

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.1.01

УДК 669.17-154:52-334.4

С.А. Сомов¹, В.С. Цепелев², В.В. Конашков², В.В. Вьюхин², А.И. Таушканова²¹АО «Выксунский металлургический завод», Выкса, Россия²Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ И КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВОВ ТРУБНЫХ МАРОК СТАЛИ В УСЛОВИЯХ АО «ВЫКСУНСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

Политермы свойств многокомпонентных расплавов значительно отличаются от политерм чистых металлов. Они почти никогда не бывают монотонными, а тем более линейными. Для каждой марки сплава (стали) температурные зависимости имеют собственный характерный вид, который определяется составом, исходными материалами, применяемыми при их производстве, а также спецификой производства.

Впервые в условиях АО «Выксунский металлургический завод» проведена экспериментальная работа по исследованию физических свойств и структуры трубных сталей вблизи фазового перехода.

Исследованы температурные зависимости структурно-чувствительных свойств жидких сплавов на основе железа. На политерме нагрева выявлены особые точки и участки. Все построенные политермы характеризуются несовпадением ветвей нагрева и охлаждения (гистерезисом), что свидетельствует о неравновесности строения образцов после их расплавления. Нагрев системы до температур $t_{\text{н}}$ обеспечивает наличие стабильного гистерезиса и свидетельствует о многоэтапном переходе ее в состояние равновесия.

Получены новые экспериментальные данные о физических свойствах углеродистых расплавов на основе промышленных трубных марок стали (сталь марки 22ГЮ), произведенных в электродуговых печах. Изучено влияние шихтовых материалов на физические свойства расплавов. Измерены кинематическая вязкость и поверхностное натяжение промышленных расплавов трубных марок на основе железа в диапазоне температур от ликвидуса с превышением на 100–200 °С.

Построены и приведены для наглядного сравнения политермы, полученные при измерении кинематической вязкости и поверхностного натяжения на образцах двух плавок, с применением различных видов шихтовых материалов.

Для проверки полученных результатов дополнительно проанализировано еще 20 образцов от реальных плавок, выплавленных в соответствии с текущими заказами в литейно-прокатном комплексе. На основании полученных экспериментальных данных даны следующие рекомендации: максимальный нагрев в печи ДСП до температуры 1670 °С, выдержка 5–10 мин для гомогенизации расплава, выпуск плавки из печи.

Даны рекомендации по дальнейшей температурной подготовке расплавов трубных марок на основе железа. При этом особую важность приобретает вопрос стойкости огнеупорной футеровки сталеразливочных ковшей в связи с более высокими значениями температуры выпуска плавки из дуговой печи.

Ключевые слова: политерма, кинематическая вязкость, поверхностное натяжение, аномалия, перегиб, гистерезис, термовременная обработка, структура, физические свойства расплава.

S.A. Somov¹, V.S. Tsepelev², V.V. Konashkov², V.V. Vyukhin², A.I. Taushkanova²¹JSC "Vyksunsk Metallurgical Plant", Vyksa, Russian Federation²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin,
Yekaterinburg, Russian Federation

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SURFACE TENSIONS AND KINEMATIC VISCOSITY OF MELTS OF STEEL TUBES IN CONDITIONS OF JSC "VYKSUNSK METALLURGICAL PLANT"

The polytherms of the properties of multicomponent melts differ significantly from polythermal pure metals. They are almost never monotonous, let alone linear. For each grade of alloy (steel), the temperature dependences have their own characteristic appearance with features caused by the composition, the raw materials used in their manufacture, and also the specificity of production. For the first time in the conditions of JSC "Vyksunsky Metallurgical Plant" an experimental work was carried out to study the physical properties and structure of tubular steels near the phase transition.

The temperature dependences of the structure-sensitive properties of iron-based liquid alloys are studied. The polytherm of heating revealed special points and areas. All the polytherms constructed are characterized by a mismatch between the heating and cooling branches (hysteresis), which indicates a disequilibrium in the structure of the samples after their melting. Heating the system to temperatures T_{an} ensures the presence of stable hysteresis and indicates a multi-stage transition to equilibrium. As a result of the work, new experimental data were obtained on the physical properties of carbonaceous melts on the basis of industrial pipe steel grades (steel grade 22GYU) produced in electric arc furnaces.

The influence of charge materials on the physical properties of melts has been studied. The kinematic viscosity and surface tension of industrial melts of iron-based pipe grades in the temperature range from the liquidus with an excess of 100-200 °C were measured.

As a result of the experiment, polytherms obtained by measuring the kinematic viscosity and surface tension on samples of two melts have been constructed and given for visual comparison using various types of charge materials.

To test the results, another 20 samples were analyzed from real melts, smelted in accordance with the current orders in the casting and rolling complex. Based on the experimental data obtained, the following recommendations were issued: maximum heating in the EAF furnace to a temperature of 1670 °C, holding for 5-10 minutes for homogenization of the melt, output of melting from the furnace.

Recommendations are given on the further temperature preparation of melts of pipe marks on the basis of iron. At the same time, the issue of the resistance of the refractory lining of steel casting ladles is of particular importance in connection with higher temperatures of melting from an arc furnace.

Keywords: politerm, kinematic viscosity, surface tension, anomaly, bend, hysteresis, termotime preparation, structure, melts physical properties.

Благодаря тому, что сталь обладает высокой прочностью, разнообразными свойствами и хорошей способностью к утилизации, значение ее как важнейшего конструкционного материала неоспоримо. Она нашла применение практически во всех важнейших отраслях промышленности: строительстве, машиностроении, энергетике, транспорте и др. Помимо разнообразия свойств основными причинами того, что сталь – лидер среди конструкционных материалов, являются постоянные инновации в отрасли и непрерывное повышение эффективности производства. Требования, предъявляемые потребителями к механическим, технологическим и эксплуатационным свойствам стали, выполняются металлургами в широком диапазоне: появляются новые марки стали и технологии их производства. Для их поддержки используется нормативно-техническая документация, такая как государственная система обеспечения единства измерений и представление численных данных о свойствах веществ и материалов в научно-технических документах¹.

