

## О ВЯЗКОСТИ ЖИДКИХ СПЛАВОВ КОБАЛЬТА С БОРОМ И КРЕМНИЕМ

ОЛЯНИНА Н. В., БЕЛЬТЮКОВ А. Л., ЛАДЬЯНОВ В. И.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,  
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

**АННОТАЦИЯ.** Проведено исследование влияния условий эксперимента на результаты измерения вязкости жидких сплавов системы Co–B методом крутильных колебаний. Показана возможность появления на температурной зависимости декремента затухания свободных крутильных колебаний тигля с расплавом особенностей, связанных с пленочными эффектами и явлениями смачивания. Определены условия эксперимента, исключающие влияние этих эффектов. Получены температурные зависимости вязкости жидких сплавов Co–B и Co–Si с содержанием второго элемента 11, 19 и 25 ат.%.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** расплав, Co–B, Co–Si, кинематическая вязкость, температурная зависимость вязкости, уравнение Аррениуса, концентрационная зависимость вязкости.

### ВВЕДЕНИЕ

Сплавы кобальта с бором и кремнием привлекают исследователей в связи с возможностью получения на их основе материалов с высокими эксплуатационными свойствами. В большей степени это аморфные и нанокристаллические сплавы с уникальными магнитными свойствами, перспективные для промышленного применения в качестве магнитомягких материалов [1]. Относительно недавно, показана возможность использования сплавов систем Co–B и Co–Si в качестве новых материалов для хранения и преобразования энергии [2, 3]. Сплавы системы Co–Si благодаря высокой прочности, термической стабильности и стойкости к окислению силицидов имеют также перспективы использования в качестве высокотемпературных конструкционных материалов и защитных покрытий [4].

Технологии получения большинства металлических материалов, в том числе аморфных, связаны с прохождением через жидкую фазу и при их разработке необходима информация об особенностях структуры и физико-химических свойств расплава. Данные по вязкости жидких сплавов, в частности, необходимы для развития теории и методов моделирования процессов стеклования, а также при разработке технологии получения аморфных сплавов [5]. Кроме этого измерения вязкости, как одного из наиболее структурно-чувствительных свойств, часто используются при изучении особенностей структурного состояния расплавов и межчастичного взаимодействия в них (например, [6]).

В жидком состоянии сплавы кобальта с бором и кремнием изучены мало, а имеющиеся данные – противоречивы. Исследованию вязкости расплавов Co–B посвящены работы [7–10]. Авторы работ [7–9] на температурных зависимостях вязкости наблюдали особенности в виде резких изменений значений в узких температурных интервалах и гистерезиса политерма, полученных при нагреве и последующем охлаждении. В работе [10] нами ранее были получены монотонные температурные зависимости вязкости жидких сплавов Co–B в режиме охлаждения. Применительно к системе Co–Si данные по вязкости расплавов весьма ограничены [11, 12]. В работе [11] на изотерме вязкости были обнаружены острые максимумы их значений при содержании кремния 33,3 и 50 % (здесь и далее содержание элементов в сплавах указано в ат. %) и отклонение политерма вязкости от аррениусовской зависимости, сопровождающееся резким снижением энергии активации вязкого течения при увеличении температуры. Однако политермы вязкости, полученные в работе [12], напротив не имеют каких-либо особенностей и хорошо описываются уравнением Аррениуса. Кроме этого в работах [12–15] было показано, что особенности

политерм вязкости расплавов Co–B и Co-Si могут возникать вследствие влияния на результаты измерений пленочных эффектов и явлений смачивания. Пленочные эффекты возникают при образовании или исчезновении на свободной границе расплава вязкой пленки [13 – 15], например, оксидной с участием продуктов взаимодействия образца с материалом тигля и газовой атмосферой. Влияние явлений смачивания проявляется в искривлении поверхности жидкости у стенок тигля [15, 16] и зависимости угла смачивания и формы мениска от температуры и состава поверхностных слоев [17].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований кинематической вязкости расплавов бинарных систем на основе кобальта с бором и кремнием. При этом особое внимание уделено влиянию условий эксперимента на результаты исследований с целью исключения проявлений пленочных эффектов и явлений смачивания.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Кинематическую вязкость ( $\nu$ ) расплавов измеряли методом крутильных колебаний в варианте Е.Г. Швидковского [18] на автоматизированной установке [19] с оптической системой регистрации. Измерения проводились в атмосфере гелия марки А, который напускался в рабочую камеру вискозиметра после её вакуумирования до давления  $10^{-2}$  Па с прогревом печи до  $1000$  °С. В качестве тиглей использовали цилиндрические стаканчики из  $Al_2O_3$  с внутренним диаметром  $\sim 17$  мм и высотой 42 мм.

