

Л. Ф. Жуков, Л. А. Литвинов*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков

Влияние условий использования в металлургии лейкосапфировых световодов и режимов выращивания на коэффициент пропускания

Определены составляющие световодного выходного излучения и влияние режимов работы, установленных в футеровке металлургических и нагревательных печей, иммерсионных световодов на коэффициент пропускания. Доказано, что для снижения методических и инструментальных погрешностей световодной термометрии необходимо повышать исходное направленное пропускание световодов. Установлено, что максимальное пропускание электромагнитного излучения в оптимальных для световодной термометрии видимой и ближней инфракрасной областях спектра наиболее приемлемыми (выращенными по методу А. В. Степанова) лейкосапфировыми световодами достигается в кристаллографическом направлении $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ при скоростях роста, не превышающих 20 мм/ч.

Ключевые слова: световод, термометрия, направленное пропускание, инструментальная погрешность, методическая погрешность, лейкосапфир, кристаллографическое направление

Бурное развитие и миниатюризация оптоэлектронной, волоконно-оптической и микропроцессорной техники значительно снизило инструментальные погрешности оптической термометрии и вывело их на уровень инструментальных погрешностей контактных, например, термоэлектрических измерений температуры металлических расплавов. Погрешности современной оптической термометрии определяются, в основном, методическими систематическими и случайными составляющими, которые, в свою очередь, обуславливаются отклонениями излучательной способности расплавов (ϵ) и пропусканием сопутствующих и специальных промежуточных сред (τ) от единицы и случайными их изменениями.

Металлургические процессы плавки, миксерования и разливки металла обрабатываются по шкале действительных температур, для перехода к которым необходимо знать значения излучательной способности расплавов и коэффициент пропускания промежуточных сред, и вводить соответствующие температурные поправки в показания пирометрических систем. Такой переход имеет практическую ценность только в случае стабильных поправок. Метрологическое обеспечение промышленной пирометрии излучения невозможно без изучения оптических термометрических характеристик сплавов и промежуточных сред в конкретных условиях, в том числе их количественных оценок и стабильности. Поэтому с появлением в металлургии первых пирометров начались исследования в этой области [1-5]. Для пирометрии излучения эти исследования имеют принципиальное значение и эпизодически выполнялись по мере усовершенствования экспериментального оборудования и внедрения нового металлургического оборудования, техпроцессов и сплавов.

Использование иммерсионных световодов значительно снижает, а в идеальных случаях – практически исключает методические погрешности оптиче-

ской термометрии. Однако в реальных условиях световодной термометрии рассматриваемая проблема остается. Особое место имеет влияние пропускания специальных промежуточных сред на результаты измерений. На основе термодинамических законов теплового излучения можно показать, что нестабильность и абсолютные значения пропускания промежуточной среды и излучательной способности одинаково влияют на погрешности термометрии излучения. Поэтому изучение направленного пропускания специальных промежуточных сред имеет принципиальное значение для световодной термометрии. В работах [6-8] и других исследовано влияние температуры на пропускание лейкосапфира и кварца. Получены полезные, но явно недостаточные для термометрии данные. Для обеспечения световодной пирометрии излучения необходима более полная информация о влиянии режимов выращивания и эксплуатации на термометрические характеристики лейкосапфировых прямых цилиндрических световодов с прямыми торцами.

На рис. 1 представлена оптическая схема световодной иммерсионной термометрии расплава 1 в металлургических печах с помощью стационарно установленного в футеровке 2 световода 3 с пространственной селективностью его излучения. Для нагревательных печей схема будет идентичной. Иммерсионный световод работает в условиях значительных изменяющихся температурных градиентов по толщине футеровки. На рисунке показаны полученные расчетно-экспериментальным методом распределения температур по толщине кварцевой футеровки боковой стенки индукционной печи ИЧТ-10 при наплавлении тигля металлом (РН) и в установившемся после окончания плавки режиме (УР) с температурой расплава 1500 °С. Характер распределений определяется различными теплофизическими характеристиками внутренней (ВЗ),