Таким образом, выполняются самые разнообразные требования к стали, предъявляемые потребителями продукции черной металлургии, например в отношении прочности и вязкости, формуемости и свариваемости, стойкости к коррозии и износу [1, с. 7–17].

Сварные соединения обладают высокой прочностью и стойкостью к хрупкому разрушению. В области материалов для сооружения трубопроводов с целью транспортировки нефти и природного газа за последние 30 лет черная металлургия прошла огромный путь, освоив материалы для арктических условий, транспортировки кислого газа, увеличив вязкость, свариваемость, обеспечив работу трубопроводов в сейсмических условиях, на больших глубинах под водой и др. В условиях Выксунского металлургического завода постоянно проводятся исследования по разработке высокопрочных марок сталей и сталей ответственного назначения. Наряду с высокой прочностью стали характеризуются хорошей вязкостью, в том числе при низких значениях температуры. При этом они хорошо и экономично свариваются.

Традиционно ответственные марки стали производятся на крупных металлургических комбинатах, построенных много лет назад и имеющих свою технологию производства. Однако сейчас на смену крупным металлургическим производствам приходят компактные и экономич-

¹ ГОСТ 8.417–81. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин.

ГОСТ 7.54–88. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Представление численных данных о свойствах веществ и материалов в научно-технических документах. Общие требования.

ГОСТ 7.12–93. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Сокращение слов на русском языке.

ные мини-заводы. В настоящее время в мире построены и эксплуатируются десятки мини-заводов, работающих по совмещенной технологии выплавки, разливки стали на тонкослябовой МНЛЗ и прокатки тонких слябов на широкополосном непрерывном прокатном стане в горячекатаные рулоны. Продукция мини-заводов в основном используется в автомобилестроении, строительстве и других отраслях промышленности, а также для производства труб, но без специальных свойств.

Осенью 2008 г. Объединенная металлургическая компания ввела аналогичное производство в районе Выксунского металлургического завода [2]. Однако литейно-прокатный комплекс ОМК имеет ряд отличий от эксплуатируемых комплексов. Уже на стадии его разработки была реализована возможность производства проката как для труб высоких категорий прочности с особыми свойствами, так и для других отраслей промышленности, в том числе с возможностью производства тонкого проката толщиной до 0,8 мм. Специфика настоящего литейно-прокатного комплекса заключается в том, что он, в первую очередь, предназначен для обеспечения высококачественным трубным металлом Выксунского металлургического завода.

Технологическая схема производства стали в условиях литейно-прокатного комплекса (ЛПК) АО «Выксунский металлургический завод» включает в себя выплавку полупродукта в дуговой сталеплавильной печи (ДСП), внепечную обработку стали на установке ковш–печь (УКП) и вакууматоре (ВД), разливку слябов толщиной 90 мм на тонкослябовой МНЛЗ, прокатку на стане горячей прокатки, ускоренное охлаждение и смотку в рулон (рис. 1).

В результате полученный стальной прокат имеет механические свойства и целевую микроструктуру в полном соответствии с техническими требованиями потребителя [3, 4].

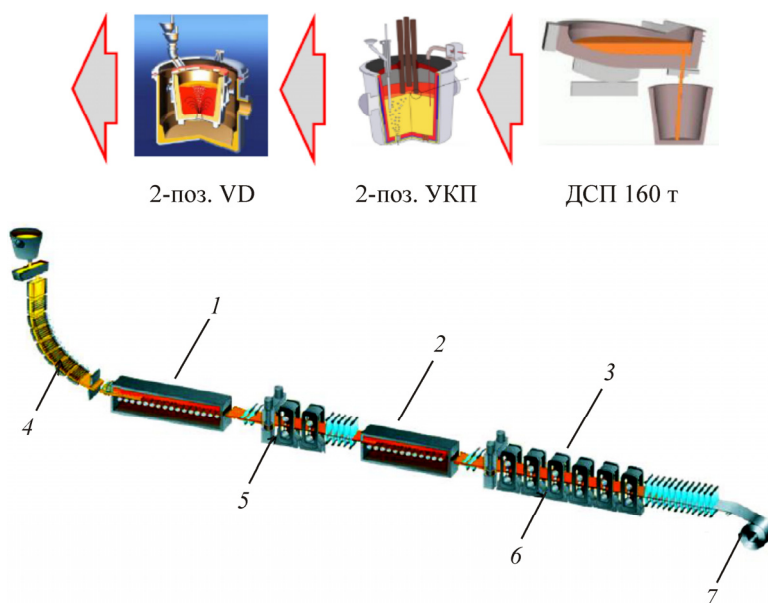


Рис. 1. Схема производства проката в условиях ЛПК: 1 – туннельная печь; 2 – подогреваемый рольганг; 3 – ламинарное охлаждение; 4 – МНЛЗ; 5 – черновая группа клетей; 6 – чистовая группа клетей; 7 – смотка

Вопросы, требующие решения

Разработанная и промышленно используемая в условиях ЛПК технология позволяет производить рулонный и листовой прокат толщиной 6,0–12,7 мм для производства электросварных труб диаметром 159–530 мм в соответствии с требованиями российских нефтяных компаний, а также международных стандартов (например, API 5L и др.).

Вместе с тем ряд вопросов, связанных с получением неудовлетворительных результатов механических испытаний труб, требует детального анализа, в том числе с точки зрения изменения физических свойств выплавляемой стали в зависимости от различных условий выплавки.