С целью повышения достоверности получаемых данных, для расплавов обеих систем провели исследования влияния условий эксперимента на получаемые результаты. При этом было изучено влияние граничных условий на верхней границе расплава и режимов предварительной подготовки расплава на характер температурной зависимости вязкости.

Изучение влияния граничных условий заключается в сравнительном анализе температурных зависимостей декремента затухания свободных крутильных колебаний тигля с жидким образцом ( $\delta$ ) и вязкости расплава, полученных в опытах с одной (дно тигля) и двумя торцевыми поверхностями трения (дно тигля и крышка на поверхности расплава) [15]. В эксперименте с одной торцевой поверхностью верхняя граница расплава свободна. Для создания второй торцевой поверхности трения в тигель поверх образца устанавливали крышку из  $Al_2O_3$  с внешним диаметром на 0,4 – 0,6 мм меньше внутреннего диаметра тигля. Конструкция крышки [13] позволяет ей свободно перемещаться вдоль вертикальной оси тигля и двигаться вместе с ним при возникновении крутильных колебаний подвесной системы.

Предварительная подготовка расплава обычно заключается в гомогенизирующем переплаве образца с целью исключения влияния на результаты измерения необратимых процессов, обусловленных сплавлением исходных шихтовых материалов. В данной работе апробировано два режима предварительного переплава образца. Первый (стандартный) режим – переплав образца при существенном перегреве выше температуры ликвидуса сплава с последующим охлаждением до комнатной температуры. При его реализации образец нагревали до  $1650$  °С, выдерживали 20 мин, охлаждали до комнатной температуры, далее нагревали выше температуры плавления сплава и начинали измерения. Вторым режимом является перегрев расплава до температуры максимального нагрева, планируемой в цикле измерений, с последующим его охлаждением до завершения процесса кристаллизации без существенного переохлаждения ниже температуры солидуса. При реализации второго режима переплава в настоящей работе образец нагревали до  $1650$  °С, выдерживали 20 мин, охлаждали до температуры на  $100$  °С ниже температуры его затвердевания, выдерживали 20 мин, нагревали выше температуры ликвидуса сплава (до  $25$  °С) и далее проводили измерения температурной зависимости. Агрегатное состояние сплава (жидкое или твердое) определяли по значениям декремента затухания крутильных колебаний тигля с образцом.

Измерения температурной зависимости вязкости проводили в режимах нагрева до  $1700$  °С и последующего охлаждения до начала кристаллизации расплава с шагом  $15$  –  $25$  °С. Перед измерениями на каждой температуре проводили изотермические выдержки

5 – 10 мин. Значения декремента затухания, вязкости и погрешностей их определения вычисляли по методике, подробно изложенной в работах [19]. Значения плотности расплавов Co–B и Co–Si, необходимые для расчета вязкости, взяты из работ [20] и [21] соответственно. Общая относительная погрешность определения значений декремента затухания и вязкости не превышает соответственно 0,4 % и 4 %. Погрешность измерения вязкости в единичном эксперименте составляет не более 2 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние условий эксперимента на результаты измерений вязкости продемонстрировано на рисунках 1 – 4 на примере жидких сплавов системы Co–B.

На рис. 1 приведены температурные зависимости логарифмического декремента затухания крутильных колебаний тигля с образцом, полученные в опытах без крышки и с крышкой на верхней границе расплава. Из рис. 1 видно, что характер политерма  $\delta(t)$  зависит от граничных условий на верхней границе расплава. В опыте со свободной верхней границей расплава (без крышки) на политерме в режиме нагрева наблюдается две особенности (рис. 1, кривая 1): первая – относительно резкое уменьшение значений декремента в интервале 1430 – 1500 °С; вторая – небольшой рост  $\delta$  в области 1500 – 1550 °С. В опыте с крышкой на верхней границе расплава (рис. 1, кривая 2) на зависимости  $\delta(t)$  наблюдается только одна особенность в виде небольшого роста значений в интервале 1450 – 1500 °С. Различие политерма указывает на то, что резкое уменьшение значений декремента, наблюдаемое в опыте со свободной верхней границей расплава, является пленочным эффектом [13 – 15], вызванным удалением с поверхности расплава вязкой пленки. Вязкая, предположительно оксидная, пленка в процессе измерения выполняет роль второй торцевой поверхности трения и повышает значения декремента затухания крутильных колебаний тигля с расплавом. При удалении пленки происходит изменение граничных условий на верхней границе расплава, что и приводит к относительно резкому снижению значений декремента.

