

оксида хрома (III) не более 20 мкм, хлорида хрома (III) не более 70 мкм. На основании полученных результатов выбраны сырьевые материалы для синтеза боридов и карбида хрома.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моссэ А.Л., Буров И.С. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. – Минск: Наука и техника, 1980. – 208 с.
2. Руднева В.В., Галевский Г.В., Юркова Е.К. – В кн.: Труды VI Всероссийской научн.-практ. конф. СибГИУ. – Новокузнецк.: изд. СибГИУ, 2007. С. 343 – 346.

3. Руднева В.В. – В кн.: Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния: Монография: в 3 т. Дополнительный том. – М.: Флинта: Наука, 2008. – 387 с.
4. Свойства элементов: справочник в двух частях. Ч.1. Физические свойства / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1975. – 600 с.
5. Физико-химические свойства окислов: справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
6. Фурман А.А. Неорганические хлориды. – М.: Химия, 1980. – 416 с.

© 2012 г. И.В. Ноздрин, В.В. Руднева,
Л.С. Ширяева, М.А. Терентьева
Поступила 13 апреля 2011 г.

УДК 621.315:537.311.3

А.М. Поводатор, В.В. Конашков, В.С. Цепелев, В.В. Вьюхин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ¹

Для получения новых и совершенствования существующих металлургических технологий необходима разработка оптимальных температурно-временных режимов обработки расплава, что можно осуществить на основе данных о его структурных изменениях, судят о которых либо по результатам дифракционных исследований, либо по температурным или временным зависимостям свойств, связанных со структурой расплава – вязкости, электрического сопротивления, плотности и др. Изучение этих свойств связано со значительными трудностями, обусловленными высокими температурами, при которых проходят эксперименты, а также большой продолжительностью опытов и с другими факторами. При этом получить достоверные данные о структурных изменениях в металлических расплавах чаще всего удается при изучении нескольких структурно-чувствительных свойств и обобщенном анализе полученных результатов. Таким образом, особое значение приобретает планирование экспериментов и совместный анализ результатов, что позволяет получить максимум информации из ограниченного объема исходных экспериментальных данных.

К многопараметрическому определению характеристик металлических жидкостей (расплавов) с высокой температурой плавления ($t_{пл} = 1000 - 2000$ °С) относится, прежде всего, вискозиметрия на базе нестационарного бесконтактного фотометрического определения

кинематической вязкости путем измерения параметров экспоненциального затухания (декремента) крутильных колебаний тигля с расплавом, подвешенного на упругой нити [1], а также бесконтактное определение электропроводности образца способом вращающегося магнитного поля [2]. Эти методы позволяют проводить анализ материалов и давать рекомендации для получения сплавов с заданными характеристиками, в частности, корректировать технологические режимы.

Известно, что температурные зависимости свойств чистых металлов имеют качественную, а иногда и количественную связь [3]. Например, такая связь описывается законом Видемана-Франца. Этими соотношениями иногда удается описать и свойства реальных многокомпонентных промышленных сплавов, однако лишь в узких температурных интервалах. Тем не менее, сопоставление политейм промышленных сплавов дает дополнительный материал об изучаемом объекте и позволяет прогнозировать значения одних свойств по известным значениям других. Поскольку количественную взаимосвязь в виде формулы для параметров многокомпонентного расплава, по всей видимости, получить невозможно, анализ этой взаимосвязи целесообразно проводить статистическими методами, например, используя корреляционный анализ.

В основе анализа политейм расплавов лежат сведения о температурных зависимостях физических характеристик металлов, причем определяемые параметры связаны соотношениями, количественно совпадающими с экспериментальными данными [4]. При этом анализ политейм двух важнейших структурно-чувствительных термовискозисимых параметров – вязкости (ν) и

¹ Работа выполнена в рамках мероприятия 1.8 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы», контракт № 16.518.11.7028.