Так, одним из проблемных вопросов является периодическое получение неудовлетворительных результатов при проведении технологических испытаний трубной продукции на сплющивание, загиб, ударную вязкость сварного соединения труб малого и среднего диаметра, сваренных токами высокой частоты. Существует мнение, что одной из причин таких результатов является нестабильность процесса сварки. Общеизвестно, что во многом стабильность процесса индукционной сварки определяется величиной поверхностного натяжения расплава.

Сравнение основного химического состава сталей различных поставщиков не выявило принципиальной разницы. Однако с учетом того, что в условиях ЛПК процесс выплавки стали – электропечной, а в условиях сторонних поставщиков – конвертерный, содержание примесных химических элементов, в первую очередь цветных металлов (медь, никель, олово, сурьма и др.), а также азота и, возможно, кислорода, существенно различается.

Как известно, на эксплуатационные характеристики проката и труб также оказывает влияние содержание фосфора, который, являясь ликвирующим элементом, ответственен за появление сегрегационной неоднородности, что приводит к появлению зон повышенной твердости в прокате и впоследствии может приводить к неудовлетворительным результатам механических испытаний труб [3]. В связи с этим в прокате, производимом для труб ответственного назначения, необходимо обеспечить более низкий уровень содержания фосфора по сравнению с его содержанием, соответствующим стандартным маркам стали. В результате пошаговой оптимизации режима выплавки стали в ДСП, а также благодаря контролю времени отсечки печного шлака содержание фосфора удалось снизить с уровня 0,013 % до уровня менее 0,006 % (рис. 2). Такой уровень фосфора позволяет стабильно исключать случаи формирования зон с повышенной твердостью (ликвационных участков).

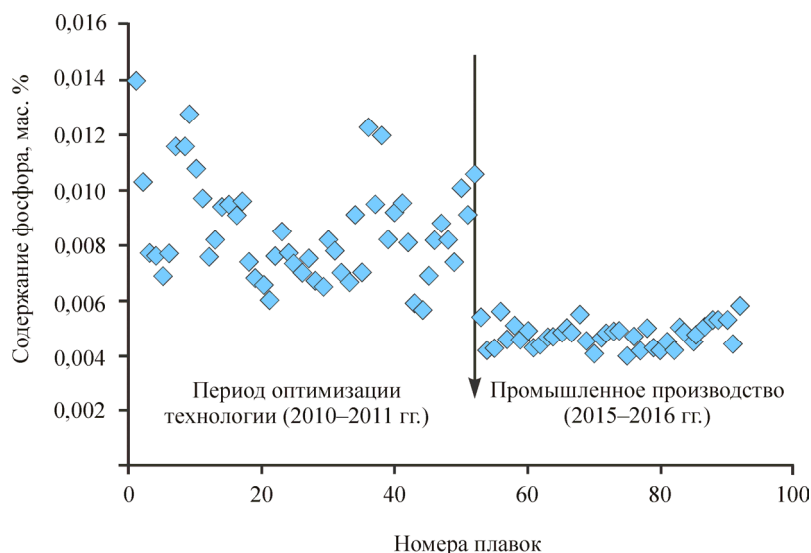


Рис. 2. Массовая доля фосфора в прокате ЛПК

С целью оценки влияния примесей цветных металлов и растворенных газов на величину поверхностного натяжения, плотности и кинематической вязкости проведены исследования физических свойств расплавов трубных сталей в Исследовательском центре физики металлических жидкостей Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Центр обладает комплексом установок для исследования структуры и физических свойств металлических расплавов, в том числе и установками для определения поверхно-

стного натяжения и плотности методом «большой» капли, а также кинематической вязкости методом затухающих колебаний тигля с расплавом.

Несмотря на увеличение количества экспериментальных и теоретических исследований, посвященных этим проблемам, многие вопросы, связанные с влиянием температуры на строение и свойства жидких металлов, продолжают оставаться дискуссионными. Например, отсутствуют ясные представления о механизме теплового расширения жидких металлов, о взаимосвязи их свойств с характеристиками ближнего порядка. Во многом продолжает оставаться нераскрытым влияние термовременной обработки в жидком состоянии многокомпонентных сплавов на их структуру ближнего порядка вблизи температуры кристаллизации.

Такая ситуация в значительной степени обусловлена тем обстоятельством, что данные по поверхностным и кинетическим свойствам для большинства жидких металлов получены в узком интервале значений температуры в отношении строго определенного химического состава расплава. Кроме того, выполненные подобные исследования, как правило, не сопровождались параллельным изучением свойств. В свою очередь, это затрудняет анализ взаимосвязи между строением жидких сплавов и их свойствами.

Известно, что металлические расплавы, особенно многокомпонентные и слабо перегретые над ликвидусом, представляют собой неравновесные термодинамические системы [5]. При исследовании поверхностного натяжения таких расплавов неравновесность может проявляться в виде следующих особенностей:

- нестабильность значений поверхностного натяжения во времени в ходе изотермической выдержки;
- несовпадение кривых нагрева и охлаждения на поллитерах;
- существенное различие абсолютных значений поверхностного натяжения у сплавов практически одинакового химического состава;
- аномальное возрастание значений поверхностного натяжения с увеличением температуры.

В условиях ЛПК выплавка полупродукта в дуговой печи является обязательной стадией получения металлопродукции. Ранее для многих сплавов была замечена зависимость свойств расплава от служебных характеристик твердых образцов, полученных из него [6]. Затвердевание из неравновесных состояний расплава приводит к худшим свойствам твердого металла. Повторное плавление таких твердых образцов вновь приводит к образованию неравновесного расплава. Таким образом, можно говорить о так называемой металлургической наследственности. Свойства хорошо подготовленного расплава зависят только от его химического состава и внешних условий, но не от предыстории. Они не меняются со временем. Иными словами, расплав должен быть равновесным.

