	—	122
Микролит	1	—	•	—	138
Карбид титана	1	—	•	—	276
Карбид бора	0	—	•	—	61
Кварц	44	—	•	—	50
Карбид титана + +20% кобальта	7	962	Окись алюминия + +77% молибдена	10	53
То же	—	1101	То же	—	18
•	—	789	Окись алюминия + +50% молибдена	—	8
•	—	610	То же	—	8
			•	—	9

Примечание. Метод протяжки состоит в изготовлении трубок путем выдавливания пластической массы через специальный мундштук. Наконечник для термопары делается из той же трубки, у которой заделывают вручную донышко.

Метод гидростатического прессования состоит в прессовании наконечников под большим давлением в гидростатической камере. Наконечник формируется из порошковой массы, находящейся в герметизированном резиновом мешочке с полированным металлическим стержнем в середине.

После формовки наконечников обоими методами их обжигают.

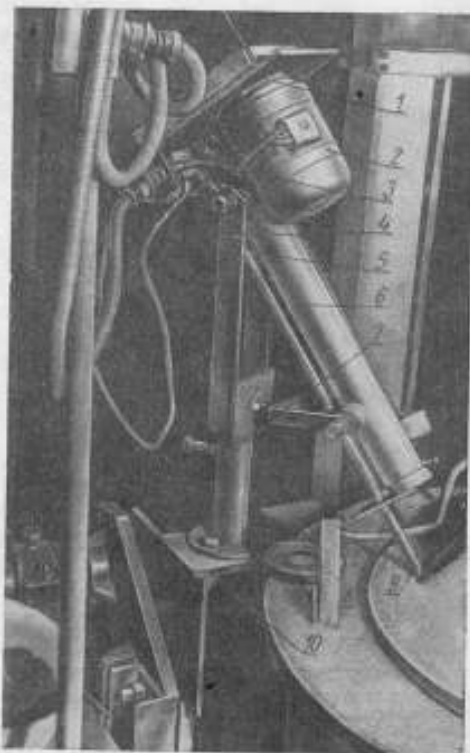
погружений можно измерять температуру платинородий-платиновой термопарой с наконечником из молибдена и карбида титана с 20% кобальта, не меняя его.

На основании этих исследований была сконструирована механизированная термопара периодического погружения (см. рисунок на стр. 56) и разработан щит автоматического управления.

Конструкция механизированной термопары состоит из корпуса 1 с двухходовым винтом и подвижной гайкой внутри, трехфазного асинхронного электродвигателя 2, редуктора 3 и собственно термопары, состоящей из головки 4, чехла 5 и защитного наконечника 6 с термоэлектродами в бусах.

Чехол термопары с помощью вилки и двух гаек крепится к подвижной гайке и вместе с наконечником с помощью держателя 7 направляется в отверстие крышки печи. Термопара укреплена на ферме печи с помощью платы 9, трубы стойки с фланцем 10 и опорной вилки 8.

Когда загруженная в печь шихта расплавится, литейщик нажимает на кнопку, система приходит в движение, и термopapa погружается в расплавленный металл. При достижении заданного на потенциометре ЭПД-12 значения печь автоматически отключается, и литейщик начинает розлив металлов. При наклоне печи для розлива термopapa автоматически выходит из металла. После окончания розлива печь снова автоматически включается для новой плавки.



Внешний вид механизированной термopapa периодического погружения.

Автоматическое управление обеспечивает предохранение от розлива сырого и перегретого металла и тем самым устраняется одна из важнейших причин брака при литье.

Установка в крупных литейных цехах механизированных термopapa со щитами управления на всех печах позволит ликвидировать большой штат сменных пиromетристов, осуществляющих измерения переносными термopapaми.

Механизированная термopapa со щитом управления была установлена и проверена в действии на двух печах типа «Аякс» Кольчугинского завода им. С. Орджоникидзе.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ПИРОМЕТРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ВАКУУМНЫХ ПЛАВКАХ

Цветовой фотоэлектронный пирометр ЦЭП-2 используется (ЦНИИЧМ) в течение трех лет для исследования процессов кристаллизации и контроля плавок в вакууме при давлении $10^{-1} \div 10^{-4}$ мм рт. ст. и в атмосфере аргона под давлением 50 ÷ 300 мм рт. ст. в 15-килограммной вакуумной печи и в лабораторных вакуумных печах на 0,5 и 1 кг металла.

Исследования проводились на железе, никеле, хrome, на сплавах Fe—Cr, ЖС-6, Л-114, ЭИ-661, на трансформаторных сталях с различным содержанием кремния, на сталях X-27, 18ХНВА и др.

На рис. 1 приведена схема расположения датчика цветовой пирометра на малой вакуумной печи.

Для температурного контроля хода плавки нет необходимости в определении истинной температуры, а достаточно знание цветовой температуры. В процессе плавки расплавленный металл закристаллизовывался. По прибору определяли цветовую температуру конца затвердевания. Затем металл вторично расплавляли, нагревали до нужной температуры и разливали в изложницы. В большинстве случаев величина перегрева составляла $50 \div 70^\circ \text{C}$. Такой контроль позволял получать слитки, отлитые в оптимальных и одинаковых для ряда плавок температурных условиях (при постоянстве температуры формы), что давало возможность исследовать влияние различных факторов на структуру и механические свойства выплавляемых сплавов.

При выплавке новых сплавов опытным путем подбиралась оптимальная для данного сплава и данной формы изложницы температура разливки. Исследования показали, что отклонение температуры разливки от оптимальной больше чем на 20°C приводит к резкому ухудшению качества отливки. Когда температура разливки понижена, формы заполняются плохо, если же температура повышена, отливка получается крупнозернистой, что значительно ухудшает ее механические свойства. При нормальной работе пирометра, градуируя его по температурной лампе 1 ÷ 2 раза в месяц, можно достаточно точно контролировать температуру разливки металла.

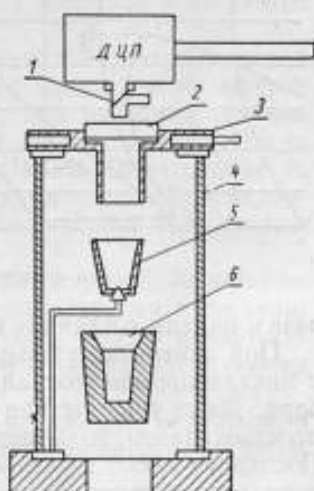


Рис. 1. Схема расположения прибора на печи.

1 — плоскопараллельное стекло для наблюдения за плавкой; 2 — кварцевое окно; 3 — водохлаждаемая крышка; 4 — кварцевая труба; 5 — тигель; 6 — изложница.

Цветовой пирометр использовался также при изучении процессов кристаллизации слитка. При пользовании термопарами сам спай термопары или чехол может служить центром, на котором начинается процесс кристаллизации. Бесконтактный метод измерения температуры позволял следить за охлаждением металла и не вносил в исследуемый материал никаких дополнительных центров кристаллизации. В результате исследования было обнаружено, что чистое железо (электролитическое и прямого восстановления) легко переохлаждается на $150 \div 200^\circ \text{C}$, а электролитический никель — на $100 \div 150^\circ \text{C}$.

На рис. 2 приведена кривая охлаждения слитка железа весом 300 г при скорости охлаждения 90° в минуту. Участок кривой *ab* — характеризует охлаждение жидкого железа выше температуры

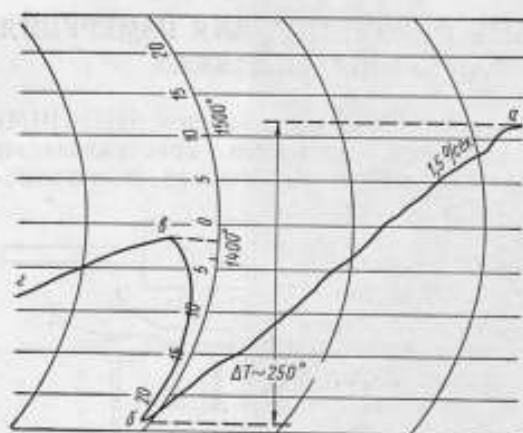


Рис. 2. Кривая охлаждения железа.

железа выше температуры плавления; участок *bc* — нагревание металла за счет выделяющейся теплоты кристаллизации; участок *cd* — охлаждение твердого железа. Выделяющаяся при затвердевании теплота кристаллизации разогревает металл, однако температура не обязательно достигает точки плавления, и, как видно из рис. 2, на кривой охлаждения отсутствует площадка.

Таким же методом проводятся исследования процесса кристаллизации двухкомпонентных сплавов на основе железа и никеля и влияния малых добавок (Al, Cr) на кристаллизацию железа.

При измерении температур железа, никеля, сплавов на основе железа и никеля промежуточная среда не оказывала влияния на показания прибора. Даже присутствие в печи небольшого количества дыма, видимого простым глазом, вызывает колебания показаний прибора всего на $3 \div 5^\circ \text{C}$. Последнее легко объяснить: поглощение в среде, где в одинаковой степени поглощаются синие и красные лучи, не меняет красно-синее отношение, а значит и показания прибора остаются неизменными.

Во время плавления хрома, упругость пара которого в это время составляет 63 мм рт. ст., при малом давлении инертного газа в печи, когда испарение металла может происходить достаточно интенсивно, не удастся надежно измерить цветовую температуру металла. Возможно, что это связано с поглощением в промежуточной среде. При плавлении металлов с большой упругостью паров в объеме печи могут находиться пары металла, а также жидкие или твердые частицы, образовавшиеся при конденсации паров. Поглощение парами металлов не может значительно повлиять на показания прибора, так как ширина линий поглощения парами во много раз меньше ширины полосы, пропускаемой светофильтрами прибора. Поглощение и рассеяние частицами металла, размеры которых соизмеримы с длиной волны, могут значительно исказить показание прибора, так как при прохождении через такую среду меняется красно-синее отношение, причем изменение это зависит от размера частиц.

Для выяснения влияния, которое оказывает промежуточная среда на металлы с большой упругостью пара, необходимы дальнейшие исследования.

Д. Я. СВЕТ, С. П. НАРЫШКИН, В. В. ГРИШИН

МОДУЛЯЦИОННЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР ДЛЯ РАСПЛАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ И ДРУГИХ ВЕЩЕСТВ

Важной проблемой для широкого применения радиационных методов пирометрии жидкого металла является определение значений его коэффициентов черноты излучения ϵ_1 , необходимых для перехода к истинным температурам.

Применявшаяся до сих пор методика измерения ϵ_1 жидкого металла основана на сравнении интенсивности излучения исследуемой поверхности с интенсивностью излучения черного тела. Эта методика связана со значительными техническими трудностями при осуществлении модели черного тела, работающей при высоких температурах. Определение ϵ_1 по величине коэффициента отражения ρ считалось мало реальным вследствие большого собственного излучения поверхности ванны расплавленного металла.

В настоящей работе описана установка (предложенная одним из авторов статьи), основанная на модуляционном методе определения ϵ_1 по величине коэффициента отражения, позволяющем весьма просто исключить влияние на результаты измерений во много раз его превышающего потока собственного излучения поверхности ванны.

Данная методика определения коэффициента отражения излучающей поверхности основана на том, что поток радиации, падающий на эту поверхность, предварительно модулируется.

В этом случае выделение модулированного потока отраженной радиации возможно при несоизмеримом соотношении между энергией отраженной и имеющей постоянную величину радиации и во много раз большей энергией собственного излучения поверхности ванны.

На рис. 1 приведена скелетная схема для определения коэффициента отражения металлической ванны.