электросопротивления (ρ) – позволяет выделять особые температурные точки: температуру начала гистерезиса (t_{Γ}), критическую ($t_{\text{кр}}$) и температуру аномального изменения свойств расплава ($t_{\text{ан}}$), а также гистерезисные характеристики цикла нагрев – охлаждение. Вязкость и электросопротивление анализируют независимо друг от друга, хотя их связь очевидна. Поэтому, если результаты усреднения, которые представляют собой численные значения, зависят от параметров, например от температуры и времени, пользуются функциями средних значений и важнейшей из них в технике измерений – корреляционной функцией [5]. Экспериментальное определение политерм вышеуказанных параметров, в том числе, гистерезиса и его особенностей, а также фиксация температур t_{Γ} , $t_{\text{кр}}$ и $t_{\text{ан}}$ – сложный многочасовой процесс.

Эксперименты осложняются, во-первых, трудоемкостью и непростотой сравнительного анализа результатов измерений каждого из параметров расплава и их взаимосвязи, что не позволяет обеспечить ускорение и уменьшение стоимости экспериментов. Во-вторых, информация о расплаве, с одной стороны, избыточна, в том числе по характеристикам гистерезиса политерм или температур t_{Γ} , $t_{\text{кр}}$, $t_{\text{ан}}$; с другой стороны, отсутствует достоверная количественная оценка связи измеряемых параметров. В-третьих, в случае необходимости повторного, например через месяц или год, исследования свойств этого же расплава после изменения технологии повторяют заново весь цикл многопараметровых экспериментов из-за отсутствия вышеупомянутой оценки связи измеряемых параметров.

Задачей настоящей работы является удешевление и уменьшение объема экспериментов, в том числе повторных, на основе определения корреляции кинематической вязкости и электросопротивления расплава, а также оценка возможности обеспечения по одному из этих параметров и коэффициенту корреляции r определения другого, кроме того, целью работы было упрощение многократных экспериментов и подготовки к ним с учетом этой корреляции.

Комплекс для исследования содержит блок определения температурных зависимостей вязкости и электросопротивления расплава, в состав которого входят установки для изучения кинематической вязкости и электросопротивления [1, 2], а также компьютерный виртуальный коррелометр [6].

На каждой из установок синхронно или несинхронно осуществляют соответствующие эксперименты по снятию политерм вязкости и электросопротивления одного и того же расплава в необходимом температурном диапазоне в одних и тех же температурных точках t_i . При этом каждая из них должна быть задана в обеих установках с максимально возможной степенью совпадения значения t_i , например с различием меньше ± 5 °С в области температур 1000 – 2000 °С, причем точки цикла нагрев – охлаждение отделены друг от друга и не