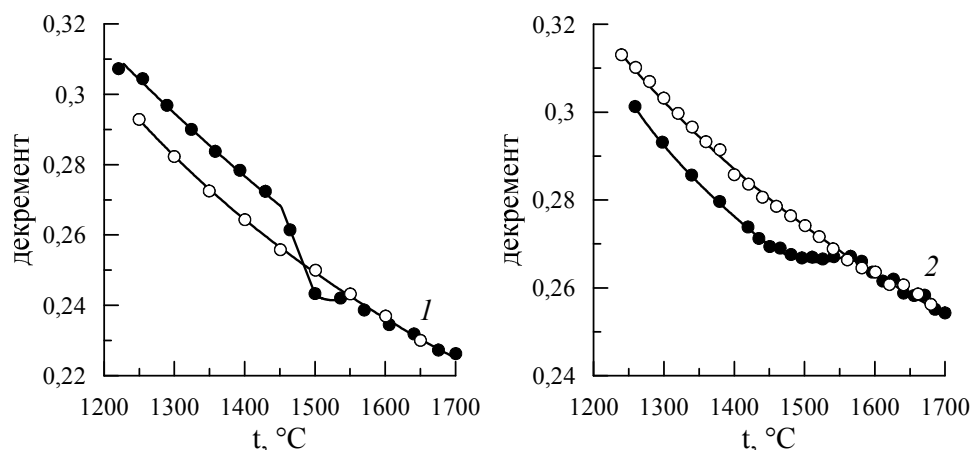


Рис. 1. Температурные зависимости декремента затухания крутильных колебаний тигля с жидким сплавом  $\text{Co}_{83}\text{B}_{17}$  в опытах без крышки (1) и с крышкой (2) на верхней границе расплава, где ● – нагрев, ○ – охлаждение

В ходе вискозиметрического эксперимента прямое наблюдение состояния поверхности расплава невозможно. Для подтверждения возможности образования на поверхности жидкого сплава оксидной фазы проведено наблюдение капли расплава, находящейся на плоской горизонтальной подложке, при нагреве в условиях эксперимента, близких к реализованным при вискозиметрии. На рис. 2 приведены фотоснимки капли расплава  $\text{Co}_{83}\text{B}_{17}$  на подложке из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученные при температурах ниже и выше температуры аномалии, наблюдаемой на политерме декремента затухания (~1450 °С). При нагреве капли от ликвидуса до ~1450 °С на поверхности расплава визуально наблюдаются крупные неметаллические включения, количество которых уменьшается при нагреве. Выше 1450 °С капля расплава имеет зеркально чистую поверхность.

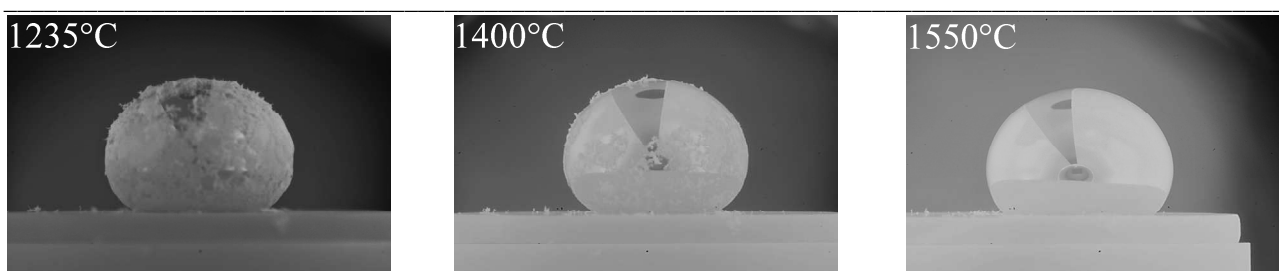


Рис. 2. Фотоснимки капли расплава  $\text{Co}_{83}\text{V}_{17}$  на горизонтальной подложке из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при различных температурах