В этом устройстве с помощью передвижных зеркал на фотоэлемент может попеременно попадать то поток модулированной радиации от температурной лампы T_1 , то суммарный поток радиации самостоятельного излучения Φ_0 и отраженный этой поверхностью поток модулируемой радиации. В первом случае модулированный с помощью обтюлятора D_1 поток радиации от источника T_1 непосредственно падает на приемник излучения (фотоэлемент). Пропорциональная этому потоку величина фототока усиливается и создает на выходе напряжение, которое мы обозначим

$$U_n = U_{nm} \sin \omega t; \quad U_{nm} = \text{const } \Phi_n,$$

где ω — круговая частота модуляции;

Φ_n — поток падающего излучения.

Во втором случае перед источником T_1 и приемником будут находиться не отверстия, а зеркала. Модулированный поток излучения от источника T_1 будет падать на поверхность металлургической ванны M и, отражаясь от последней вместе с мощным, но не модулированным потоком собственного излучения M , будет попадать в приемник Φ .

Величина коэффициента отражения ρ при данном способе будет элементарно определяться из величины отношения показаний прибора.

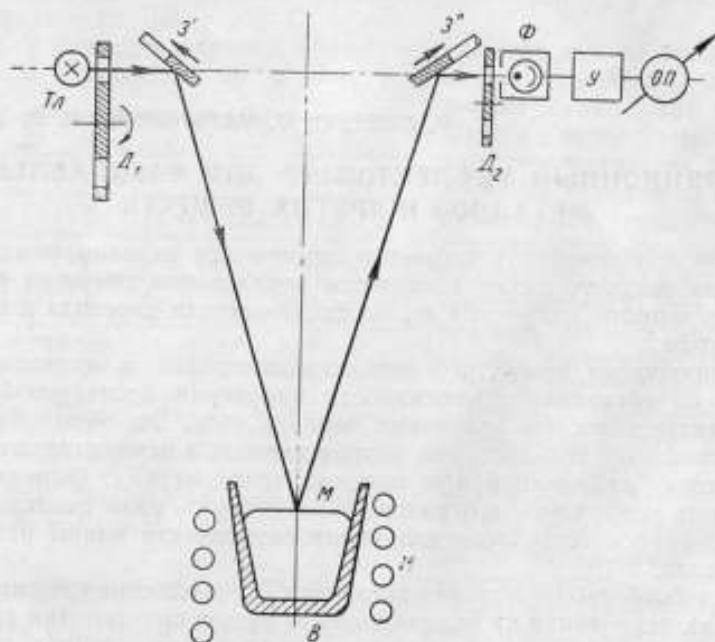


Рис. 1. Скелетная схема установки для определения коэффициента отражения для металлической ванны.

Z^1 и Z^2 — передвижные зеркала; T_1 — источник излучения; D_1 — диск-обтуратор; D_2 — диск со светофильтрами; Φ — фотоэлемент; U — усилитель; OP — катодный вольтметр и осциллограф; B — тигель; M — поверхность металла; H — индуктор высокочастотной печи.

Очевидно, что от поверхности ванны на фотоэлемент будет падать суммарный поток радиации

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_c + \Phi_{\text{от}M} \rho_M^2 \sin \omega_0 t,$$

где Φ_c — поток самостоятельного излучения ванны;

ρ_M — коэффициент отражения поверхности металлической ванны.

С помощью частотной селекции полностью исключается действие потока Φ_c , точнее, пропорционального ему напряжения на выходе фотоэлемента U_{m_c} на электронную схему усилителя, настроенного на частоту ω_0 .

На выходе настроенного на частоту модуляции усилителя U мы будем получать переменное напряжение с амплитудой, пропорциональной интенсивности потока радиации, отраженной от поверхности ванны

$$U_0 = U_{nm} \rho_M \rho_s^2 \sin \omega t.$$

Зная спектральные коэффициенты отражения примененных зеркал ρ_s по отношению двух измеренных напряжений при одном и том же свето-

фильтре, можно определить величину коэффициента отражения ρ_M . Следовательно, на основании закона Кирхгофа будет известен искомый коэффициент лучеиспускающей способности поверхности ванны расплавленного металла $\epsilon_d = 1 - \rho_M$.

Естественно, что логометрический принцип измерения при малых интервалах времени между измерениями падающей и отраженной радиации позволяет исключить влияние нестабильности источника излучения, в данном случае температурной лампы T_L , приемника лучистой энергии (фотоэлемента Φ) * и коэффициент усиления усилителя U .

Основными методическими особенностями рефлектометрии жидкого металла являются возможность колебаний поверхности зеркала и наличие мениска.

Исключение влияния колебаний металлической поверхности в описываемой установке было достигнуто за счет конструкции, позволившей амортизировать тигель с металлом от внешних толчков и сотрясений. Основой этой конструкции являются две массивные стальные плиты, из которых нижняя покоится на массивных кронштейнах, цементированных в капитальной стене **. По углам нижней плиты установлены теннисные мячи, на которых располагается основная верхняя плита. К последней крепится вакуумная печь с кварцевым водоохлаждаемым стаканом (см. ниже). За счет индукционного нагрева вся установка механически больше ни с чем не связана.

Плавки проводились с помощью высокочастотной индукционной печи (частота ~ 500 кГц) мощностью 15 кВт. Диаметр тигля выбирался из условия мощности, необходимой для расплавления, и минимальной величины мениска. В основном работа производилась в тиглях диаметром 60 мм.

Для точной наводки рефлектометра на поверхность металла применялось специальное оптическое устройство. Модулированный пучок света диаметром 1 мм падал на поверхность металла под углом 15° . Температура источника излучения T_L поддерживалась строго постоянной по потенциометру.

Как уже указывалось, электрическое отделение переменной составляющей измеряемого напряжения от постоянной составляющей за счет излучения поверхности ванны осуществлялось уже на выходе фотоэлемента. В качестве последнего для видимой области спектра использовался вакуумный фотоэлемент с сурьмяно-цезиевым катодом типа СЦВ-3. Для близкой инфракрасной области спектра применен германиевый фотодиод ФД-2. Линейность световой характеристики фотоэлементов при наличии перегрузки потоком постоянной радиации предварительно проверялась с помощью постоянной «засветки» катода потоком излучения интенсивностью, превосходящей интенсивность от потока излучения ванны. Значения коэффициентов отражения вычислялись как по показаниям стрелочного прибора (катодного вольтметра), так и по соответствующим осциллограммам. Для удобства применялось значительное (до 25 ÷ 30 крат) увеличение осциллограммы на спектропроекторе.

Для иллюстрации на рис. 2 приведены осциллограммы лучей, отраженных от зеркал рефлектометра, соответственно в синей и красной областях спектра. Осциллограммы лучей, отраженных в тех же участках спектра от ртути, приведены на рис. 3. Осциллограммы при отражении

* В отношении нестабильности спектральной характеристики фотоэлемента высказанное положение не вполне точно, ибо уход спектральной характеристики в данном случае должен несколько влиять на величину результирующей эффективной длины волны монохроматизирующей системы фотоэлемент + светофильтр. Для исключения этой нестабильности фотоэлемент в данной установке термостатируется.

** Помещение расположено на 4-м этаже.



Рис. 2. Осциллограмма лучей, отраженных от зеркала рефлектомера, в синей и красной областях спектра.

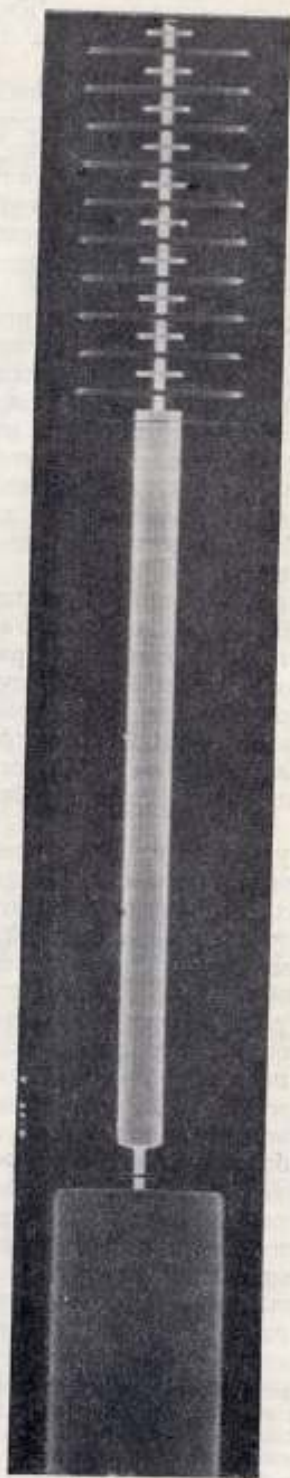


Рис. 3. Осциллограмма лучей, отраженных от ртути, в синей и красной областях спектра.

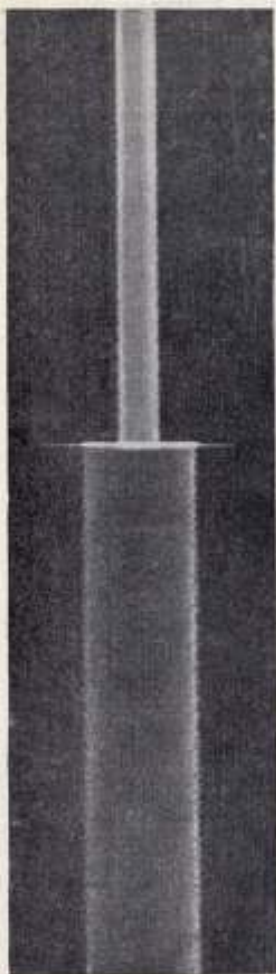


Рис. 4. Осциллограмма лучей, отраженных от расплавленного Ni, в синей и красной областях спектра.



Рис. 5. Осциллограмма лучей, отраженных при движении светофильтра, в синей и красной областях спектра.



Рис. 6. Осциллограмма отраженного потока излучения в красной и синей областях спектра, снятая при движении светофильтра.

от расплавленного Ni в синей и красной областях спектра приведены на рис. 4. На рис. 5 приведены осциллограммы отражения при движущихся светофильтрах.

Измерения коэффициента отражения на модуляционном рефлектометре были выполнены в видимой и близкой к инфракрасной области спектра для ряда металлов и сплавов. Результаты этих измерений приведены в другой работе одного из авторов * и находятся в хорошем согласии с имеющимися литературными данными.

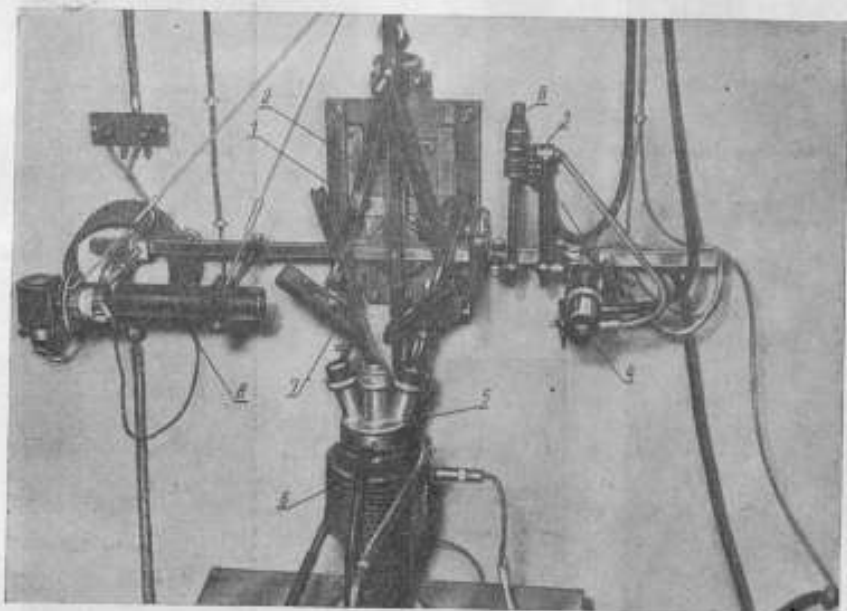


Рис. 7. Рефлектометрическая установка.