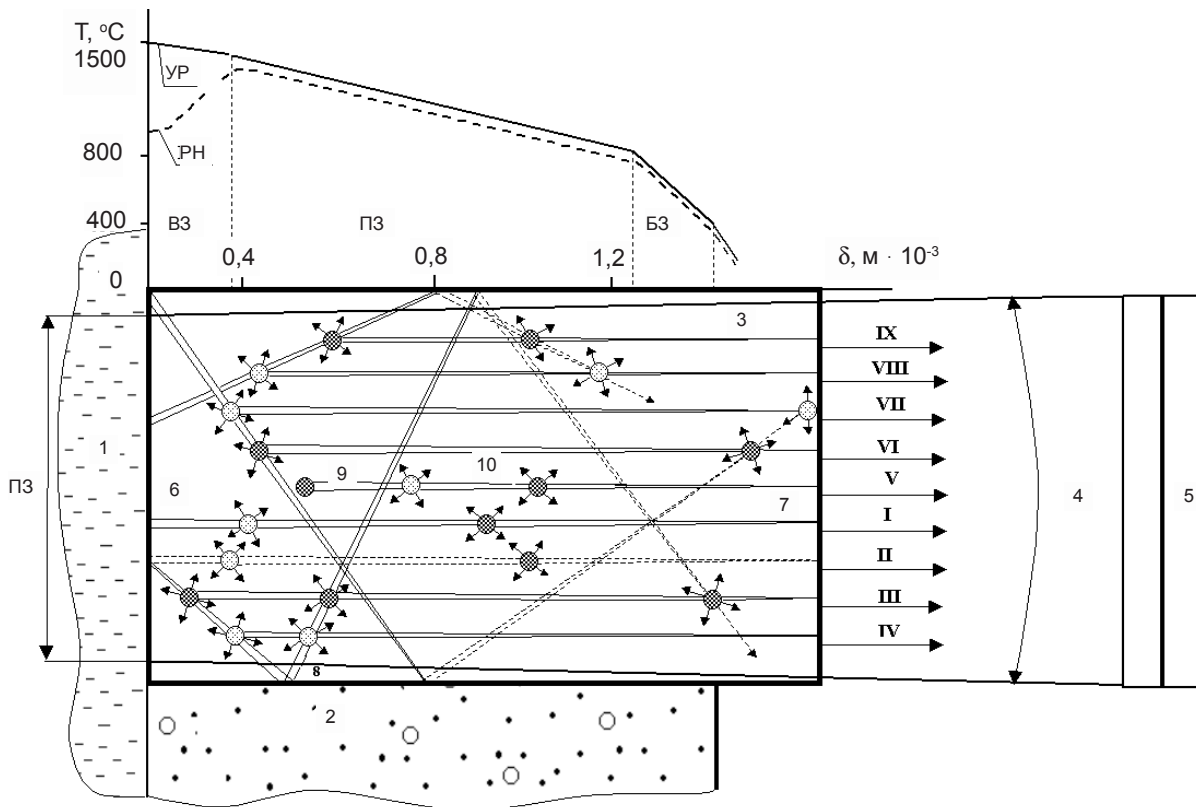


Рис. 1. Оптическая схема световодной и иммерсионной термометрии расплавов в металле

переходной (ПЗ) и буферной (БЗ) зон футеровки, в том числе их тепло- и температуропроводностью. Световод работает в условиях изменяющихся температурных и механических воздействий. Поэтому выходной сигнал детектора, даже при пространственной селективности регистрируемого в пределах телесного угла визирования 4 первичного пирометрического преобразователя 5 излучения, определяется интенсивностью собственного, отраженного, поглощенного и рассеянного излучений иммерсионного 6 и наружного 7 торцов и боковой поверхности 8 световода, а также коллоидных и молекулярных оптических неоднородностей 9 и 10.