Вторая особенность, наблюдаемая на политермах декремента затухания, в виде небольшого роста значений  $\delta$  в интервале  $1450 - 1500^\circ\text{C}$  (рис. 1), по нашему мнению, так же является методической. Данное заключение сделано на основе анализа температурных зависимостей декремента затухания, полученных при измерении вязкости с использованием тигля с крышкой различной массы (рис. 3). В этих экспериментах использовали крышки массой 3 и 6 г. В опытах с использованием относительно легкой крышки (масса  $\sim 3$  г) были получены температурные зависимости декремента затухания двух видов, которые приведены на рис. 3 (кривые 1 и 2). В режиме нагрева политермы практически совпадают, но в режиме охлаждения – различаются. В первом случае (рис. 3, кривая 1) в режиме охлаждения зависимость  $\delta(t)$  имеет монотонный характер, и гистерезис политерм сохраняется вплоть до кристаллизации образца. Во втором (рис. 3, 2) – на политерме охлаждения наблюдается перегиб, в результате которого значения  $\delta$  перед кристаллизацией совпадают со значениями, полученными в режиме нагрева.

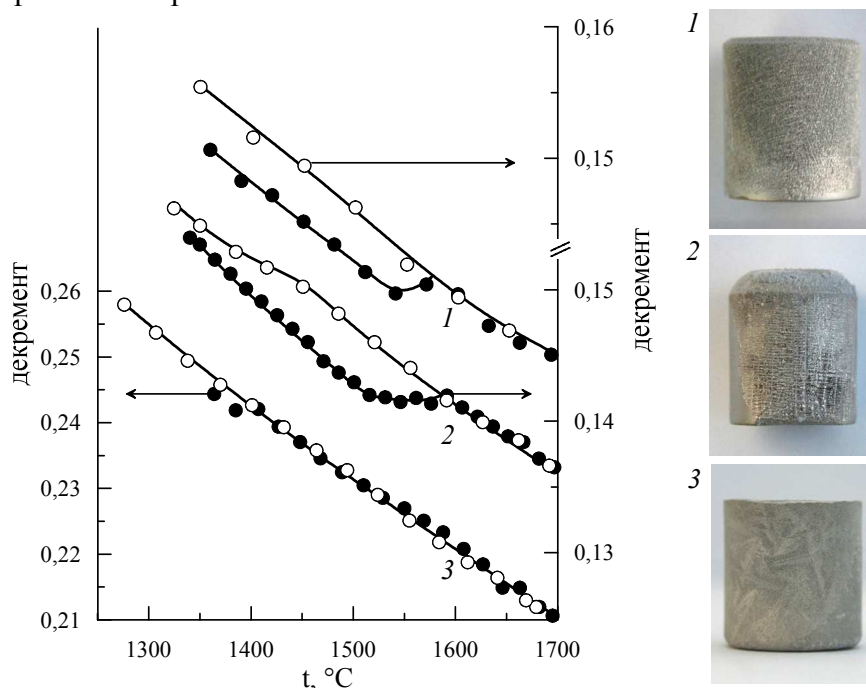


Рис. 3. Температурные зависимости декремента затухания тигля с расплавом  $\text{Co}_{91}\text{V}_9$  в опытах с крышкой и фотографии образцов после измерений: 1, 2 – масса крышки 3 г; 3 – масса крышки 6 г.

● – точки, полученные в режиме нагрева, ○ – в режиме охлаждения

Для данных опытов зафиксировано также различие формы слитков образцов, полученных после измерений (фотографии на рис. 3). В первом случае слиток имеет цилиндрическую форму с плоской верхней границей. Во втором – верхняя часть слитка имеет форму шарового слоя (шара усеченного двумя параллельными плоскостями), верхнее сечение которого является плоскостью касания образца и крышки. По виду слитка, можно полагать, что второй образец в жидком состоянии перед кристаллизацией не имел контакта с боковой стенкой вблизи крышки и частично крышкой по её периметру, образуя в этой зоне

мениск. В опыте с более тяжелой крышкой (масса ~ 6 г) температурные зависимости декремента затухания имеют монотонный характер без особенностей (рис. 3, кривая 3) и слиток образца после измерений имеет правильную цилиндрическую форму.