1 — рама рефлектометра; 2 — суппорт вертикального и горизонтального перемещения; 3 — термостат с фотодиодом и кассетой светофильтров; 4 — термостат с фотоэлементом СИВ-3 и кассетой со светофильтрами; 5 — водоохлаждаемая крышка; 6 — индуктор высокочастотного генератора; 7 — зеркало; 8 — источник модулированного излучения.

Исследования на модуляционном рефлектометре расплавленного металла, покрытого окисной пленкой, позволили измерять лучеиспускающую способность последней в динамике ее образования и роста.

Вследствие сравнительно малой величины отражательной способности, обнаруженной у исследуемых пленок ($\rho_\lambda < 20\%$), модуляционный рефлектометр позволяет определять ϵ_λ с достаточно высокой точностью.

Осциллограмма отраженного потока излучения в красной и синей областях спектра для поверхности чугуна, который покрыт нарастающей окисной пленкой, снятая при движущихся светофильтрах, приведена на рис. 6.

На основании обработки большого числа осциллограмм установлено, что с ростом пленки чернота излучения возрастает в красной и синей областях спектра. В этих областях отношение ϵ_λ мало отличается от единицы, т. е. излучение пленки близко к «серому». Последнее подтверждается также данными цветовой пирометрии.

* Д. Я. Свет, Проблемы современной металлургии. Изд-во АН СССР, 1958, стр. 235.

Таким образом, модуляционный рефлектометр позволяет решить задачу измерения истинной температуры по излучению поверхности с неизвестной и изменяющейся в процессе измерения чернотой излучения.

Узлы рефлектометра базируются на общей раме 1 (рис. 7), которая при помощи шарнирного соединения крепится на суппорте 2, укрепленном на капитальной стене. Суппорт дает возможность перемещать раму рефлектометра в вертикальной и горизонтальной плоскостях относительно поверхности жидкого металла.

Для проведения эксперимента необходимо обеспечить зеркальную поверхность жидкого металла и максимально уменьшить ее колебания. Плавка может производиться в инертной атмосфере (например, аргона*) и под вакуумом.

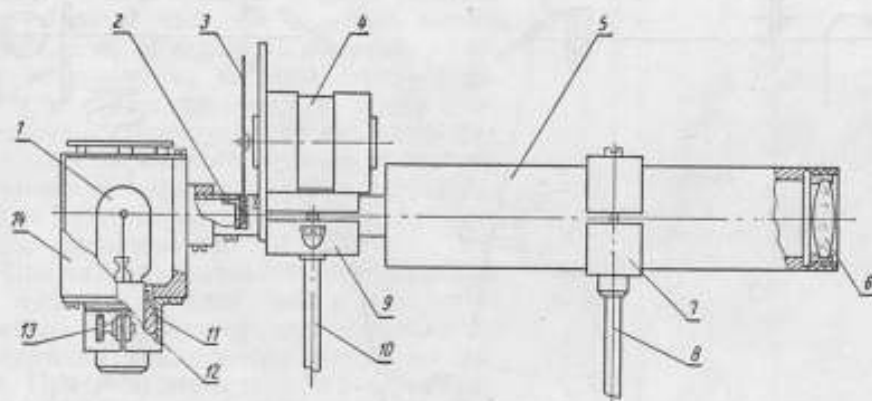


Рис. 8. Источник модулирования излучения.

Тигель с жидким металлом помещается на подставке в кварцевом водоохлаждаемом стакане, который закрывается крышкой, имеющей три смотровых окна и также охлаждаемой водой. Кварцевый стакан установлен на верхней плите. Снизу к этой же плите подвешен механизм подъема на нужную высоту тигля с жидким металлом.

Верхняя плита лежит на амортизаторах на нижней плите, которая в свою очередь покинется на кронштейне, укрепленном в капитальной стене. Такая конструкция амортизирующего устройства изолирует тигель с жидким металлом от внешних сотрясений и толчков и обеспечивает спокойную поверхность металла.

Общий вид источника модулированного излучения показан на рис. 8.

Излучателем является точечная лампа 1 типа СЦ-61, закрепленная в специальном патроне 11, перемещающемся по вертикали и меняющем угол наклона. Это дает возможность установить нить лампы 1 точно по оптической оси модуляционного устройства. Патрон 11 помещается в гнезде 12, которое имеет стопорный винт 13, позволяющий фиксировать патрон с лампой в нужном положении. Лампа питается постоянным током от аккумуляторов; накал ее устанавливается с помощью реостата и контролируется потенциометром типа ПП. Для предотвращения попадания постороннего света лампа закрывается металлическим кожухом 14, имеющим отверстия для естественного конвективного охлаждения.

* Аргон предварительно очищается путем продувки через раскаленный губчатый титан.

К корпусу источника модулированного излучения 5 осветитель с лампой крепится при помощи соединительного кольца со стопорными винтами.

Луч света от лампы 1 проходит через кадровое окно 2 (круглая металлическая диафрагма с отверстием 4 мм, перемещающаяся вдоль оптической оси). Диск модулятора 3, закрепленный на оси синхронного мотора 4 типа ТЭ-45, имеет 20 отверстий диаметром 4,3 мм, равномерно расположенных по окружности. Промежутки между отверстиями точно равны диаметру отверстий. Центры отверстий диска 3 совпадают с оптической осью источника модулированного излучения.

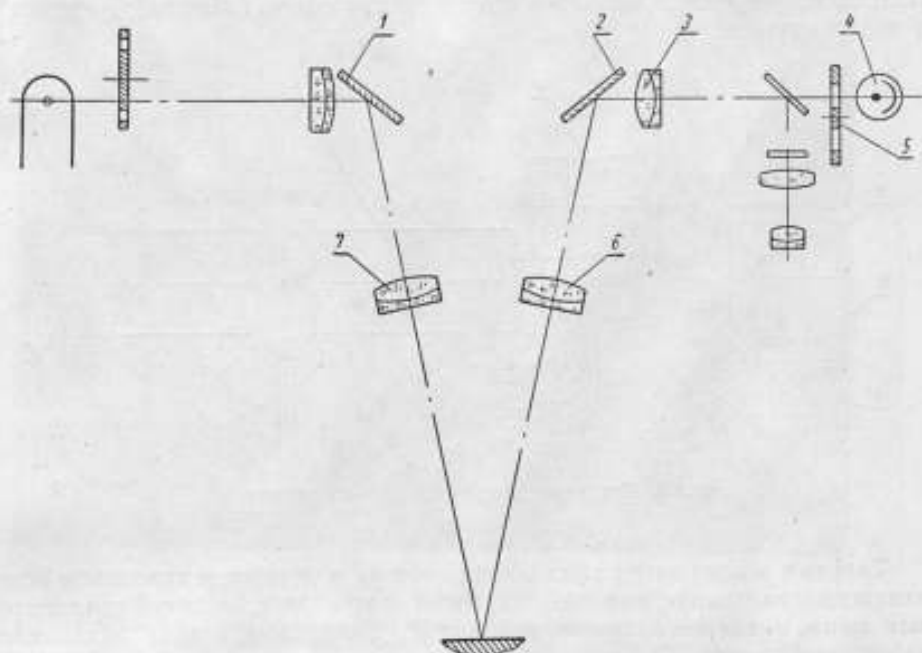


Рис. 9. Принципиальная оптическая схема хода луча.

К корпусу 5 мотор 4 крепится при помощи хомута 9. Последний одновременно служит для сочленения источника модулированного излучения с рамой рефлектометра при помощи стойки 10. Для этой же цели служат хомут 7 и стойка 8.

Параллельный пучок модулированного света выходит из объектива 6 (перемещающегося вдоль оптической оси) и попадает на плоское зеркало 4. Ход луча показан на принципиальной оптической схеме (рис. 9). Линза 7 фокусирует параллельный пучок, отраженный от зеркала 1 на поверхности ванны жидкого металла в виде светового пятна, имеющего в поперечнике около 1 мм.

Линза 6, симметричная линзе 7, работает так, что расходящийся пучок, отраженный от поверхности жидкого металла, в виде параллельного пучка попадает на плоское зеркало 2 и отражается от него на линзу 3. Последняя фокусирует изображение нити накала лампы, отраженное от поверхности ванны жидкого металла, на матовом стекле визира.

Перед фотоэлементом 4 установлена кассета 5 в виде диска со сменными светофильтрами. Фотоэлемент 4 помещен в термостат, представляющий собой полый цилиндр с рубашкой, в которой циркулирует вода

постоянной температуры. Постоянство температуры фотоэлемента может поддерживаться с большой точностью. Термостат укреплен на металлическом цилиндре, являющемся экраном для собранного в нем каскада усилителя с катодным повторителем на лампе 6Н1П.

Визир необходим для того, чтобы установить поверхность жидкого металла в нужном положении по высоте. Матовое стекло визира имеет перекрестие, в центре которого сфокусировано изображение нити лампы, отраженной от поверхности ванны жидкого металла. Визир отъюстирован таким образом, что при заданной высоте поверхности металла изображение нити накала лампы на матовом стекле находится в центре перекрестия. Визир обеспечивает достаточную точность установки поверхности жидкого металла по высоте. Применение визира дает возможность всегда работать на одной и той же части катода фотоэлемента.

При снятии показаний по отражению от жидкого металла визир убирается. Прибор градуируется непосредственным измерением «падающего» потока излучения. При этом зеркала 1 и 2 передвижением в кассетах убираются, и «прямой» луч после объектива в виде параллельного пучка попадает на линзу 3. Пройдя через светофильтр, закрепленный в специальную кассету, луч через окно термостата попадает на катод фотоэлемента. Возможность градуировки прибора в процессе снятия показаний по отражению от поверхности жидкого металла исключает возможную ошибку.

Механизм подъема тигля с жидким металлом в вакууме показан на рис. 10. Вращением штурвала 11 при помощи винтовой пары (винт 10 и гайка 9) сообщается поступательное движение по штоку 6. Верхний конец винта 10 упирается в шайбу 8, которая имеет фигурную прорезь для сцепления с головкой винта 10.

Сильфон 7 припаян к цилиндру 5 и (нижним своим концом) к шайбе 8, имеющей с внутренней стороны резьбовую шпильку для соединения со штоком 6, в верхней части которого закреплен столик 2. На столик ставится подставка из кварцевой трубки, на которой устанавливается тигель с металлом. Сальник 4 служит для соединения системы с вакуумным насосом. Корпус вакуумного устройства 3 крепится на стальной плите с помощью фланца 1. Стальная плита устанавливается на амортизаторах. Методически измерения на описанной выше рефлектометриче-

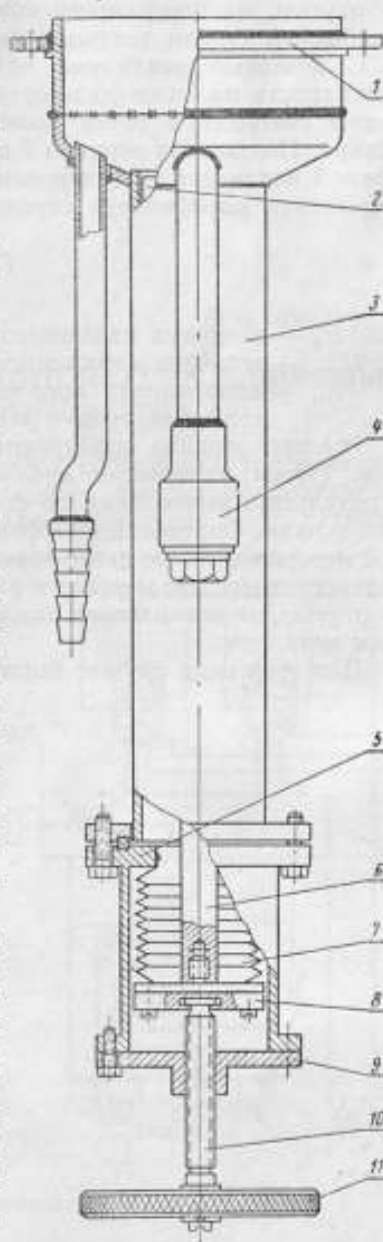


Рис. 10. Механизм подъема тигля с жидким металлом в вакууме.