Следовательно, при световодной термометрии результаты измерений зависят не только от поглощения излучения световодом, но и от других характеристик, в частности, от отражения излучения на боковой поверхности и выходном торце, преломления и рассеяния. Воздействующие в рабочих режимах на световод знакопеременные механические нагрузки и температуры вызывают быстрые изменения указанных характеристик. Влияние этих характеристик на интенсивность, поляризацию, спектральное и пространственное распределение излучения взаимосвязано. Коэффициент отражения зависит от показателя преломления среды, окружающей наружный торец, по отношению к материалу световода. Показатель преломления по объему световода при неравномерном изменяющемся распределении напряжений и температур соответственно изменяется. Безусловно, это влияет на интенсивность и пространственное распределение передаваемого световодом излучения. Даже в оптически идеальных световодах наблюдается молекулярное рассеяние излучения. Известно, что

это молекулярное рассеяние имеет линейную зависимость от температуры. Доказано также, что свет, рассеянный дефектами кристаллической решетки, в частности, дислокациями, пропорционален абсолютной температуре [9]. Процессы рассеяния света в неравномерно нагретом теле, которым является работающий в футеровке световод, значительно сложнее процессов рассеяния в изотермических средах. Например, в неравномерно нагретом световоде интенсивность молекулярного рассеяния в определенном объеме зависит как от его температуры, так и распределения температуры во всем кристалле. В реальных световодах молекулярное рассеяние дополняется более значительным рассеянием на коллоидных оптических неоднородностях.

На рис.1 показаны 9 основных составляющих излучения, выводимого прямым цилиндрическим световодом с прямыми торцами в телесном угле визирования. Происхождение этих составляющих легко идентифицируется по рисунку. Интенсивность собственного излучения иммерсионного торца, боковой поверхности и оптических неоднородностей определяется их температурой и излучательной способностью:

$$ИИ_{ит} = f(T_{ит}, \epsilon_{ит}); ИИ_{бп} = f(T_{бп}, \epsilon_{бп}); ИИ_{он} = f(T_{он}, \epsilon_{он}).$$

Интенсивность отраженного, поглощенного и рассеянного излучений определяется соответственно коэффициентами отражения, поглощения и рассеяния.

Исходя из сказанного и с учетом условий, в которых работает световод в футеровке, сложно оценить влияние каждой составляющей на пропускание. Даже если и можно получить какие-то оценки, то они могут быть использованы только для конкретных условий эксперимента и будут искажены в реаль-

ных условиях. Поэтому лучше пропускание световода оценивать эффективным значением этого параметра $\Pi_{эф}$, включающим все составляющие. Информативным для световодной термометрии является излучение иммерсионного торца, имеющего температуру расплава в пределах поля зрения первичного параметрического преобразователя ПЗ. $\Pi_{эф}$ световода также определяется потерями при рассеянии света на оптических неоднородностях, поглощении света материалом световода, внутренних отражениях, френелевском отражении от наружного торца и собственным излучением этих неоднородностей.

Анализ условий работы световода в футеровке металлургических и нагревательных печей показывает, что метрологические характеристики световодной термометрии определяются, в значительной мере, исходными оптическими характеристиками лейкосапфира и, прежде всего, его пропусканием в рабочем спектральном диапазоне. Исходное направленное пропускание является интегральным показателем количества и характера оптических неоднородностей по длине и диаметру световода, определяющих уровень помех в световодном излучении и методических погрешностей. Кроме того, исходное пропускание световода определяет интенсивность падающего на детектор излучения и, соответственно, его выходной сигнал и инструментальную погрешность пирометрической системы.

Для световодных измерений средних температур, в том числе температур железоуглеродистых и медных расплавов, наиболее приемлемыми являются кремниевые фотонные детекторы излучения, которые могут работать в фотодиодном и генераторном режимах.

Недостаток фотодиодного режима – значительный уровень внутренних шумов, возрастающий с увеличением напряжения смещения и интенсивности излучения. В этом режиме через детектор проходит темновой ток, который существенно зависит от температуры « $p-n$ » перехода (10 % / К) и отличается нестабильностью.

При регистрации слабого излучения, когда отношение уровней сигнала и шума близко к единице, а изменения темнового и рабочего тока сравнимы, целесообразно использовать генераторный режим, для которого характерны более низкий уровень собственных шумов и отсутствие темнового тока. В этом случае детектор может работать в режимах холостого хода и короткого замыкания. В первом случае (сопротивление нагрузки несколько МОм) измерения обладают высокой чувствительностью, однако уровень выходного сигнала детектора существенно зависит от его температуры (0,3 % / К). Кроме того, затруднения вызывает согласование со вторичным измерительным преобразователем. Во втором случае (сопротивление нагрузки – единицы Ом) температурная зависимость выходного сигнала выражена значительно слабее (0,05 % / К), более линейна световая характеристика и выше быстродействие. Недостаток режима – низкий уровень сигнала.