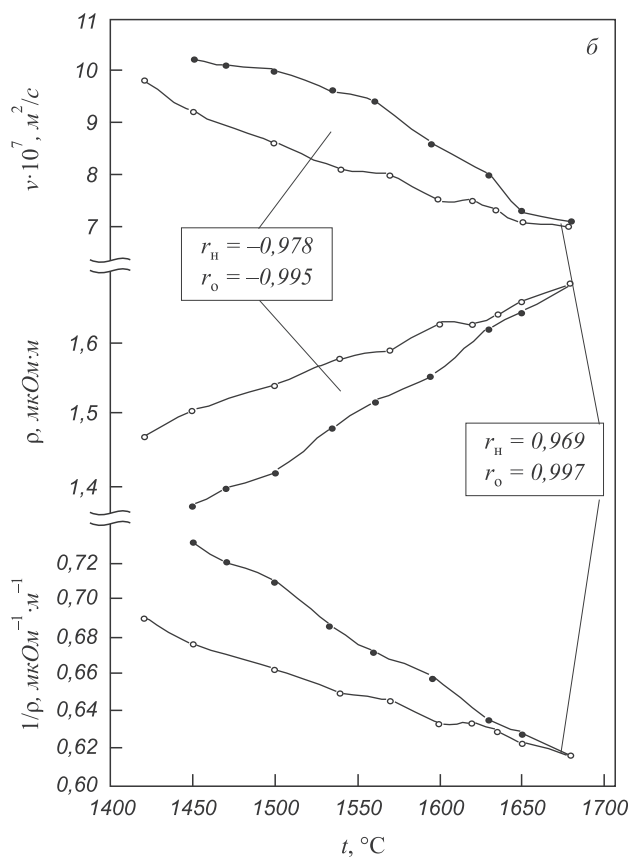
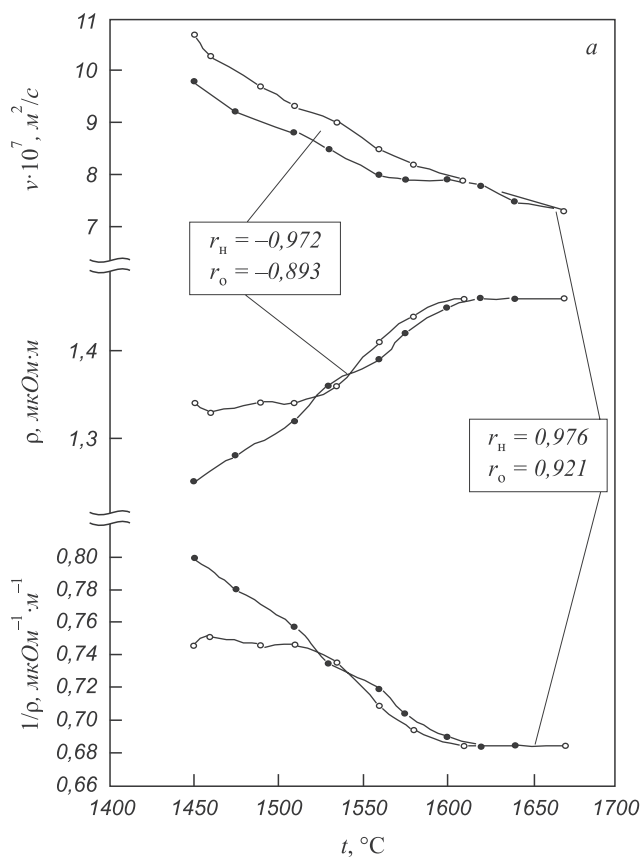
обязательно совпадают по величине. Практически используют 5 – 10 экспериментальных точек t_i , что несколько снижает уровень достоверности коэффициента корреляции r , тем не менее такое число точек достаточно для обработки результатов без установления закона распределения [7]. Виртуальный коррелометр, выполненный на основе компьютера Pentium 4, осуществляет обработку результатов измерений, причем основными операциями обработки являются перемножение сигналов и усреднение результата интегрированием [8], и определяет коэффициент r между ними. Коррелометр может быть использован как пороговый сигнализатор, в котором можно осуществить предустановку минимальной (пороговой) величины $r = A_{\text{пор}}$. В этом случае можно реализовать сигнализацию с отражением на дисплее, например, зеленой/красной индикации коэффициента r для случаев больше/меньше значения $A_{\text{пор}}$. Это обеспечивает расширение функциональных возможностей коррелометра.

При использовании коэффициента r нет необходимости повторять заново весь цикл экспериментов. На основании анализа этого коэффициента может оказаться, что достаточно ограничиться определением одного параметра и прогнозированием другого. В случае $r \geq A_{\text{пор}}$, выбранной на основании оценки предыдущих экспериментов и требуемой точности прогнозируемого параметра, например $A_{\text{пор}} = 0,8$, принимают решение о прекращении одного из повторных экспериментов и достаточности для исследуемого расплава изучения только одного из параметров, например, вязкости. При этом прогнозируют значение другого параметра – электропроводности.

Были получены значения r для вязкости и электропроводности образцов расплавов посредством виртуального коррелометра, работающего с программой Excel. В этом случае сигналы подают с каждой из установок посредством моста «USB–UART» на USB входы коррелометра, вводят в таблицу Excel и вычисляют r по стандартной формуле.