ской установке (рис. 7) производится следующим образом. Вначале определяется коэффициент отражения зеркал 7. Для этого вместо тигля с металлом на подставке в кварцевом стакане устанавливается чашечка со ртутью, на поверхности которой плавает алюминированное зеркало. Кварцевый стакан закрывается крышкой 5.

С помощью механизма подъема тигля устанавливаем зеркальную поверхность на нужную высоту по визиру *B*, добиваясь, чтобы изображение светящейся точки было в перекрестии нитей матового стекла визира. Передвигая зеркало 7 в кассетах в верхнее положение, измеряем прямой падающий модулированный поток. Зная падающий поток, легко определить коэффициент отражения зеркала по формуле

$$\rho_z^3 = \frac{U_{отр}}{U_n K_n}, \quad (1)$$

где U_n — величина падающего потока;

$U_{отр}$ — величина отраженного потока от поверхности зеркала;

K_n — коэффициент поглощения модулированного потока при прохождении сред с разной оптической плотностью.

Все три зеркала подбираются с одинаковым коэффициентом отражения. Путем извлечения кубического корня из величины, полученной в результате вычисления по формуле (1), получим коэффициент отражения зеркал. Определив коэффициент отражения зеркал по вышеизложенной методике, можно легко определить коэффициент отражения ρ_M любого интересующего нас металла в расплавленном состоянии, заменив чашечку со ртутью, на поверхности которой плавает зеркало, на тигель с исследуемым металлом.

Для этой цели служит формула

$$\rho_M = \frac{U_{отр}}{U_n K_n \rho_z^3}.$$

Н. И. БРЬКУШИН

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОГО ЧУГУНА С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНЫХ ФОТОПИРОМЕТРОВ

В большинстве литейных цехов заводов соблюдение температурных условий разливки служит одним из факторов получения качественных отливок изделий и предотвращения брака. Вследствие этого технологи

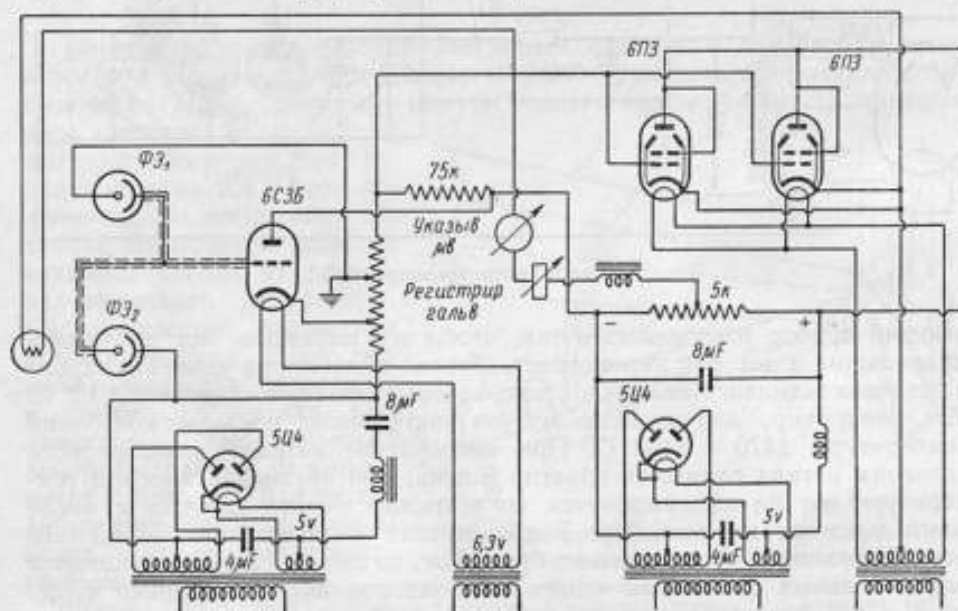


Рис. 1. Схема фотопирометра.

требуют разработки надежного способа контроля температуры расплавленного чугуна в раздаточном и разливочных ковшах.

В данной статье сообщается об опыте полуавтоматического измерения температур жидкого чугуна в течение 10 лет с помощью фотопирометров. На рис. 1 дана схема фотопирометра на отечественных лампах. Эти пирометры применяются для измерения температур в раздаточных ковшах (ковкий чугун) и в разливочных ковшах (блок цилиндров).

Измерения производятся визированием прибора непосредственно на зеркало металлов в ковше. Перед измерением поверхность металла, как правило, очищается от шлака и окислов, однако это удается не полностью, вследствие чего при измерении телескоп пирометра визируется на чистые участки зеркала. Телескопы смонтированы на шарнирах и установлены на специальных стойках около места измерения. Фотопирометр имеет два измерительных прибора — регистрирующий и показывающий. Регистрирующий прибор устанавливается в специальном шкафу около места измерения или монтируется в пирометрическом пульте, а показы-

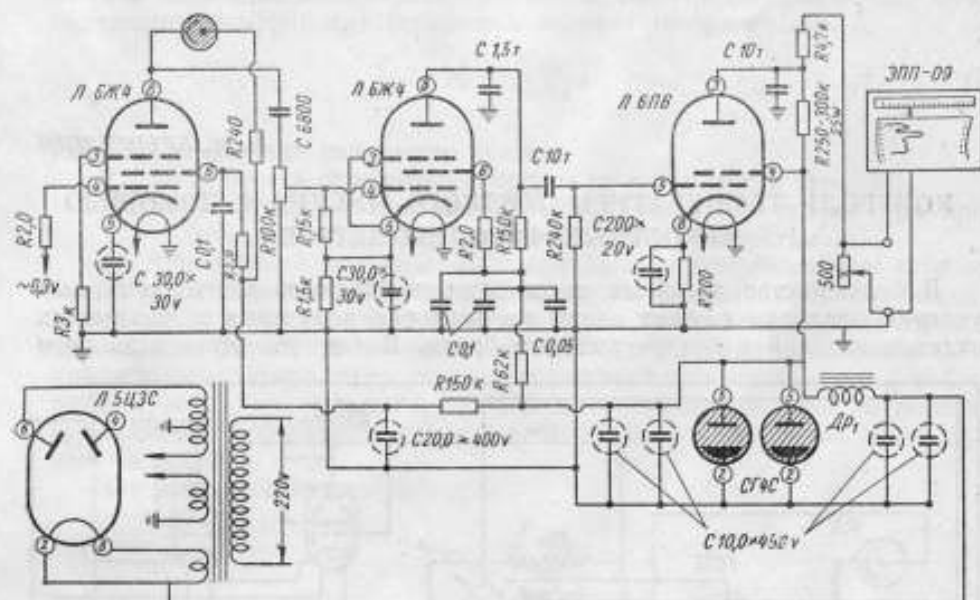


Рис. 2. Схема фотопирометра ФП-1.

вающий прибор располагается так, чтобы его показания мог наблюдать плавильщик и цеховой пирометрист. Металл выдается на конвейер строго в пределах технологического допуска, который обычно составляет $\pm 10^\circ \text{C}$. Так, например, для ковкого чугуна допустимые пределы колебания температуры $1470 \div 1490^\circ \text{C}$. При температуре металла ниже первого значения металл сливается обратно в печь; при чрезмерно высокой температуре металл выдерживается до технологического допуска и после этого выдается на конвейер. Такая строгая выдержка температурного режима разливки предотвращает брак. Так, на заливке блоков цилиндров автомобильных двигателей одним из факторов снижения брака с 22 до $4 \div 8\%$ послужило введение строгого соблюдения температуры разливки металла.

Показания фотопирометра поверяются с помощью платинородий-платиновой термопары кратковременного погружения. Изменение показаний при температурах $1400 \div 1500^\circ \text{C}$ обычно не превышает $\pm 10^\circ \text{C}$, что составляет $0,6 \div 0,7\%$.

В процессе дальнейшего совершенствования контроля температуры жидкого металла было испытано еще три схемы яркостных фотопирометров, которые показали удовлетворительные результаты. На рис. 2 приведена схема фотопирометра ФП-1. Схема выполнена на трех лампах. Испытание схемы показало высокую чувствительность и достаточную

устойчивость в работе. Колебания напряжения в сети в пределах $20 \pm 25\%$ не отражаются на показаниях пирометра.

Прибор установлен на высокочастотной печи и в течение 12 месяцев обеспечивает контроль температуры жидкого чугуна. Головка пирометра смонтирована на кронштейне, который позволяет устанавливать ее в положение измерения или отводить в сторону.

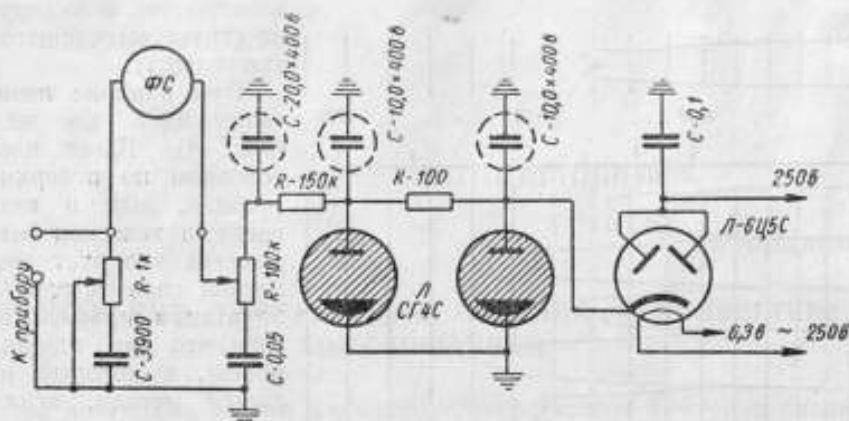


Рис. 3. Схема фотопирометра ФПБ-2.

Измерения производятся в следующем порядке: после расплавления металла с его поверхности счищается шлак и включается питание фотопирометра. Через три-четыре минуты головка пирометра устанавливается над центром ванны. Если температура низка, то головка оставляется в этом положении. По достижении заданной температуры подается звуковой сигнал от звонка, подключенного к прибору. Сигнал означает, что металл готов к выпуску. После сигнала головка рукой отводится в сторону, и металл разливается. Периодический контроль работы фотопирометра с помощью платинородий-платиновой термопары показал, что его погрешность не превышает 0,6%.

Шкала пирометра градуировалась по платинородий-платиновой термопаре в интервале температур $1400 \pm 1600^\circ\text{C}$. Прибор экономически выгоден и дает гарантию выпуска металла в строго определенных температурных интервалах.

На рис. 3 приведена схема ФПБ-2. Хотя схема проста и содержит меньше деталей чем предыдущая, работает она достаточно надежно. Колебания напряжения сети в пределах $180 \pm 240\text{В}$ не влияют на показания пирометра.

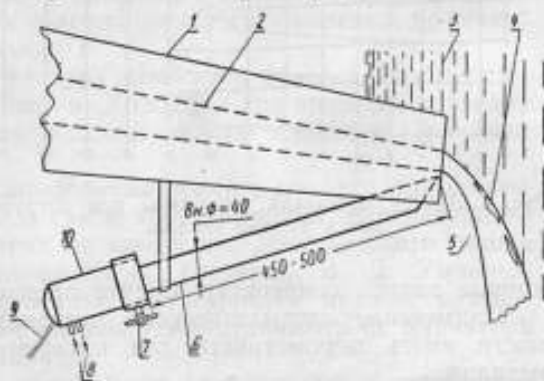


Рис. 4. Автоматический контроль и регистрация температуры выпускаемого металла фотопирометрами.