Самым метрологически обоснованным является режим короткого замыкания, для реализации кото-

рого необходимо повысить выходной сигнал детектора за счет увеличения исходного пропускания световода. При повышении сигнала в 2 раза в реальном диапазоне основная приведенная погрешность вторичного преобразователя, практически, уменьшается также в 2 раза.

При заданных сырье, материале тигля и формообразователя, а также составе атмосферы пропускание лейкосапфира определяется режимами выращивания, скоростью процесса и кристаллографическим направлением. На рис. 2 представлены зависимости коэффициента пропускания от длины волны излучения для наиболее приемлемых образцов лейкосапфира, выращенного из сырья RSA (Франция). Образцы с диаметром 5,5 мм и длиной 100 мм выращивались по методу А. В. Степанова в условиях НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины со скоростями от 20 до 60 мм/ч в двух основных кристаллографических направлениях <0001> и <1120>. Исследования пропускания проводились в перекрывающем рабочий диапазон кремниевых детекторов (0,4-1,1 мкм) спектральном диапазоне от 0,3 до 1,1 мкм по стандартным, реализуемым на базе спектрофотометров, методикам.

Исследованы также образцы, выращенные в более широких интервалах варьирования скоростей и кристаллографических направлений. В принципе, метод А. В. Степанова позволяет выращивать лейкосапфировые стержни со скоростью от 5 до 150 мм/ч. Однако при увеличении скорости более 60 мм/ч пропускание снижается по экспоненте до неприемлемых значений. В случае уменьшения скорости менее 20 мм/ч происходит незначительное экспоненциальное повышение коэффициента пропускания. Наиболее сильное влияние скорости наблюдается в интервале от 20 до 60 мм/ч. Кристаллографические направления <0001> и <1120> являются взаимно перпендикулярными и граничными

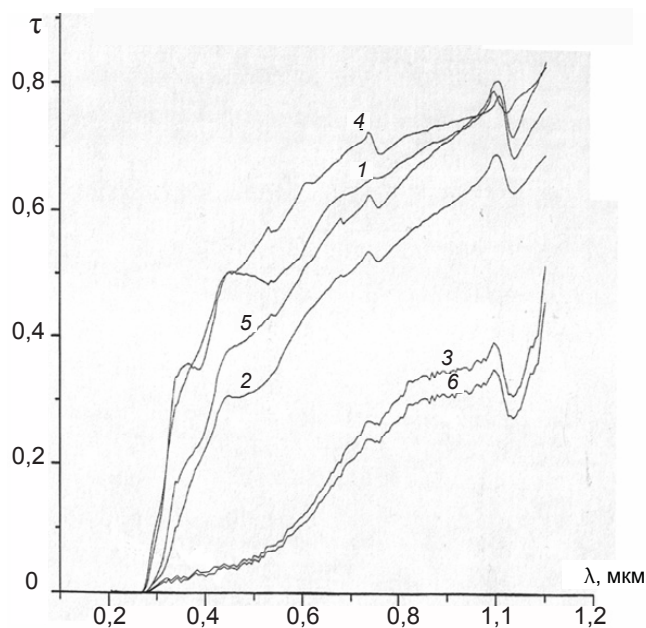


Рис. 2. Зависимости коэффициента пропускания лейкосапфира от длины волны излучения, мм/ч: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60 (ориентация <0001>); 4 – 20; 5 – 40; 6 – 60 (ориентация <1120>)

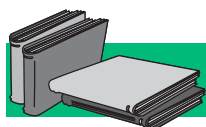
для остальных близких по пропусканию промежуточных ориентаций. Причем направление $\langle 0001 \rangle$ более предпочтительно для световодной термометрии. В этом случае геометрическая ось световода совпадает с главной оптической осью кристалла, по которой отсутствует двойное лучепреломление. Это упрощает оптическое сочленение световода с первичным пирометрическим преобразователем или фокусирующим устройством пирометрической системы. Кроме того, при выращивании кристалла по направлению $\langle 1120 \rangle$ плоскость базиса параллельна направлению роста, она лучше всех остальных ограничена, выходит на боковую поверхность световода и образует на ней продольную фаску, которая нарушает цилиндричность световода и затрудняет изготовление световодных устройств.