На позиции *a* рисунка показаны политермы вязкости, электросопротивления и электропроводности образца расплава мартеновской рельсовой стали марки М76В, полученной на Кузнецком металлургическом комбинате. Вычисленные по девяти точкам политерм коэффициенты корреляции при нагреве ($r_{\text{н}}$) этой стали составили соответственно $-0,972$ и $+0,976$, а при охлаждении образца расплава ($r_{\text{о}}$) – соответственно $-0,893$ и $+0,921$. По этим значениям при выборе пороговой величины $r = A_{\text{пор}} = 0,8$, даже при минимальном $r_{\text{о}} = -0,893$, может быть достаточно в следующий раз провести экспериментальное определение только одного из параметров.

На позиции *b* рисунка приведены политермы образца расплава мартеновской рельсовой стали этой же марки М76В, выпускаемой Нижнетагильским металлургическим комбинатом. Для этого расплава вычисленный



Политермы вязкости, электросопротивления, электропроводности рельсовой стали, произведенной на Кузнецком (а) и Нижнетагильском (б) металлургических комбинатах:
● – нагрев, ○ – охлаждение

по девяти точкам политерм коэффициент корреляции при нагреве (r_H) стали составил $-0,978$ и $+0,969$; при охлаждении (r_O) – соответственно $-0,995$ и $+0,997$. По этим значениям, даже при выборе $r = A_{пор} = 0,95$, достаточно провести экспериментальное определение только одного из параметров.

Сравнение результатов этих примеров позволяет прогнозировать более высокую степень стабильности и предсказуемости параметров образца расплава рельсовой стали, выпускаемой Нижнетагильским металлургическим комбинатом, и сделать вывод о предположительно более совершенной технологии производства.

Также рассмотрены температурные зависимости вязкости и электросопротивления меди, полученные авторами работы [9]. Для этого расплава вычислены по пяти точкам политерм при нагреве значения $r_H = -0,959$ и $r_H = 0,979$. Такие высокие значения r_H даже для малой выборки позволяют сделать предположение о возможности не проводить в следующий раз эксперименты по определению второго параметра.

Были также построены политермы литейного никелевого жаропрочного расплава ЖС 26 по данным экспериментов, выполненных в Уральском политехническом институте [10]. Для этого расплава при его нагреве и охлаждении вычислены по восьми точкам политерм значения коэффициентов корреляции, которые соста-

вили соответственно $-0,969$, $+0,971$ и $-0,866$, $+0,867$. По этим значениям при выборе $r = A_{пор} = 0,8$, даже при минимальном $r_O = -0,866$ (для политермы охлаждения), достаточно провести экспериментальное определение одного из параметров.

В дальнейшем представляется целесообразным определить коэффициенты корреляции для возможно большего массива данных по расплавам, по крайней мере, для вязкости, электросопротивления, плотности и др. Приведенные примеры подтверждают реализацию поставленной задачи.

Выводы. Коэффициент корреляции структурно-чувствительных свойств – кинематической вязкости и электросопротивления расплава – может его характеризовать и использоваться для оценки равновесного состояния этого расплава. Коэффициент корреляции результатов опытов, проведенных в разное время, также может характеризовать объект исследования. В частности, когда разные экземпляры промышленных образцов одинакового состава характеризуются разными значениями коэффициента корреляции между свойствами их расплавов, можно предположить, что это связано с различием в технологии их получения и, соответственно, их служебными характеристиками (качеством). Низкий коэффициент корреляции свидетельствует о том, что теснота связи данных, характеризующих свойства рас-