1 — желоб; 2 — жидкий металл; 3 — дым и газы; 4 — шлак; 5 — чистый металл; 6 — визирная трубка пирометра; 7 — зажим для крепления головки пирометра; 8 — штуцеры водяного охлаждения; 9 — провода от фотосопротивления; 10 — головка пирометра в корпусе водяного охлаждения.

Собранная схема свободно помещается в корпусе электронного потенциометра ЭПП-09.

Шкала градуируется непосредственно по жидкому металлу путем сравнения с платинородий-платиновой термопарой. Пирометр применяется для автоматического контроля и регистрации температуры выпускаемого металла. Телескоп фотопирометра устанавливается снизу желоба электропечи и визируется на струю выходящего металла снизу.

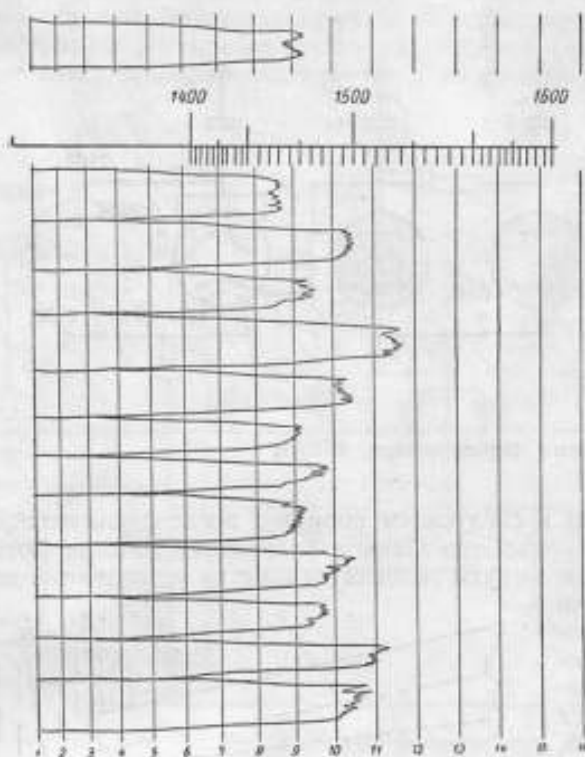


Рис. 5. Запись показаний термопары при погружении в жидкий металл.

На рис. 5 приведены кривые записи температур. Отсчет производится по максимуму кривой.

Применение автоматического пирометра освобождает от необходимости иметь пирометриста для измерения температуры выпускаемого металла.

Способ автоматического измерения может быть применен на электропечах, вагранках и т. п. Для крепления телескопа разработан специальный кронштейн, позволяющий перемещать головку во всех направлениях. Лабораторией сконструирован также фотопирометр, помещающийся в корпусе милливольтметра МПЩПр-54 или МРЩПр-54. Эти пирометры применяются для контроля и регулирования температур при нагреве на машинах ТВЧ. Эксплуатация приборов показала, что они вполне обеспечивают требования технологов, просты в изготовлении, дешевы в эксплуатации и надежны в работе.

Н. Т. БОНДАРЕВ

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В КОНВЕРТЕРЕ ПО ХОДУ ПРОДУВКИ

Статья посвящена работе в области температурного контроля плавки в бессемеровском конвертере*.

Проф. И. А. Андреев в своей статье (стр. 5 настоящего сборника) уже обосновал значение измерений температуры при выплавке стали в мартеновских печах. Для получения качественной стали в конвертере также необходимо на всех стадиях процесса продувки обеспечивать некоторые оптимальные значения температуры. При слишком горячем ходе плавки нарушается нормальный процесс раскисления металла. В результате получается металл с повышенным содержанием закиси железа и кремния, с повышенной газонасыщенностью.

Кроме того, повышенная температура плавки понижает стойкость футеровки конвертера, ковшей и изложниц. Холодный ход процесса приводит к сильным выбросам, насыщению металла закисью железа и серьезным дефектам в слитках.

С другой стороны, точность определения момента повалки конвертера при заданном содержании углерода также требует знания температурного хода плавки. Длительная проверка на заводе им. Дзержинского метода останова продувки, предложенного К. С. Гаргером, В. Д. Уминовым и др. [1], показала, что при холодных плавках характер кривых красно-синего отношения для излучения факела резко отличается от характера этих кривых при горячих плавках.

В результате установленные при помощи этих кривых и пирометрических измерений моменты повалки оказываются искаженными. Очевидно всякий косвенный метод определения содержания углерода в металле по ходу плавки будет связан с ее температурным ходом.

Рассмотрение предпринимавшихся до сих пор попыток измерения температуры в конвертерах по ходу продувки [2] показывает, что при помощи оптических и радиационных пирометров, размещаемых над пламенем, в существующих или специально оборудованных фурмах не было получено удовлетворительных результатов. Применение контактных методов, т. е. погружение в конвертер термомпар, тем более затруднительно. Наи-

* Работа проводилась под руководством канд. физ.-мат. наук К. С. Гаргера при участии инж. Д. П. Ульянова, Б. В. Ляудиса и Б. А. Вовк.

более доступным оказался предложенный в иностранной литературе [2] метод измерения при помощи вводимой в горловину конвертера водоохлаждаемой трубы, внутри которой помещаются радиационные или оптические приемники излучения. Немецкие исследователи считают при этом, что излучение внутри реторты конвертера может быть принято абсолютно черным, и поэтому приборы, проградуированные в яркостных темпера-

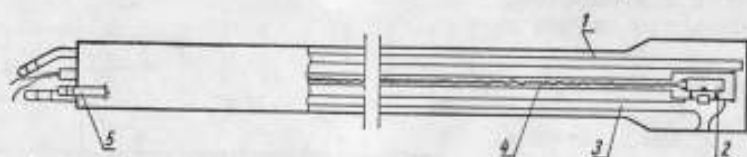


Рис. 1. Пирометрическая установка.

1 — возврат охлаждающей воды; 2 — приемник излучения; 3 — труба для подачи сжатого воздуха; 4 — проводники; 5 — подача охлаждающей воды.

турах, будут давать истинные значения температуры металла. Такое допущение, однако, требует обоснования, которое скорее всего может быть получено экспериментальным путем.

На заводе было изготовлено и испытано несколько моделей пирометрической установки (рис. 1), представляющей собой во всех случаях длин-

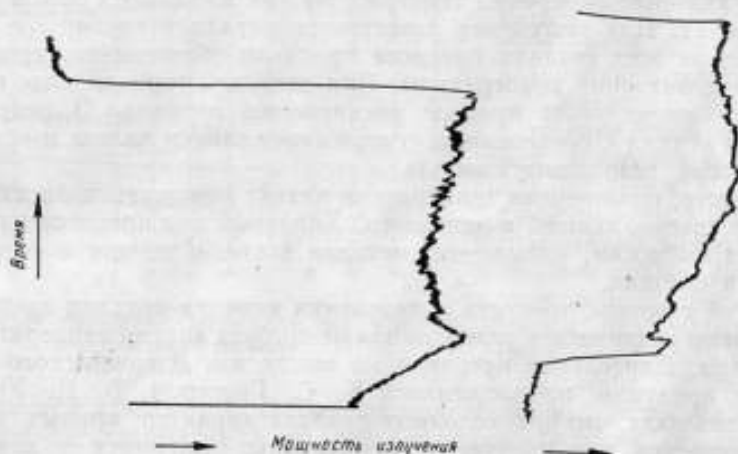


Рис. 2. Кривые, записанные потенциометром ЭПП-09.

ную водоохлаждаемую трубу, внутри которой можно размещать различные приемники излучения (радиационный пирометр, фотоэлемент). Труба вводится по роликам в горловину конвертера в начале продувки так, что приемное отверстие в ней находится ниже зоны пламени. Через отверстие продувается сжатый воздух под давлением около $4 \div 5$ атм, отбрасывающий вылетающие из конвертера твердые частицы металла и шлака. Испытания проводились в бессемеровском цехе завода им. Дзержинского на 25-тонном конвертере с донной продувкой воздухом.

На рис. 2 представлены кривые, записанные во время испытаний потенциометром ЭПП-09 от термобатарейки радиационного пирометра РП и от фотоэлемента с зеленым фильтром.

Для решения вопроса о градуировке приемников необходимо изучить характер излучения металла в конвертере. В первом приближении это можно сделать путем сравнения кривых яркостной и цветовой температур. Поскольку для железа в измеряемом диапазоне температур цветовая температура достаточно близка к истинной (причем несколько выше истинной [3]), такое сравнение могло бы дать весьма ценные сведения о характере излучения металла из полости конвертера. Однако пока такое сравнение произведено не было из-за отсутствия цветового пирометра. На первом же этапе была осуществлена регистрация температурного хода процесса. Это приводит к улучшению технологии и методов контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаргер К. С., Уминов В. Д. и др., «Сталь» № 10, 1955.
2. Weber F., Koch W. и др., «St. u. Eis.» т. 75, Н9, 1955, S 549.
3. Грузин Г. В., Контроль температуры жидких железных сплавов, Metallurgizdat, 1955.

В. В. БАБУШКИН

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВОЙ СТРУИ ПРИ БОЛЬШИХ ДАВЛЕНИЯХ

Настоящая работа посвящена вопросам экспериментального определения температуры газов, находящихся в закрытом объеме при высоком давлении, температуры открытой газовой струи и температуры поверхности твердого тела, отделенного от приемника излучения слоем светящегося газа.

В каждом из трех вышеупомянутых случаев характерные условия опыта определяют требования к методу измерения и измерительной аппаратуре. Так, при измерении температуры светящихся газов в манометрической бомбе при горении твердого топлива высокая скорость протекания процесса вызывает необходимость создания аппаратуры с частотой регистрации импульсов до 20 кгц. Кроме того, размещение датчика на такой установке требует устойчивости его против вибраций и действия высоких давлений, возникающих в бомбе.

Однако то обстоятельство, что температура газов в этом случае может считаться постоянной по всему диаметру камеры (за исключением весьма тонкого пограничного слоя вблизи стенки), позволяет упростить датчик конструктивно, не предназначая его для измерения локальной температуры.

Для измерения температуры высокоскоростного газового потока, наоборот, требуется создание аппаратуры, позволяющей измерять температуру в различных, заранее определенных точках факела, иногда при сравнительно низкой частоте регистрации.

Измерение температуры поверхности тела, помещенного в горячий газовый поток, представляет собой задачу особого рода, связанную с быстрым разрушением модели при высоких температурах и, следовательно, с разрушением контактного датчика (например, термопары), установленного непосредственно на модели; применение же оптических способов измерения усложняется наличием светящегося полупрозрачного или непрозрачного газового слоя, закрывающего объект измерения от наблюдателя.

Для всех трех случаев был выбран метод измерения цветовых температур, или метод так называемого красно-синего отношения. Методика измерения температуры газов, находящихся в закрытом объеме при высоких давлениях, разработана под руководством и при участии канд. техн. наук А. С. Чашихина.

Цветовой метод измерения температур

Как известно, истинная температура тела T определяется по его цветовой температуре из соотношения:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_n} + \left[\left(\ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) : c_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \right].$$

Здесь ε_1 и ε_2 — коэффициенты черноты излучения тела при λ_1 и λ_2 соответственно.

Опыты показывают, что излучение пламени, образующегося при сжигании топлив в закрытом объеме, и излучение продуктов горения имеют в видимой области весьма плотный непрерывный спектр [1], [2], [3]. Более того, для некоторых областей видимого спектра такие пламена имеют не меняющийся с длиной волны коэффициент черноты излучения. В последнем случае, так как $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, цветовая температура источника излучения равна его истинной температуре ($T = T_n$). Это основное условие и определяет выбор рассматриваемого метода для измерения температуры пламени без непосредственного определения абсолютного значения его излучательной способности.