Образование мениска верхней границы расплава обусловлено плохим смачиванием жидким сплавом стенок тигля. Наличие мениска приводит к уменьшению площади контакта расплава боковой и верхней торцевой поверхностей и, как следствие, к занижению значений декремента затухания. Особенность политерм декремента затухания в виде небольшого роста значений  $\delta$  в интервале 1450 – 1500 °С (рис. 3, кривые 1 и 2) обусловлена увеличением площади контакта исследуемого расплава с тиглем и крышкой. Увеличение площади контакта при нагреве, может быть, вызвано изменением поверхностного натяжения расплава и условий смачивания в системе «расплав – тигель». В режиме охлаждения контакт расплава со стенками тигля и крышки может сохраняться вплоть до кристаллизации (рис. 3, кривая 1) либо может произойти частичный отрыв расплава от стенок (рис. 3, кривая 2).

Таким образом, при вискозиметрии методом крутильных колебаний для исключения влияния на результаты измерений явлений смачивания исследования необходимо проводить в условиях эксперимента, при которых во всем температурном интервале жидкий образец имеет цилиндрическую форму и находится в контакте с дном крышки и боковой стенкой тигля ниже уровня крышки.

На рис. 4 приведены температурные зависимости вязкости расплава  $\text{Co}_{81}\text{V}_{19}$ , полученные в опыте с крышкой массой 6 г, различающиеся режимами гомогенизирующего переплава образца перед измерением, которые подробно изложены ранее. Различия режимов переплава заключается в степени охлаждения образца между переплавом и началом цикла измерений. В первом случае образец охладили до комнатной температуры, во втором – на 100 °С ниже температуры его затвердевания.

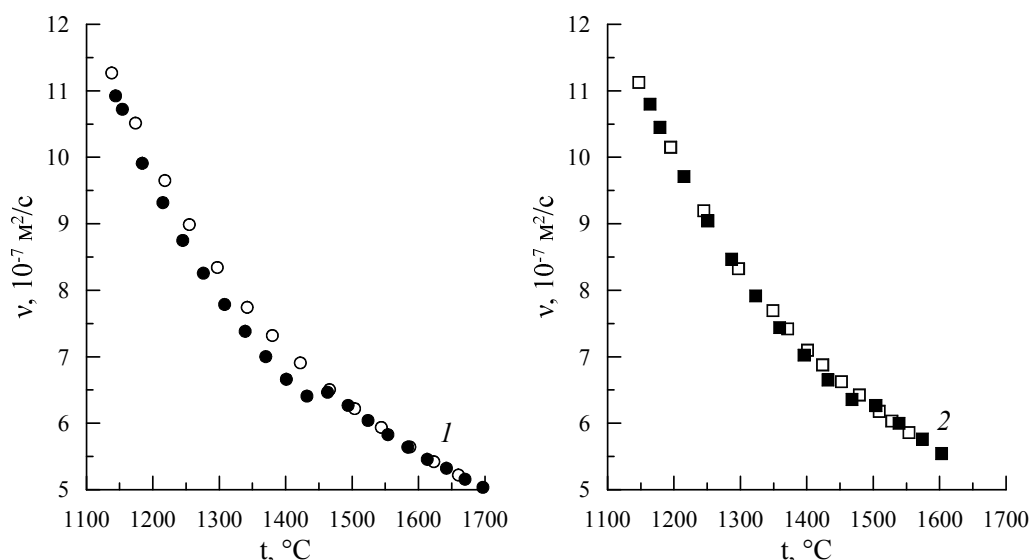


Рис. 4. Температурные зависимости вязкости расплава  $\text{Co}_{81}\text{V}_{19}$ , полученные в опытах с крышкой массой 6 г после переплава с охлаждением образца до комнатной температуры (1) и до 950 °С (2)

На первой политерме, приведенной на рис. 4, в режиме нагрева наблюдается небольшой перегиб, который хорошо воспроизводится при повторных циклах измерений (нагрев – охлаждение), при условии охлаждения образца между циклами до комнатной температуры. Кроме этого было замечено, что величина эффекта перегиба уменьшается с увеличением массы крышки. Наблюдаемый перегиб температурной зависимости вязкости, вероятнее всего, так же является следствием перехода от неполного контакта расплава стенок тигля к полному контакту. Его появление обусловлено тем, что масса используемой в опыте крышки недостаточна для придания верхней границе расплава плоской формы. Это, по-видимому, связано с ростом поверхностного натяжения расплава при увеличении содержания бора [22]. В режиме охлаждения контакт расплава со стенками тигля и крышки