Благодаря исследованию поверхностного натяжения, плотности и кинематической вязкости расплава можно определить условия, при которых расплав переходит в состояние равновесия. Эти условия предполагают определенный режим плавки: нагрев расплава до определенной температуры, выдержку и охлаждение до температуры разлива, по возможности пониженной. Воздействие на расплав в соответствии с таким режимом называется термовременной обработкой (ТВО). В промышленных условиях наиболее приемлемым способом перевода расплава в состояние равновесия чаще всего является его нагрев до определенной температуры, называемой критической t_k . В некоторых случаях достаточно нагрева до аномальной температуры $t_{ан}$.

Для исследования в лабораторных условиях кинематической вязкости и поверхностного натяжения жидкой стали были предоставлены образцы проб от проката и труб из среднеуглеродистой марки стали (22ГЮ). Прокат из стали марки 22ГЮ применяется с целью дальнейшего производства электросварных обсадных труб, которые, в свою очередь, поставляются для нефтедобывающих компаний и предназначены для обустройства нефтяных скважин.

Химический состав образцов, отобранных от экспериментальных плавов из стали марки 22ГЮ, приведен в таблице.

Химический состав образцов (массовые доли химических элементов, мас. %)

№ п/п	Химический элемент															
	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	Ni	Cu	Ti	Ca	Mo	Sn	Pb	As
1	0,21	0,25	0,82	0,008	0,001	0,024	0,007	0,05	0,07	0,17	0,002	0,001	0,01	0,007	0,001	0,0057
2	0,22	0,24	0,83	0,0111	0,0024	0,028	0,009	0,08	0,11	0,24	0,001	0,0014	0,01	0,0123	0,001	0,0066

Чтобы сравнить полученные результаты и оценить влияние присутствия цветных примесей на свойства расплава, были отобраны пробы от реальных плавок, выплавленных с различными вариантами шихтовки. Так, шихтовка первой плавки (образец № 1) состояла из 18 % твердого чугуна, 15 % горячебрикетированного железа (ГБЖ) и 67 % лома черных металлов (вариант «чистая шихта»). В то же время вторая плавка (образец № 2) шихтовалась 10 % твердого чугуна и 90 % лома черных металлов (вариант «грязная шихта»). Применение различных вариантов шихтовки в литейно-прокатном комплексе обусловлено требованиями заказчика к комплексу эксплуатационных свойств проката и труб, а также технико-экономическими показателями работы дуговой печи [3].

Методика эксперимента по изучению кинематической вязкости

Кинематическая вязкость – одно из наиболее информативных свойств металлических расплавов. Изменения, происходящие в металлическом расплаве в ходе изотермической выдержки или с изменением температуры, химического состава и других факторов, оказывают влияние на кинематическую вязкость расплава. В некоторых случаях при разработке технологических режимов важна справочная информация о значениях вязкости.

Для изучения вязкости металлических расплавов необходимо соблюдение следующих условий:

- качественное проведение всех вспомогательных операций (подготовка образцов, их правильная загрузка, взвешивание, измерение геометрии);
- поддержание температурных условий и чистоты атмосферы;
- измерение декремента затухания колебаний;
- расчет значений вязкости.

Первые две задачи выполняются с использованием стандартных средств: металлорежущего оборудования, измерительных и регулирующих приборов, вакуумной техники и др.

Для пересчета декремента затухания в вязкость разработано большое количество теоретических моделей и компьютерных программ [7, 8]. Следует отметить, что значения вязкости при пересчете по разным методикам могут отличаться. Кроме того, предложены разные методы расчета для различных температурных интервалов и соответствующих уровней вязкости расплавов, а также других условий эксперимента [9, 10]. При этом разработчиками этих методов пересчета, на наш взгляд, не учитывается тот факт, что во многих случаях задача определения абсолютных значений вязкости вторична, а главная задача пересчета декремента в вязкость состоит в сравнении значений вязкости образцов с разной массой, геометрией и плотностью.

В лабораторных условиях экспериментальные исследования производились на установке² [11] для измерения кинематической вязкости расплавов (рис. 3).

Установка состоит из следующих элементов:

- корпус установки – водоохлаждаемая вакуумная камера;

² Устройство для бесконтактного измерения вязкости высокотемпературных металлических расплавов: пат. на полезную модель № 69249 U1 / В.В. Вьюхин, В.В. Конашков, А.М. Поводатор, В.С. Цепелев. 2007. Бюл. № 34.

Устройство для исследования высокотемпературных металлических расплавов: пат. на полезную модель № 104721 / А.М. Поводатор, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев, В.В. Конашков. 2011. Бюл. № 14.

- система вакуумирования и напуска газа. Вакуумирование обеспечивается форвакуумным и диффузионным насосами до остаточного давления 10^{-3} мм рт. ст.;
- система нагрева и контроля температуры. В качестве регулятора используется прибор Т-424 фирмы «КонтрАвт» (Нижний Новгород), который обеспечивает регулировку температуры с точностью $\pm 0,5$ °С. Силовая часть состоит из трансформатора и блока тиристоров с фазовым управлением;
- система регистрации крутильных колебаний.

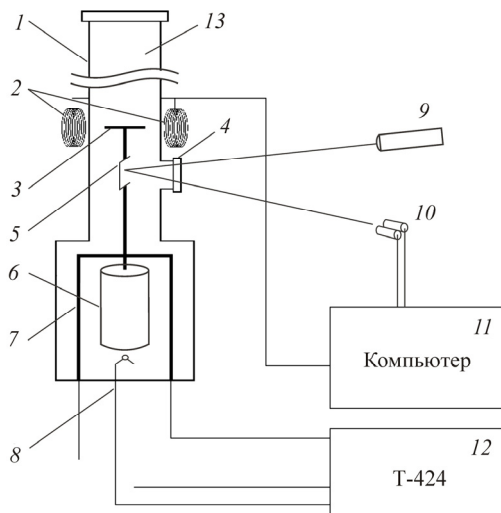


Рис. 3. Установка для измерения кинематической вязкости расплавов: *а* – схематическое изображение; 1 – водоохлаждаемая вакуумная камера; 2 – катушки разгона; 3 – якорь подвесной системы; 4 – окно камеры; 5 – зеркало подвесной системы; 6 – тигель с исследуемым расплавом; 7 – нагреватель; 8 – термопара; 9 – осветитель; 10 – фотоприемники; 11 – компьютер; 12 – терморегулятор Т-424; 13 – упругая нить; *б* – общий вид

Методика эксперимента по изучению поверхностного натяжения

Для проведения исследований была использована экспериментальная установка горизонтального типа (рис. 4). Металлический корпус печи 3 закреплен на специальной подставке. Внутри него размещен молибденовый нагреватель 8 с системой экранов.