Полученные результаты объясняются тем, что при увеличении скорости роста повышается плотность дислокаций, вакансионных центров и их агрегатов. Коагуляция вакансий приводит к образованию рассеивающих центров и, следовательно, снижению пропускания лейкосапфира. Причем снижение пропускания с увеличением скорости наблюдается при выращивании кристаллов в любых кристаллографических направлениях. Пропускание световодов, выращенных в направлении главной оптической оси со скоростями 20-40 мм/ч (кривые 1, 2), несколько ниже, чем у кристаллов с ориентацией $\langle 1120 \rangle$ (кривые 4, 5). Связано это с тем, что в первом случае фронт кристаллизации совпадает с наиболее плотно упакованной плоскостью $\langle 0001 \rangle$ и кристалл стремится зарастать смежными кристаллическими плоскостями. Это сопровождается повышением плотности рассеивающих центров и снижением пропускания световода. Из-за плотной упаковки и зарастания выращивание кристаллов с ориентацией $\langle 0001 \rangle$ является самым сложным и требует меньших скоростей. Со снижением скорости зарастание уменьшается и пропускание световодов с ориентацией $\langle 0001 \rangle$ приближается к пропусканию для ориентации $\langle 1120 \rangle$ (кривые 2, 5 и 1, 4). При скоростях 60 мм/ч и более

количество оптических неоднородностей резко возрастает и пропускание снижается. В таких условиях скоростной фактор становится доминирующим и даже нивелирует влияние кристаллографического направления. Поэтому пропускание для ориентации $\langle 0001 \rangle$ (кривая 3) превышает пропускание световода с ориентацией $\langle 1120 \rangle$ (кривая 6). При смещении в коротковолновую часть исследуемого спектрального диапазона пропускание для всех кристаллографических направлений уменьшается за счет повышения собственного поглощения лейкосапфиром тестирующего электромагнитного излучения. В наиболее приемлемой для световодной термометрии ближней инфракрасной части спектра собственное поглощение лейкосапфира снижается и пропускание повышается до приемлемого уровня.

Выводы

Таким образом, определены составляющие излучения, выводимого иммерсионными прямыми цилиндрическими световодами с прямыми торцами, установленными в футеровке металлургических и нагревательных печей. Показано влияние режимов эксплуатации световодов на их эффективное пропускание, определяющее метрологические характеристики световодной термометрии. Доказано, что для снижения как методических, так и инструментальных погрешностей световодных измерений температуры необходимо повышать исходное направленное пропускание световодов. Исследовано влияние режимов выращивания лейкосапфировых световодов на коэффициент пропускания. Установлено сильное влияние скорости и кристаллографического направления выращивания световодов по методу А. В. Степанова на их пропускание. Максимальное пропускание электромагнитного излучения в оптимальных для световодной термометрии видимой и ближней инфракрасной области спектра достигается при скоростях выращивания, не превышающих 20 мм/ч в кристаллографическом направлении $\langle 1120 \rangle$.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Gutmann K.* Vergleichende Temperaturmessungen an Roheisen – Gusseisen – Stahlmelzen // *Stahl und Eisen.* – 1937. – № 44. – P. 45-57.
2. *Жуков Л. Ф., Добрук Е. А.* Исследование спектрального распределения теплового излучения железоуглеродистых расплавов // *Процессы литья.* – 1998. – № 3-4. – С. 154-157.
3. *Жуков Л. Ф.* Исследование влияния химического состава на излучательные характеристики железоуглеродистых расплавов // *Там же.* – 2000. – № 4. – С. 62-66.
4. *Бельский О. И.* Влияние высоких температур и агрессивной газовой среды на передачу лучистой энергии через стержневой световод из лейкосапфира // *Объективные методы пирометрии излучения металлов.* – М.: Наука, 1976. – С. 73-79.
5. *Жуков Л. Ф.* Влияние температуры и перемешивания жидкого чугуна на состав сопутствующей газовой среды // *Металл и литье Украины.* – 2009. – № 4-5. – С. 66-69.
6. *Беляев В. Д., Ванюшин А. В., Петров В. А.* Исследование спектрального коэффициента поглощения рубина и лейкосапфира при высоких температурах // *Теплофизика высоких температур.* – 1977. – Т. 15, № 1. – С. 214-216.
7. К вопросу использования кварцевых и лейкосапфировых световодов для измерения температуры расплавов / *Л. Ф. Жуков, И. П. Бабийчук, Е. Г. Чугунный, Б. Н. Олейник* // *Литые жаропрочные коррозионностойкие сплавы.* – Киев: ИГПл АН УССР, 1978. – С. 126-131.
8. *Жуков Л. Ф.* Исследование влияния времени выдержки и технологии плавки на интенсивность и спектральное распределение теплового излучения железоуглеродистых расплавов // *Процессы литья.* – 1996. – № 3. – С. 87-93.
9. *Фабелинский И. Л.* Молекулярное рассеяние света. – М.: Наука, – 1965. – 552 с.