сохраняется вплоть до кристаллизации, о чем свидетельствует монотонная температурная зависимость декремента затухания и, соответственно, вязкости. При охлаждении образца существенно ниже температуры плавления, в частности до комнатной температуры, из-за существенных различий коэффициентов термического расширения сплава и материала тигля происходит отрыв образца от стенок тигля. При последующем нагреве выше температуры плавления по периметру дна крышки вновь образуется зона поверхности расплава, не контактирующая со стенками тигля, и температурная зависимость декремента затухания повторяет политерму, полученную при предыдущем нагреве. При высокой адгезии расплава к материалу тигля этот процесс может приводить к разрушению внутренних стенок тигля [12], что так же оказывает влияние на результаты измерения вязкости. Применительно к сплавам системы Co–V после измерений вязкости образец свободно вынимался из тигля, и признаков разрушения стенок тигля не наблюдалось, что свидетельствует о низкой адгезии жидких сплавов Co–V к  $Al_2O_3$ .

Температурная зависимость вязкости расплава  $Co_{81}V_{19}$ , полученная после режима переплава исключаяющего существенное охлаждение образца ниже температуры его затвердевания (второй режим переплава), (рис. 4, кривая 2) имеет монотонный характер и хорошо описывается экспоненциальным уравнением Аррениуса [18]. Политермы нагрева и охлаждения совпадают между собой и хорошо согласуются с политермой охлаждения, полученной в опыте с первым режимом переплава образца (рис. 4, кривая 1). При реализации второго режима переплава, в связи с относительно малым переохлаждением сплава ниже температуры затвердевания, отрыва образца от стенок тигля не происходит и при последующем плавлении вся поверхность расплава контактирует с тиглем либо крышкой. Применение второго режима переплава позволяет полностью исключить влияние явлений смачивания на результаты измерения вязкости расплавов системы Co–V, что существенно повышает надежность получаемых данных. Эффективность применения данного режима переплава при измерении вязкости расплавов Co–Si показана ранее в работе [12].

Дальнейшие исследования температурных зависимостей вязкости расплавов систем Co–V и Co–Si проводили с использованием тиглей с крышкой массой 6 г и с реализацией второго режима переплава образца (рис. 5).

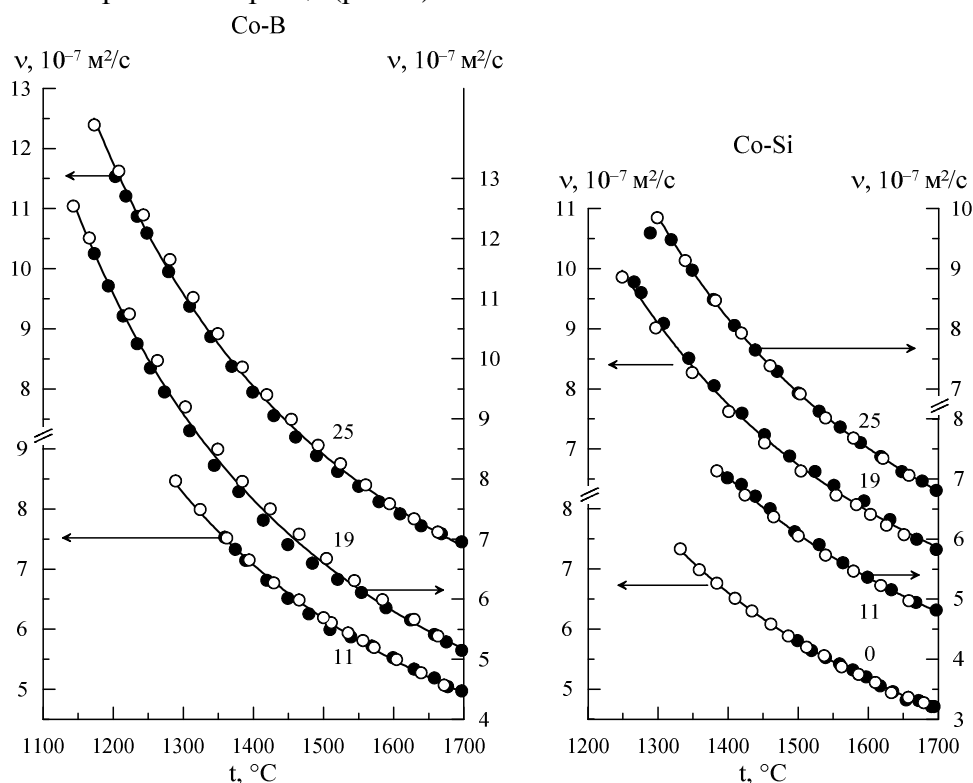


Рис. 5. Температурные зависимости вязкости расплавов бинарных систем Co–V и Co–Si.