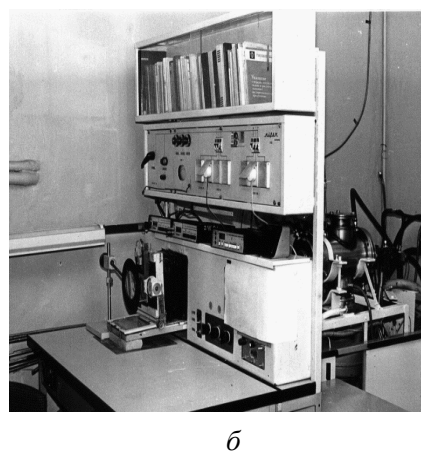
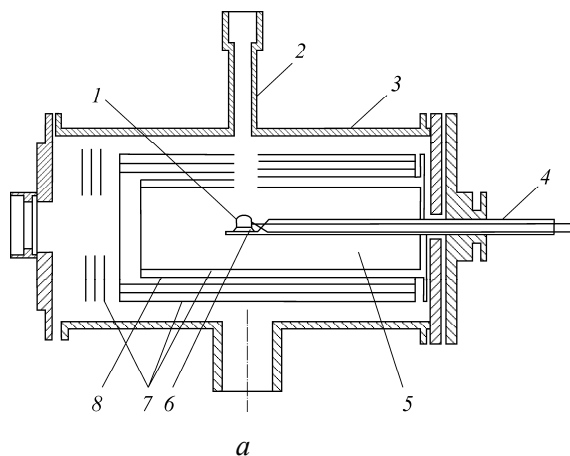


Рис. 4. Вакуумная установка для измерения поверхностного натяжения жидких металлов методом «лежащей» капли: *а* – схема установки; 1 – капля металла; 2 – вакуумный ввод для дозатора и активометра; 3 – корпус печи; 4 – шток; 5 – молибденовый наконечник; 6 – керамическая подложка; 7 – экраны; 8 – молибденовый нагреватель; *б* – общий вид

Один из торцевых фланцев имеет окно, защищенное просветленным стеклом для получения изображения капли металла на экране оптической системы. Через другой фланец в пространство печи рабочей камеры вводится штوك 4, оканчивающийся молибденовым стержнем 5 с горизонтальной площадкой для установки подложки 6 с исследуемым образцом 1.

Каплю металла проецировали на матовое стекло, размещенное на специальном подвижном столике. С помощью двух высокоточных датчиков измеряли необходимые параметры капли металла и по ним вычисляли плотность и поверхностное натяжение жидкого металла. Измерение размеров капли металла непосредственно на экране оптической системы позволило повысить точность эксперимента и обеспечить экспрессность данного метода определения σ .

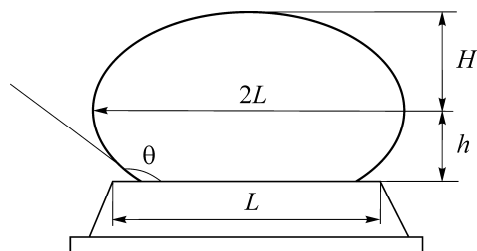


Рис. 5. Обмер изображения капли для расчета ее поверхностного натяжения

Расчет плотности и поверхностного натяжения проводили по данным о массе (M), форме, объеме (V) и площади капли. Для этого по изображению капли на матовом экране определяли диаметр капли ($2L$), высоту от экватора до вершины капли (H), высоту от экватора до уровня подложки (h) и угол смачивания (θ) (рис. 5).

Объем жидких капель, используемый для расчета плотности, находили по формулам и графикам, приведенным в работе [12]:

$$d = \frac{M}{\pi L^2 \left(H + h - \frac{H^3 + h^3}{2H^2} \right) + V_n}$$

Поверхностное натяжение рассчитывали по графикам, изображенным в работе [12], и таблицам, представленным в работе [13]. При расчете по графикам использовали формулу

$$\sigma = \frac{\Delta d g}{a},$$

где Δd – разность значений плотности металлической и газовой фаз; g – ускорение силы тяжести; a – величина, зависящая от L и H .

При расчете поверхностного натяжения по таблицам пользовались выражением

$$\sigma = (2L)^2 F^{-1} \Delta d g,$$

где F – безразмерная функция величины L/H , определяемая по таблице в работе [14].

Модернизация установки заключалась в использовании видеокамеры, сопряженной с компьютером, что позволяло с помощью специального пакета программ запоминать и обрабатывать цифровое изображение расплавленной капли.

Результаты экспериментов

Как известно [10, 15], политермы свойств многокомпонентных расплавов значительно отличаются от политерм чистых металлов. Они почти никогда не бывают монотонными, а тем более линейными. Для каждой марки сплава (стали) температурные зависимости имеют собственный характерный вид, который определен составом, исходными материалами, применяемыми при их производстве, а также спецификой производства.

В результате проведенного эксперимента построены и приведены для наглядного сравнения политермы, полученные при измерении кинематической вязкости и поверхностного натяжения на образцах двух плавок, выплавка которых производилась с применением различных видов шихтовых материалов.