Анотація

Жуков Л. Ф., Літвінов Л. А.

Вплив умов використання в металургії та режимів вирощування лейкосапфірових світловодів на коефіцієнт пропускання

Визначено складові світловодного вихідного випромінювання та вплив режимів роботи встановлених у футерівці металургійних та нагрівальних печей іммерсійних світловодів на їх ефективне пропускання. Доведено, що для зменшення методичних та інструментальних похибок світловодної термометрії необхідно підвищувати вихідне спрямоване пропускання світловодів. Встановлено, що максимальне пропускання електромагнітного випромінювання в оптимальних для світловодної термометрії видимої та ближньої інфрачервоної частинах спектру найбільш прийнятними зрощеними за методом А. В. Степанова лейкосапфіровими світловодами досягається в кристалографічному напрямку $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ при швидкостях росту, що не перевищують 20 мм/год.

Ключові слова

світловод, термометрія, ефективне спрямоване пропускання, інструментальні похибки, методичні похибки, лейкосапфір, кристалографічний напрямок

Summary

Zhukov L., Litvinov L.

Influence of metallurgical application conditions and leucosapphire light-guides growth regimes on coefficient of transmission

The constituents of light-guide output radiation and influence of work regimes in the metallurgical and heating furnaces lining on the effective transmission of the immersion light-guides. It is proved, that it is necessary to increase the light-guides starting directional transmission to decrease method and instrumental errors of the light-guide thermometry were determined. It is established, that maximum transmission of the electromagnetic radiation in the visible and infrared spectral ranges for grown with A. Stepanov method leucosapphire light-guides is achieved in the crystallography direction $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ under single-crystal growth speed not more than 20 millimeters per hour.

Keywords

light-guide, thermometry, directional transmission, instrumental errors, method errors, leucosapphire, crystallography direction

Поступила 17.02.10

УДК 669.184:001.891.573

В. Ю. Сухенко

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

Контроль настыеобразования на кислородной фурме

Рассмотрены известные способы контроля настыеобразования на кислородной фурме. Исследованы недостатки данных способов контроля. Установлено, что наиболее рациональным способом является определение заметалливания фурмы по тепловому потоку на водоохлаждаемые элементы.

Ключевые слова: конвертер, фурма, настыеобразование, контроль, дутьевой режим

Вступлення

Отсутствие в период интенсивного обезуглероживания ванны достаточного по высоте слоя вспененного шлака, который способен перекрыть торец наконечника кислородной фурмы, особенно в условиях «малотлаковой» технологии продувки, сопровождается интенсивным выносом за пределы реакционной зоны мелких капель металла и шлака с формированием настелей на поверхности фурмы, конусной части футеровки и горловине конвертера, экранных поверхностях котла утилизатора. Удаление настелей – очень сложная и трудоемкая работа,

которая сопровождается снижением стойкости оборудования и потерей производительности агрегатов.

Дутьевой режим – основной фактор, который определяет заметалливание фурмы конвертера.

Контроль настыеобразования является субъективным и зависит от квалификации сталеплавильщика. В настоящее время его проводят визуально после завершения плавки. Известен способ автоматического контроля, который основан на взвешивании кислородной фурмы, которое можно провести в стационарном режиме до и после плавки. При этом неудачный дутьевой режим можно поменять только по