Как известно, это условие справедливо и в случае применения достаточно широкополосного фильтра, если в этой области излучение источника продолжает оставаться серым. Тогда сигнал, полученный от приемника излучения, может быть определен как

$$I = m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \gamma_{\lambda} \varepsilon_{\lambda T} E_{\lambda T}^* d\lambda = M \varepsilon_T e^{-\frac{c_2}{\lambda_{cp} T}}.$$

Здесь m — коэффициент усиления аппаратуры;
 γ_{λ} — спектральная чувствительность приемника излучения (фотоэлемента или фотоэлемента в комбинации с фильтром);
 $\varepsilon_{\lambda T}$ — излучательная способность пламени;
 ε_T — средняя интегральная излучательная способность пламени в диапазоне $\lambda_1 \div \lambda_2$;
 $E_{\lambda T}^*$ — энергия излучения черного тела, находящегося при температуре пламени;
 λ_{cp} — среднее значение длины волны, зависящее от чувствительности фотоэлемента на участке спектра от λ_1 до λ_2 ;

$$M = m c_1 \bar{\gamma} \left(\frac{\lambda}{\lambda_1^4} - \frac{1}{\lambda_2^4} \right);$$

c_1 — постоянная в формуле Вина;

$\bar{\gamma}$ — средняя интегральная чувствительность фотоэлемента в диапазоне $\lambda_1 \div \lambda_2$.

Отношение сигналов, которые получены от двух приемников излучения, чувствительных в диапазонах длин волн $\lambda_1 \div \lambda_2$ и $\lambda_3 \div \lambda_4$, может быть записано следующим образом:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{M_1}{M_2} \frac{\varepsilon_{1T}}{\varepsilon_{2T}} \cdot \frac{e^{-\frac{c_2}{\lambda_{cp1} T}}}{e^{-\frac{c_2}{\lambda_{cp2} T}}}.$$

При $\bar{\epsilon}_{1T} = \bar{\epsilon}_{2T}$ и $\frac{M_1}{M_2} = \text{const}$ получается обычная линейная зависимость

$$\ln \frac{I_1}{I_2} = A \frac{1}{T} + B,$$

где коэффициенты A и B определяют положение градуировочной прямой пирометра в системе координат

$$\ln \frac{I_1}{I_2} = f\left(\frac{1}{T}\right).$$

Очевидно, что условие $\frac{M_1}{M_2} = \text{const}$ может быть выполнено, если световые характеристики фотоэлементов и амплитудные характеристики усилителей линейны.

Измерение температуры поверхности серых тел, находящихся за слоем излучающего газа

В целом ряде случаев представляет интерес измерение температуры поверхности стенки, обтекаемой нагретым газом.

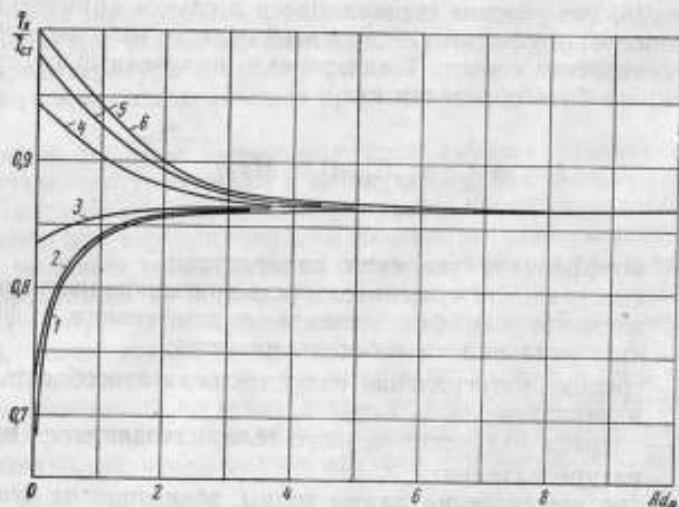


Рис. 1. Кривые «видимых» яркостных температур системы стенка — пламя; $T_{\text{ст}} = 3000^\circ \text{K}$, $T_{\text{пл}} = 2600^\circ \text{K}$.

1 — $\epsilon = 0$; 2 — $\epsilon = 0.01$; 3 — $\epsilon = 0.1$; 4 — $\epsilon = 0.5$; 5 — $\epsilon = 0.8$; 6 — $\epsilon = 1.0$.

Если интенсивность излучения стенки (ее яркость) выше интенсивности излучения пламени, а пламя, в свою очередь, является достаточно прозрачным для того, чтобы «видеть» стенку, — эти измерения могут быть произведены оптическим путем через слой пламени.

Однако наличие слоя светящегося полупрозрачного газа, отделяющего приемник излучения от объекта исследования, вносит существенные искажения в измерения, если для этого применяется обычный яркостный или цветовой пирометр.

Для примера на рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов «видимой» яркостной (рис. 1) и «видимой» цветовой (рис. 2) температур, регистрируемых пирометром, наведенным на плоскую стенку, имеющую температуру $T_{\text{ст}} = 3000^\circ \text{K}$ с различной излучательной способностью, через слой полу-

прозрачного светящегося газа, имеющего температуру $T_{пл} = 2600^\circ \text{К}$ в зависимости от его толщины и удельного коэффициента поглощения. Расчет сделан в предположении, что пламя имеет постоянную температуру и постоянное распределение излучающей примеси по толщине.

В случае использования яркостного метода удельный коэффициент поглощения A [4] принимался равным 0,8 при $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$; в случае применения цветного метода $A_1 = 0,8$ при $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ и $A_2 = 0,5$ при $\lambda_2 = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.

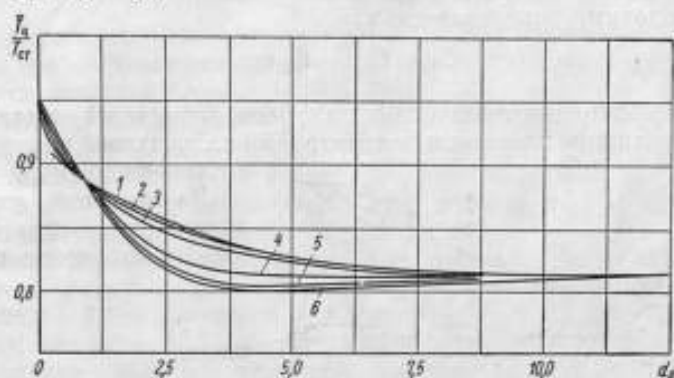


Рис. 2. Кривые «видимых» цветовых температур системы стенка — пламя; $T_{cr} = 3000^\circ \text{К}$, $T_{пл} = 2600^\circ \text{К}$.

1 — $k = 0$; 2 — $k = 0,01$; 3 — $k = 0,1$; 4 — $k = 0,5$; 5 — $k = 0,8$; 6 — $k = 1,0$.

Излучение стенки принимается серым, а поглощение пламени — остающимся либо постоянным по длине волны ($A_1 = A_2$), либо переменным ($A_1 \neq A_2$).

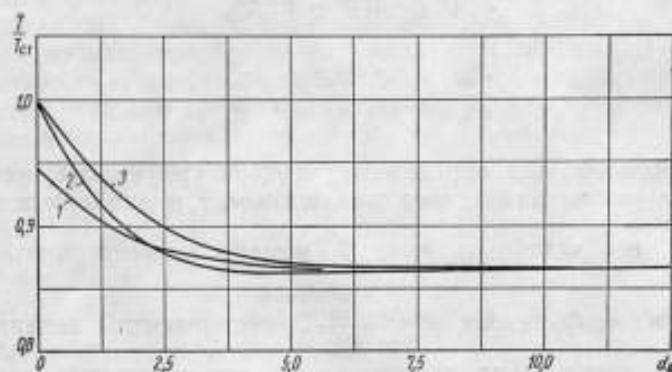


Рис. 3. Кривые «видимых» температур при трех значениях коэффициента поглощения пламени (A); $T_{cr} = 3000^\circ \text{К}$, $T_{пл} = 2600^\circ \text{К}$.

1 — яркостный метод, $A = 0,8$; 2 — цветовой метод, $A_1 = 0,8$, $A_2 = 0,8$; 3 — цветовой метод, $A = A_1 = A_2 = 0,8$.

На рис. 3 приведены графики сравнения трех указанных случаев. Из графиков видно, что ни яркостный, ни цветовой методы не могут дать надежных результатов при наличии перед стенкой светящегося слоя пламени.

В некоторых случаях такие измерения оказывается возможным производить методом компенсации, разработанным автором совместно с инж. А. Д. Ивановым. Суть его заключается в том, что излучение слоя

пламени, попадающего в объектив пирометра вместе с излучением стенки, компенсируется излучением свободного участка этого пламени, попадающим в объектив второго пирометра, имеющего ту же чувствительность и соединенного с первым по дифференциальной схеме.

Взаимное расположение пирометров и объекта изображено на рис. 4.

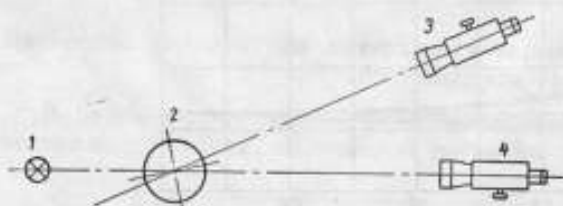
В объектив основной головки попадает излучение пламени и прошедшее сквозь пламя излучение стенки, температуру которой необходимо определить. Общая интенсивность излучения, попадающего в объектив основной головки, определяется как

$$E_1 = E_{пл} + E_{ст} \tau_{пл},$$

где $\tau_{пл}$ — коэффициент пропускания пламени, зависящий от длины волны излучения, толщины пламени и концентрации излучающей примеси (сажи) в пламени.

В объектив второй головки пирометра попадает только излучение пламени

$$E_2 = E_{пл},$$



тогда

$$E_1 - E_2 = E_{ст} \tau_{пл}.$$

Рис. 4. Расположение приборов при измерении температуры пламени по схеме компенсации.

1 — лампа; 2 — пламя; 3 — компенсирующая головка; 4 — основная головка лучеприемника.

Для цветового метода эти же соотношения переписываются для двух длин волн (например, красной и синей)

$$(E_1 - E_2)^k = E_{ст}^k \tau_{пл}^k,$$

$$(E_1 - E_2)^c = E_{ст}^c \tau_{пл}^c,$$

или

$$\frac{E_{ст}^k}{E_{ст}^c} = \frac{(E_1 - E_2)^k}{(E_1 - E_2)^c} \cdot \frac{\tau_{пл}^k}{\tau_{пл}^c}.$$

Таким образом, для определения температуры стенки, находящейся за слоем излучающего газа, цветовым методом, т. е. для определения величины $\frac{E_{ст}^k}{E_{ст}^c}$, необходимо в каждый момент времени знать величину $\frac{(E_1 - E_2)^k}{(E_1 - E_2)^c}$ и коэффициент $k = \frac{\tau_{пл}^k}{\tau_{пл}^c}$, учитывающий неравномерность поглощения энергии по спектру, т. е. относительную прозрачность пламени.

Первое из этих двух неизвестных находится непосредственно из опыта при наличии двух оптических головок пирометра, соединенных по схеме компенсации, а второе определяется предварительно на том же самом пламени по эталонной температурной лампе, установленной на месте исследуемого тела (стенки). При этом

$$k = \frac{\tau_{пл}^k}{\tau_{пл}^c} = \frac{(E_1 - E_2)^c}{(E_1 - E_2)^k} \cdot \frac{E_A^k}{E_A^c} = \frac{(I_1 - I_2)^c}{(I_1 - I_2)^k} \cdot \frac{I_A^k}{I_A^c}.$$

Здесь I — отклонение луча осциллографа при освещении фотозлемента одним из названных источников (лампа, пламя или лампа сквозь пламя).