Кинематическая вязкость

Сравнение двух образцов от плавок, выплавленных с использованием различных шихтовых материалов (так называемые чистая и грязная шихты) – рис. 6, показало более высокое значение кинематической вязкости при температуре 1600 °С у образца № 1 на «чистой» шихте – на одну единицу (рис. 6, *a*). Оба образца имеют отрицательный гистерезис вязкости. Наличие гистерезиса свидетельствует об исчезновении неравновесных неоднородностей, унаследованных от шихтовых материалов, и о необратимости этих процессов. Особенностью образца, изображенного на рис. 6, *a*, является довольно пологий участок при температуре 1550–1675 °С.

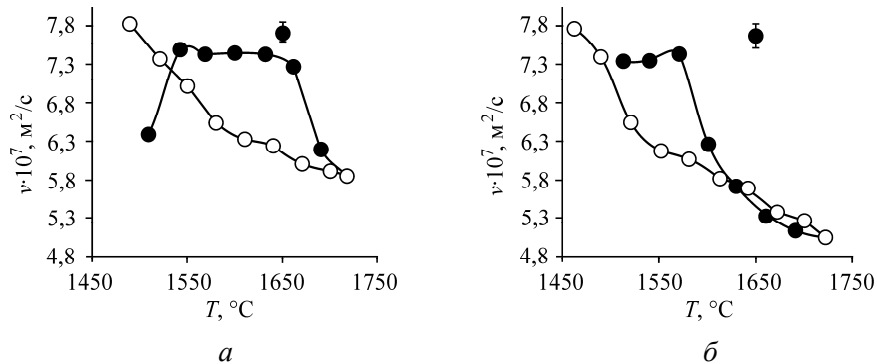


Рис. 6. Политермы кинематической вязкости: *a* – образец № 1 («чистая» шихта); *б* – образец № 2 («грязная» шихта) из стали 22ГЮ; ● – нагрев, ○ – охлаждение

Поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение у образца № 1 выше на 100 единиц по сравнению с образцом № 2 (рис. 7).

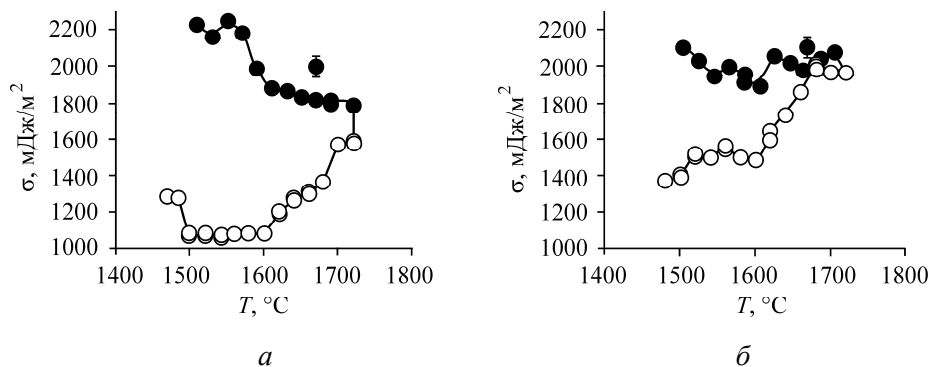


Рис. 7. Политермы поверхностного натяжения образцов: *a* – образец № 1 («чистая» шихта); *б* – образец № 2 («грязная» шихта) из стали 22ГЮ. Нагрев до температуры 1725 °С, ● – нагрев, ○ – охлаждение

Для проверки полученных результатов дополнительно проанализировано еще 20 образцов от реальных плавок, выплавленных в соответствии с текущими заказами в литейно-прокатном комплексе. Причем в анализируемый массив были включены как образцы от труб с удовлетворительными результатами механических испытаний (10 шт., диапазон «Удовл.»), так и образцы от труб, при испытании которых были получены неудовлетворительные результаты (10 шт., «Неудовл.»).

Анализ диаграмм дополнительных 20 исследуемых плавок показал (рис. 8), что в начальное время в ДСП процесс проведен выше на 26° (для плавок, показавших большее количество неудовлетворительных результатов механических испытаний сварного соединения).

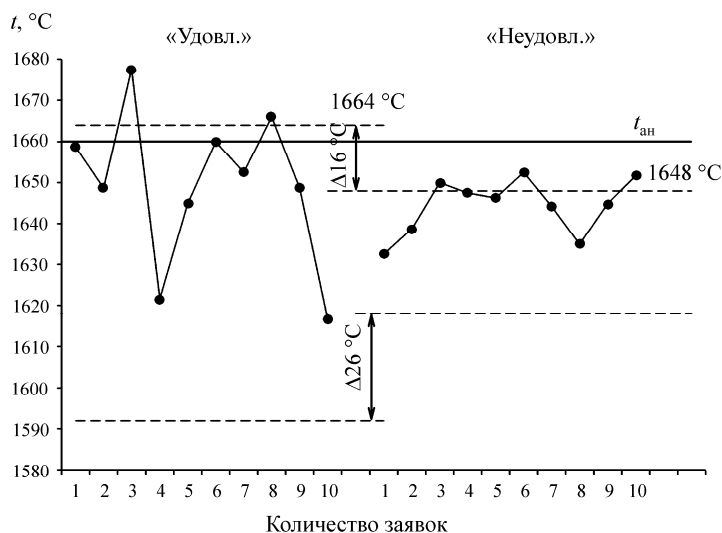


Рис. 8. Статистические диаграммы дополнительных образцов от 20 плавков трубной стали 22ГЮ: $t_{ан}$ – температура аномалии

Однако в итоге среднее значение максимальной температуры выплавки удовлетворительных плавков, несмотря на довольно значительный разброс, зафиксировано выше на 16° и составило 1664°C . Сплошной линией на рис. 8 нанесена температура аномалии $t_{ан}$ на политермах кинематической вязкости. Плавки с обозначением «Неудовл.» имеют среднее значение температуры в ДСП 1648°C .