плава, недостаточна. Это косвенно отражает наличие существенной неравновесности расплава. В таком случае не исключено, что в дальнейшем потребуется провести дополнительные эксперименты и(или) изменить параметры их проведения, например, температурный интервал и(или) время выдержки. Высокий коэффициент корреляции говорит о тесноте связи используемых параметров и в этом случае может оказаться нецелесообразным проводить дальнейшие эксперименты с тем же объектом. Таким образом, появляется возможность сократить объем экспериментов без ухудшения качества результата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2386948 РФ. Способ бесконтактного измерения вязкости высокотемпературных металлических расплавов / А.М. Поводатор, В.В. Конашков, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев; опубл. 20.04.2010, бюл. № 11.
2. Пат. № 2299425 РФ. Способ для бесконтактного измерения электрического сопротивления металлического твердого образца или его расплава методом вращающегося магнитного поля и устройство для его осуществления / А.М. Поводатор, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев, А.Г. Тягунов; опубл. 20.05.2007, бюл. № 14.
3. Корсунский А.М., Кочетков Г.М. // Физика металлов и металловедение. 1971. Т. 32. Вып. 1. С. 178, 179.
4. Баум Б.А., Тягунов Г.В., Третьякова Е.Е., Цепелев И.С. – В кн.: Свойства металлических расплавов. Ч. 1. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2008. С. 109 – 111.
5. Измерения в промышленности. Справочник / Под ред. П. Профоса. – М.: Metallurgia, 1980. Раздел 2.5.2.3. С. 115.
6. Пат. № 104721 РФ. Устройство для исследования высокотемпературных металлических расплавов / А.М. Поводатор, В.В. Конашков, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев; опубл. 25.05.2011, бюл. № 14А.
7. Фремке А.В. – В кн.: Электрические измерения. – Л.: Энергия, 1980. С. 53.
8. Фремке А.В. – В кн.: Электрические измерения. – Л.: Энергия, 1980. С. 383, 384.
9. Белоусов А.А., Бахвалов С.Г., Алешина С.Н. Физико-химические свойства жидкой меди и ее сплавов. Справочник. – Екатеринбург: изд. УрО РАН, 1997. С. 72, 73.
10. Ларионов В.Н. – В кн.: Свойства металлических расплавов. Ч. 2. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2008. С. 79 – 82.

© 2012 г. А.М. Поводатор, В.В. Конашков,
В.С. Цепелев, В.В. Вьюхин
Поступила 12 июля 2011 г.

УДК 669.15'26-194:536.2

Б.П. Юрьев, Н.А. Спири

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (филиал в г. Первоуральске)

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ МАРКИ ШХ15 В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА

Хромистые заэвтектоидные стали (марок ШХ6, ШХ9, ШХ15 и т.п.) относятся к типу конструкционных, хотя по составу и свойствам принадлежат к классу инструментальных [1]. Эти стали широко применяются в промышленности, особенно при производстве шарикоподшипников. Характерным представителем этой группы является сталь марки ШХ15, которая имеет наибольшее распространение.

Известно, что эффективность использования сталей в значительной степени определяется качеством термической обработки. Реализация оптимального с этой точки зрения графика термической обработки в промышленных печах сопряжена с большими трудностями по обеспечению однородности температурного режима во всем объеме металла. Одна часть этих трудностей обусловлена неравномерностью тепловой работы печей, сложностью конфигурации или массивностью изделий. Другая часть обусловлена тем, что нагрев металла сопровождаются следующие явления [2]: изменение физических и механических свойств, структурные изменения, фазовые превращения, объемные изменения, связанные с термическим расширением, физико-химические изменения (окисление, обезуглероживание и т.д.). Все эти процессы, протекающие с поглощением

или выделением теплоты, оказывают значительное влияние на формирование температурного поля. Поэтому при исследовании процесса термической обработки или при проектировании печей необходимо иметь полное представление о структуре и свойствах нагреваемого металла как в исходном состоянии, так и во всем диапазоне изменения температуры.

Нужно отметить, что имеющихся в технической литературе сведений о свойствах стали марки ШХ15 (и главное о теплофизических свойствах) явно недостаточно. Многочисленные справочники используют в основном те немногие данные, которые впервые были систематизированы в книге [3]. В настоящей работе сделана попытка в какой-то мере восполнить этот пробел.

Без надежных данных о теплофизических свойствах затруднено дальнейшее совершенствование процессов термической обработки труб в нагревательных печах, и прежде всего процесса отжига, а также оптимизация конструктивных и режимных параметров их работы. Без этих данных трудно учесть влияние большинства из перечисленных выше факторов на распределение температур в материале садки, на продолжительность тепловой обработки, на расход топлива и т.д.