Практически величина $\frac{(I_1 - I_2)^c}{(I_1 - I_2)^k}$ определяется во время опыта при включенной лампе пирометром с двумя оптическими головками, при этом на пленке осциллографа регистрируются два сигнала, каждый из которых соответствует разности фототоков $I_1 - I_2$. Значения I_a^k и I_a^c определяются до опыта тем же пирометром при одной включенной головке.

Измерение температуры пламени

Методика измерения температуры пламени оптическим способом определяется прежде всего спектром излучения исследуемого объекта. Известно, что для светящихся пламен, имеющих достаточно интенсивный сплошной спектр, сравнительно легко может быть применен метод красно-синего отношения.

Как показали опыты, к таким пламенам относятся продукты горения топлива в закрытом объеме при высоких давлениях, а также весьма большое число открытых технических пламен [2], [3].

Пламена первой группы (закрытые пламена при большом давлении) чаще всего имеют непрерывный спектр, описываемый уравнением Вина, и поглощательную способность, независимую в определенных пределах от длины волны и близкую к единице. Цветовая температура пламени в этом случае равна его истинной температуре и задача ее определения сводится к задаче определения величины красно-синего отношения интенсивностей излучения пламени при условии наличия термодинамического равновесия среды.

Трудность задачи состоит в том, что в связи с очень большой скоростью протекания процессов при высоких давлениях, регистрирующая аппаратура должна быть быстродействующей.

В случае измерения температуры открытых технических пламен, поглощательная способность которых чаще всего не остается постоянной при изменении длины волны, к задаче определения величины красно-синего отношения добавляется задача нахождения относительной поглощательной способности пламени для красной и синей областей спектра.

Известно, что для светящихся пламен, находящихся в термодинамическом равновесии, как и для «мутных» сред, поглощательная способность может быть определена законом Бера

$$\varepsilon_{пл} = \alpha_{пл} = 1 - \tau_{пл} = 1 - e^{-A_\lambda d},$$

где $\alpha_{пл}$, $\varepsilon_{пл}$ и $\tau_{пл}$ — коэффициенты поглощения, излучения и пропускания пламени;

A_λ — удельный коэффициент поглощения на единицу толщины d пламени.

Очевидно, что для определения величины $\frac{\varepsilon_{пл}^k}{\varepsilon_{пл}^c}$ в ряде случаев может быть применен уже описанный метод компенсации.

Для этого две головки оптического пирометра наводятся на факел и эталонную лампу так, как это показано на рис. 4. При этом головка 4 наводится на лампу сквозь пламя, а головка 3 — только на пламя в той же точке оси пламени, что и головка 4. Угол между оптическими осями головок делается возможно меньшим. Электрические цепи головок соединяются по схеме вычитания.

Как и при измерении температуры стенки, расположенной за пламенем, до опыта с помощью головки 4 определяются величины I_a^k и I_a^c . В течение опыта с помощью обеих головок, которые включены и скомпен-

сированы так, что при их освещении одним и тем же источником излучения одновременно, общий (результатирующий) сигнал на выходе усилителя равен нулю, определяются величины $(I_{\lambda+\text{пл}} - I_{\text{пл}})^k$, $(I_{\lambda+\text{пл}} - I_{\text{пл}})^c$, $I_{\text{пл}}^k$ и $I_{\text{пл}}^c$. При этом первые два значения тока

$$[(I_{\lambda+\text{пл}} - I_{\text{пл}})^k \text{ и } (I_{\lambda+\text{пл}} - I_{\text{пл}})^c]$$

записываются на осциллографе при двух включенных головках, а вторые два значения ($I_{\text{пл}}^k$ и $I_{\text{пл}}^c$) — при отключенной головке 4 (рис. 4).

Полученные значения сигналов дают возможность определить относительную поглотительную способность пламени для красной и синей областей спектра

$$\frac{\varepsilon_{\text{пл}}^k}{\varepsilon_{\text{пл}}^c} = \frac{|E_{\lambda}^k - [E_{\lambda}\tau_{\text{пл}} + E_{\text{пл}}^0(1 - \tau_{\text{пл}}) - E_{\text{пл}}^c(1 - \tau_{\text{пл}})]^k| E_{\lambda}^c}{|E_{\lambda}^c - [E_{\lambda}\tau_{\text{пл}} + E_{\text{пл}}^0(1 - \tau_{\text{пл}}) - E_{\text{пл}}^k(1 - \tau_{\text{пл}})]^c| E_{\lambda}^k};$$

$$\frac{\varepsilon_{\text{пл}}^k}{\varepsilon_{\text{пл}}^c} = \frac{[I_{\lambda}^k - (I_{\lambda+\text{пл}} - I_{\text{пл}})^k] I_{\text{пл}}^c}{[I_{\lambda}^c - (I_{\lambda+\text{пл}} - I_{\text{пл}})^c] I_{\text{пл}}^k} = \frac{1 - \varepsilon_{\text{пл}}^k}{1 - \varepsilon_{\text{пл}}^c} = K_1.$$

Здесь K_1 — поправочный коэффициент для определения истинной температуры пламени методом красно-синего отношения, в случае если излучательная способность пламени не остается постоянной с изменением длины волны, но излучение пламени удовлетворяет закону Кирхгофа.

В этом случае значение температуры пламени определяется по ранее проведенной градуировочной прямой с учетом неравномерности поглощения пламени

$$A \frac{1}{T} + B = \ln \frac{I^k}{I^c} - \ln K_1.$$

Применяемая аппаратура

Температура светящихся газов в закрытом объеме при высоком давлении измеряется цветовым пирометром (лучеприемником Л-1) с регистрацией записи на катодном осциллографе.

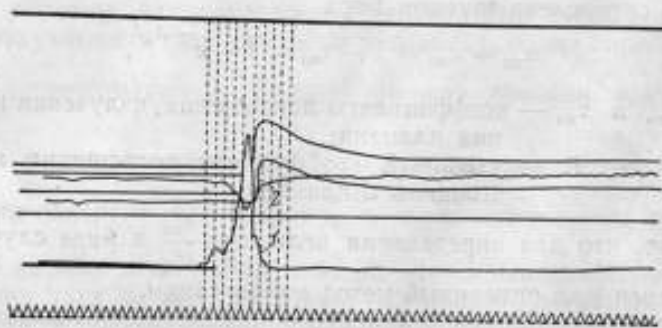


Рис. 5. Типичная осциллограмма, полученная при одновременной регистрации трех процессов пирометром Л-1. Кривые 1 и 2 относятся к измерению температуры газов.

Излучение горячих газов проходит через прозрачное окно-пробку и попадает на полупрозрачный куб-призму. Куб делит поток света на два пучка, которые проходят через соответствующие светофильтры и попадают на два фотозлемента.

Фототоки, возникающие в цепях фотоэлементов, усиливаются трехканальным усилителем постоянного тока и регистрируются на фотобумаге катодного осциллографа. Шестилучевой катодный осциллограф позволяет регистрировать шесть процессов одновременно. Специальная конструкция осциллографа позволяет записывать процесс на барабанной или пленочной кассете (рис. 5).

Аппаратура проверяется ленточной вольфрамовой лампой, отградуированной во ВНИИМ на цветовую температуру.

Комплект перечисленной аппаратуры позволяет измерять температуры светящегося пламени в диапазоне $1800 \div 3000^\circ \text{C}$ с частотой пропускания до 6000 гц. При этом может быть записан процесс изменения температуры на установке, имеющей ускорение до 100 g.

Температура участка открытого факела пламени измеряется цветовым пирометром ЛО-5М. В отличие от Л-1 пирометр ЛО-5М снабжен оптической системой наведения на объект. Пирометр имеет две оптические головки, установленные на поворотном столе, который, вращаясь при помощи мотора, позволяет снимать поля температур в течение опыта. Предварительно пирометр наводится на объект вручную механизмом наводки.

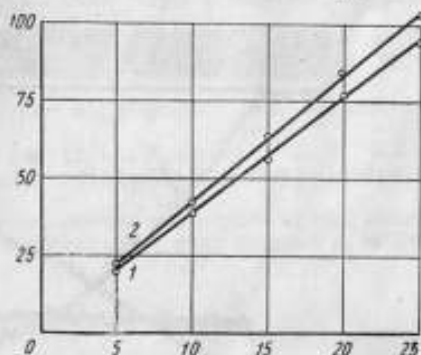


Рис. 6. Амплитудная характеристика двухканального усилителя постоянного тока.

1 — первый канал; 2 — второй канал.

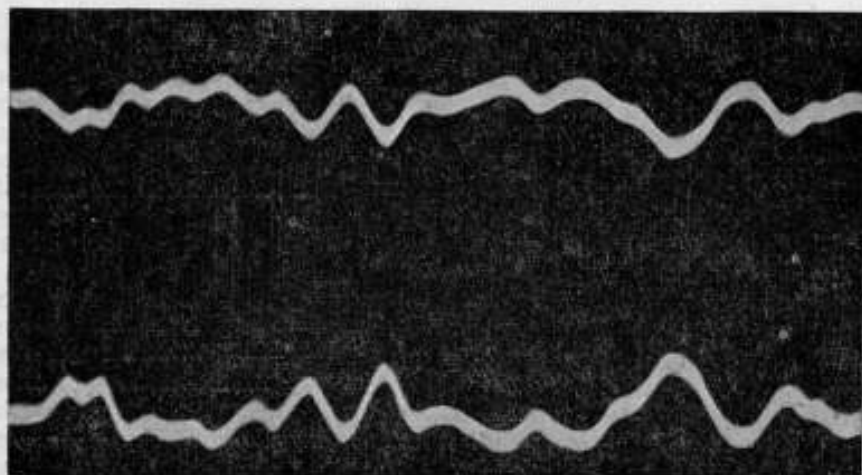


Рис. 7. Участок осциллограммы, записанный при измерении пирометром ЛО-5М температуры керосинового пламени.

Фототоки усиливаются двухканальным усилителем постоянного тока с токовым выходом. На рис. 6 приведены амплитудные характеристики его двух каналов.

С помощью пирометра ЛО-5М может быть измерена температура твердого тела или пламени в диапазоне $1500 \div 3000^\circ \text{C}$ с регистрацией записи

на шлейфном осциллографе. Частота пропускания установки ограничивается частотной характеристикой вибраторов.

На рис. 7 приведен один из участков осциллограммы, полученной при измерении температуры керосинового пламени пирометром ЛО-5М,

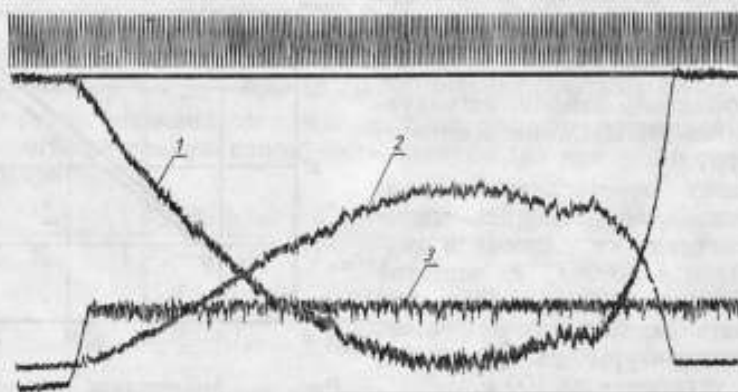


Рис. 8. Осциллограмма, полученная при измерении пирометром ЛО-5М температуры графитового конуса, помещенного в керосиновый факел. 1 — с красным светофильтром; 2 — с синим светофильтром; 3 — изменение давления в двигателе.

а на рис. 8 — осциллограмма, полученная при измерении температуры графитовой модели, нагреваемой керосиновым пламенем.