На основании полученных экспериментальных данных даны следующие рекомендации: максимальный нагрев в печи ДСП до температуры 1670°C , выдержка 5–10 мин для гомогенизации расплава, выпуск плавки из печи.

Заключение

Впервые в условиях АО «Выксунский металлургический завод» проведена экспериментальная работа по исследованию физических свойств и структуры трубных сталей вблизи фазового перехода.

Исследованы температурные зависимости структурно-чувствительных свойств жидких сплавов на основе железа. На политерме нагрева выявлены особые точки и участки. Все построенные политермы характеризуются несовпадением ветвей нагрева и охлаждения (гистерезисом), что свидетельствует о неравновесности строения образцов после их расплавления. Нагрев системы до температуры аномалии $t_{ан}$ обеспечивает наличие стабильного гистерезиса и свидетельствует о многоэтапном переходе ее в состояние равновесия.

В результате проведенной работы получены новые экспериментальные данные о физических свойствах углеродистых расплавов на основе промышленных трубных марок стали (сталь марки 22ГЮ), произведенных в электродуговых печах. Изучено влияние шихтовых материалов на физические свойства расплавов. Измерены кинематическая вязкость и поверхностное натяжение промышленных расплавов трубных марок на основе железа в диапазоне значений температуры от ликвидуса с превышением на $100\text{--}200^\circ\text{C}$.

Даны рекомендации по дальнейшей температурной подготовке расплавов трубных марок на основе железа. При этом особую важность приобретает вопрос стойкости огнеупорной футеровки сталеразливочных ковшей в связи с более высокими значениями температуры выпуска плавки из дуговой печи.

Работа была поддержана в рамках научных исследований высших учебных заведений Российской Федерации по государственному заданию № 4.9541.2017/8.9.

Список литературы

1. Эфрон Л.И. *Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали.* – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.
2. Ламухин А.М., Дубинин И.В. Пуск литейно-прокатного комплекса и освоение производства высококачественного проката для электросварных труб // *Металлург.* – 2010. – № 1. – С. 38–44.
3. Освоение технологии внепечной обработки и разливки трубных сталей с требованием по стойкости в H₂S-средах в условиях литейно-прокатного комплекса / Д.В. Кудашов, Е.С. Мурсенков, П.П. Степанов [и др.] // *Металлург.* – 2017. – № 8. – С. 48–56.
4. Технологические особенности производства проката для электросварных труб на литейно-прокатном комплексе / А.М. Барыков, А.В. Червонный [и др.] // *Развитие технологий производства стали, проката и труб на Выксунской производственной площадке: сб. тр. / под общ. ред. А.М. Барыкова.* – М.: Металлургиздат, 2016. – С. 233–247.
5. Жидкая сталь / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов, Е.А. Клименков, Ю.А. Базин, Л.В. Коваленко, В.Б. Михайлов, Г.А. Распопова. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
6. Равновесные и неравновесные состояния металлических расплавов. Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов / Б.А. Баум., Г.В. Тягунов, Е.Е. Барышев, В.С. Цепелев. – М.: Академкнига, 2002. – С. 214–228.
7. Автоматизированная система определения кинематической вязкости расплавов / Д.В. Егоров, В.С. Цепелев, Г.В. Тягунов, С.В. Пастухов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 1998. – Т. 64, № 11. – С. 46–48.
8. Бельтюков А.Л., Ладьянов В.И. Автоматизированная установка для определения кинематической вязкости металлических расплавов // *Приборы и техника эксперимента.* – 2008. – № 2. – С. 155–161.
9. Бельтюков А.Л., Ладьянов В.И., Олянина Н.В. Об особенностях измерения вязкости металлических расплавов методом крутильных колебаний // *Расплавы.* – 2009. – № 6. – С. 19–27.
10. A computer-aided plant for studying the kinematic viscosity of high-temperature metallic melts / V.V. Konashkov, V.S. Tsepelev, V.V. V'yukhin, A.M. Povodator, A.I. Podol'skaya // *Instruments and Experimental Techniques.* – 2011. – Vol. 54, no. 2. – P. 284–285.
11. Установка для измерения кинематической вязкости металлических расплавов / Г.В. Тягунов, В.С. Цепелев, М.Н. Кушнир, Г.Н. Яковлев // *Заводская лаборатория.* – 1980. – № 10. – С. 919–920.
12. Хантадзе Д.В. Расчет объема лежащей капли // *Физика металлов и металловедения.* – 1963. – Т. 15, № 3. – С. 470–473.
13. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
14. Кошевник А.Ю., Кусаков М.М., Лубман Н.М. Об измерении поверхностного натяжения жидкостей по размерам лежащей капли // *Журнал физической химии.* – 1953. – Т. 27, № 12. – С. 1886–1890.
15. Цепелев В.С., Баум Б.А., Тягунов Г.В. Некоторые особенности политепм вязкости промышленных расплавов: аномалии, гистерезис, критические температуры // *Расплавы.* – 1998. – № 5. – С. 13–19.

References

1. Efron L.I. *Metallovedenie v «bol'shoi» metallurgii. Trubnye stali* [Metallurgical science in "big" metallurgy. Pipe steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p.
2. Lamukhin A.M., Dubinin I.V. *Pusk liteino-prokatnogo kompleksa i osvoenie proizvodstva vysokokachestvennogo prokata dlia elektrosvarnykh trub* [Start-up of a foundry and rolling complex and development of production of a high-quality hire for electrowelded pipes]. *Metallurg*, 2010, no. 1, pp. 38–44.
3. Kudashov D.V., Mursenkov E.S., Stepanov P.P. at al. *Osvoenie tekhnologii vnepechnoi obrabotki i razlivki trubnykh staley s trebovaniem po stoi-kosti v H₂S-sredakh v usloviiakh liteino-prokatnogo kompleksa* [Development of technology of extra oven processing and pouring pipe staly with the requirement for firmness in H₂S-environments in the conditions of a foundry and rolling complex]. *Metallurg*, 2017, no. 8, pp. 48–56.
4. Barykov A.M., Chervonny A.V. at al. *Tekhnologicheskie osobennosti proizvodstva prokata dlia elektrosvarnykh trub na liteino-prokatnom komplekse* [Technological features of production of a hire for electrowelded pipes on a foundry and rolling complex]. *Razvitie tekhnologii proizvodstva stali, prokata i trub na Vyksunskoi proizvodstvennoi ploschadke: sbornik trudov.* Ed. A.M. Barykova. Moscow: Metallurgizdat, 2016, pp. 233–247.
5. Baum B.A., Khasin G.A., Tiagunov G.V., Klimentov E.A., Bazin Iu.A., Kovalenko L.V., Mikhailov V.B., Raspopova G.A. *Zhidkaia stal'* [Melted steel]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 208 p.

6. Baum B.A., Tiagunov G.V., Baryshev E.E., Tsepelev V.S. Ravnovesnye i neravnovesnye sostoiianiia metallicheskikh rasplavov. Fundamental'nye issle-dovaniia fizikokhimii metallicheskikh rasplavov [Equilibrium and nonequilibrium conditions of metal fusions. Basic researches of a fizikokhimiya of metal fusions]. Moscow: Akademiya, 2002, pp. 214–228.

7. Egorov D.V., Tsepelev V.S., Tiagunov G.V., Pastukhov S.V. Avtomatizirovannaia sistema opredeleniia kinematicheskoi viazkosti rasplavov [The automated system of determination of kinematic viscosity of fusions]. *Zavodskaiia laboratoria. Diagnostika materialov*, 1998, vol. 64, no. 11, pp. 46–48.

8. Bel'tiukov A.L., Lad'ianov V.I. Avtomatizirovannaia ustanovka dlia opredeleniia kinematicheskoi viazkosti metallicheskikh rasplavov [The automated installation for determination of kinematic viscosity of metal fusions]. *Priboi i tekhnika eksperimenta*, 2008, no. 2, pp. 155–161.

9. Bel'tiukov A.L., Lad'ianov V.I., Olianina N.V. Ob osobennostiakh izmereniia viazkosti metallicheskikh rasplavov metodom krutil'nykh kolebaniia [About features of measurement of viscosity of metal fusions by method of torsional fluctuations]. *Rasplavy*, 2009, no. 6, pp. 19–27.

10. Konashkov V.V., Tsepelev V.S., V'yukhin V.V., Povodator A.M., Podol'skaya A.I. A computer-aided plant for studying the kinematic viscosity of high-temperature metallic melts. *Instruments and Experimental Techniques*, 2011, vol. 54, no. 2, pp. 284–285.

11. Tiagunov G.V., Tsepelev V.S., Kushnir M.N., Iakovlev G.N. Ustanovka dlia izmereniia kinematicheskoi viazkosti metallicheskikh rasplavov [Installation for measurement of kinematic viscosity of metal fusions]. *Zavodskaiia laboratoria*, 1980, no. 10, pp. 919–920.

12. Khantadze D.V. Raschet ob'ema lezhashchei kapli [Calculation of volume of the lying drop]. *Fizika metallov i metallovedeniia*, 1963, vol. 15, no 3, pp. 470–473.

13. Adler Iu.P., Markova E.V., Granovskii Iu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii [Planning of an experiment by search of optimum conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 279 p.

14. Koshevnik A.Iu., Kusakov M.M., Lubman N.M. Ob izmerenii poverkhnostnogo natiazheniia zhidkosti po razmeram lezhashchei kapli [About measurement of a superficial tension of liquids by the sizes of the lying drop]. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 1953, vol. 27, no. 12, pp. 1886–1890.

15. Tsepelev V.S., Baum B.A., Tiagunov G.V. Nekotorye osobennosti politerm viazkosti promyshlen-nykh rasplavov: anomalii, gisteresis, kriticheskie temperatury [Some features polyterm of viscosity of industrial fusions: anomalies, hysteresis, critical temperatures]. *Rasplavy*, 1998, no. 5, pp. 13–19.

Получено 12.12.2017

Об авторах

Сомов Сергей Александрович (Выкса, Россия) – начальник отдела по металлургическим процессам и технологиям ИТЦ АО «Выксунский металлургический завод»; e-mail: somov_sa@vsw.ru.

Цепелев Владимир Степанович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор, директор Исследовательского центра физики металлических жидкостей Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: v.s.tsepelev@urfu.ru.

Конашков Виктор Васильевич (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Исследовательского центра физики металлических жидкостей Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: vvK98005@gmail.com.

Вьюхин Владимир Викторович (Екатеринбург, Россия) – старший научный сотрудник Исследовательского центра физики металлических жидкостей Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: v.v.vyukhin@urfu.ru.

Таушканова Алиса Игоревна (Екатеринбург, Россия) – аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: a.i.taushkanova@urfu.ru.

About the authors

Sergey A. Somov (Vyksa, Russian Federation) – Head, Department for Metallurgical Processes and Technologies, ITC of the JSC “Vyksunsk Metallurgical Plant”; e-mail: somov_sa@vsw.ru.

Vladimir S. Tsepelev (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Research Center for the Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin; e-mail: v.s.tsepelev@urfu.ru.

Viktor V. Konashkov (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Research Center for the Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin; e-mail: vvK98005@gmail.com.

Vladimir V. Vyukhin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Senior Researcher, Research Center for the Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin; e-mail: v.v.vyukhin@urfu.ru.

Alisa I. Taushkanova (Ekaterinburg, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Life Safety, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin; e-mail: a.i.taushkanova@urfu.ru.