Заключение

Изложенная выше методика измерения температуры газов и нагретых тел и разработанная для этой цели аппаратура позволяют в настоящее время решить указанные задачи, однако при целом ряде определенных допущений. Наиболее существенными из них являются: предположение об однородном температурном поле по сечению пламени, отсутствие хемилюминесценции и отражения пламени, постоянство термодинамического равновесия и др. Кроме этого, как уже неоднократно указывалось [4,] [5], [6], на результатах измерения может сильно сказываться неравномерная турбулизация пламени, резкие скачки температуры пламени в наружных слоях и ряд других причин.

В связи с этим дальнейшие работы по оптической пирометрии целесообразно вести как в направлении дальнейшего усовершенствования аппаратуры (повышения частотных характеристик, введения одноканальной записи температур для цветных пирометров и др.), так и в направлении изучения природы излучения пламен, зависимости их оптических свойств от степени законченности реакций, влияния догорания сажистых частиц в наружных слоях пламени на общую (среднемассовую) температуру и природу появления провалов интенсивности в спектрах отдельных технических пламен.

Кроме этого, следует обратить внимание на создание источника сравнения с цветовой температурой выше 3000°C .

ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев Н. Н. и Щегинин Т. И., Оптический метод измерения температуры в закрытом техническом пламени, ЖЭТФ, т. 20, вып. 4, 1950, стр. 556.
2. Соболев Н. Н., Белоусов М. М., Родин Г. М., Свиридов А. Г., Скоробогатов Н. Г., Файзуллов Ф. С., Температура факела жидкого реактивного двигателя, I, ЖТФ, т. XXIX, вып. 1, 1959, стр. 27.
3. Соболев Н. Н., Китаева В. Ф., Родин Г. М., Файзуллов Ф. С., Федоров А. И., Температура факела жидкостного реактивного двигателя, II, ЖТФ, т. XXIX, вып. 1, 1959, стр. 37.
4. Измерение температур пламен, Сборник статей под редакцией А. Е. Кадышевича, М., Оборонгиз, 1954.
5. Кадышевич А. Е., Дубровская О. Н., Мерсон Я. И., Власов К. П., О применимости оптических методов для определения температуры турбулентных пламен, М., Оборонгиз, 1957.
6. Кадышевич А. Е., Возможности и пути развития оптической пирометрии пламен, Труды комиссии по пирометрии при ВНИИМ, Сборник № 1, под редакцией А. Н. Гордова, стр. 5., М. — Л., Стандартгиз, 1958.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
И. А. Андреев. О требуемой точности измерения температуры жидкой стали	5
А. П. Адзховский, А. Н. Гордов, Г. Б. Лапп, З. С. Лебедева, В. Л. Максимова, Г. Ф. Омельченко, П. Н. Прокопьев, Н. Н. Эргардт. Исследование новых типов термомпар для измерения температур до 1800°С	29
А. А. Рудницкий. Устойчивость показаний термомпар из благородных металлов	39
С. К. Данишевский. Новые термоселектродные материалы	44
Ф. В. Бочков. К вопросу о длительном измерении температуры расплавленных цветных металлов в связи с автоматизацией индукционных печей	53
Е. З. Спектор. Опыт применения цветных пирометров для измерения температур при вакуумных плавках	57
Д. Я. Свет, С. П. Нарышкин, В. В. Гришин. Модуляционный рефлектометр для расплавленных металлов и других веществ	59
Н. И. Брыкушин. Контроль температуры жидкого чугуна с помощью ярких фотопирометров	69
Н. Т. Бондарев. Об измерении температуры металла в конвертере по ходу продувки	73
В. В. Бабушкин. Аппаратура для измерения высоких температур газовой струи при больших давлениях	76

Техн. редактор Р. Г. Полянская

Подписано к печати 10/1 1950 г.

Печ. листов 5,5

Уч.-изд. л. 7,6

М-30700

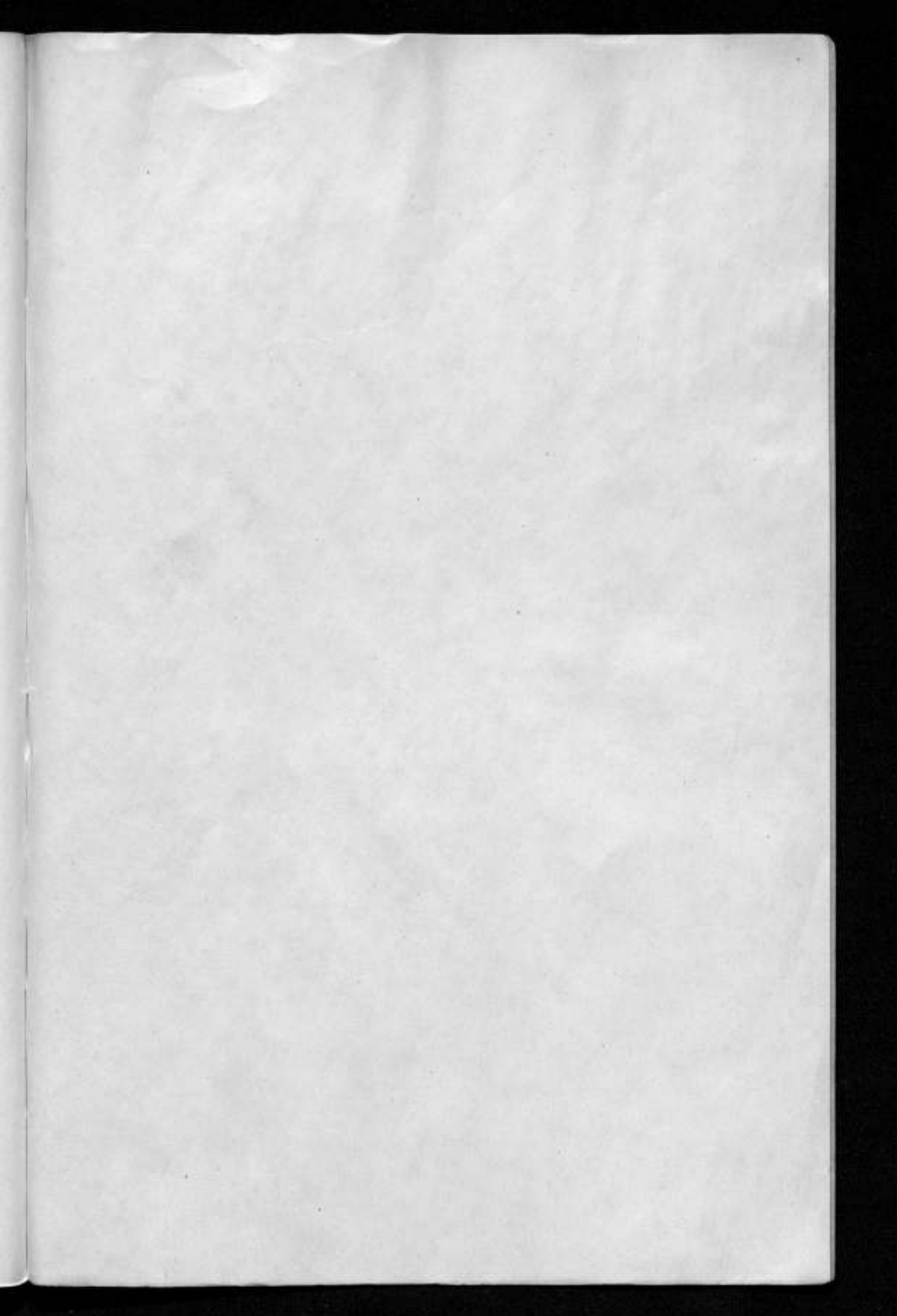
Тираж 3000 экз.

Корректор А. И. Исакова

Форм. бум. 70×108^{1/16}

Заказ 714

Типография № 6 УПП Ленсовнархоза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10



CONTENTS

Introduction 1

Chapter I 10

Chapter II 20

Chapter III 30

Chapter IV 40

Chapter V 50

Chapter VI 60

Chapter VII 70

Chapter VIII 80

Chapter IX 90

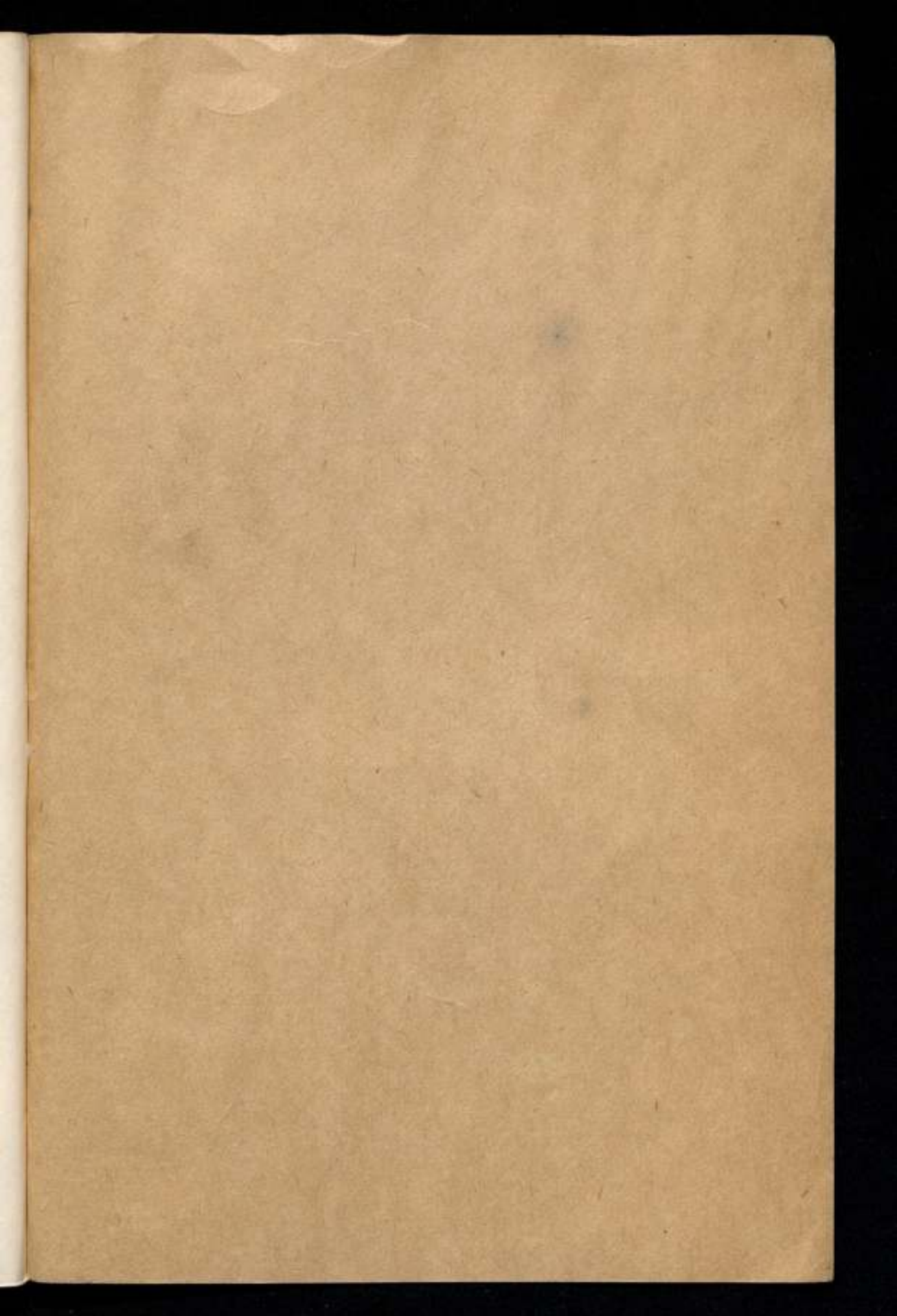
Chapter X 100

Appendix 110

Index 120

Printed and Published by the University of Chicago Press, Chicago, Ill., U.S.A.

1954



Цена 5 р. 25 к.