Цифры у кривых соответствуют содержанию металлоида в ат.%.  
● – точки, полученные в режиме нагрева, ○ – в режиме охлаждения

Из рис. 5 видно, что для всех исследованных жидких сплавов при повышении температуры вязкость монотонно снижается. При этом значения, полученные в режимах нагрева и последующего охлаждения, совпадают в пределах погрешности эксперимента, т.е. гистерезис вязкости отсутствует. Зависимость вязкости от температуры для всех сплавов удовлетворительно описывается экспоненциальным уравнением Аррениуса.

По политермам определены значения вязкости при температуре 1600 °С, которые представлены на рис. 6 в виде зависимости вязкости от концентрации легирующего элемента совместно с литературными данными для расплавов бинарных систем Co–В [9, 10] и Co–Si [11, 12]. Из рис. 6 видно, что полученные в настоящей работе данные хорошо согласуются с изотермами, приведенными ранее в работах [10, 12]. Экстремальные зависимости вязкости от концентрации, полученные авторами работ [9, 11], не подтверждаются.

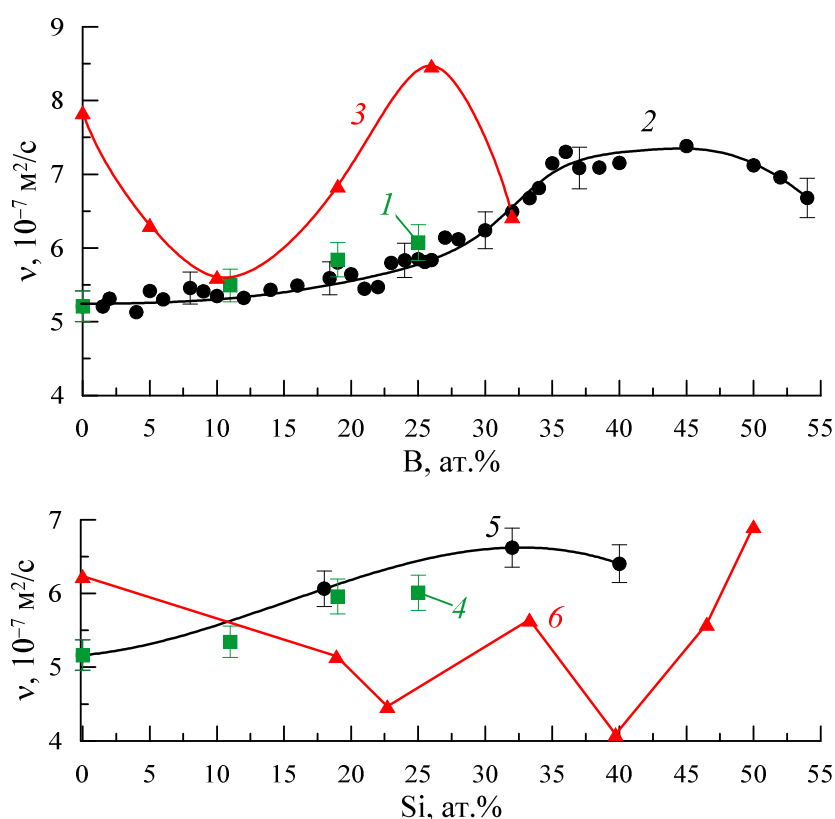


Рис. 6. Концентрационные зависимости вязкости расплавов Co–В и Co–Si при 1600 °С:

1, 4 – данные, полученные в настоящей работе;  
2 – данные работы [10]; 3 – [9]; 5 – [12]; 6 – [11]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе на примере жидких сплавов системы Co–В изучено влияние условий эксперимента на результаты измерения вязкости расплавов методом крутильных колебаний. Показана возможность появления на температурной зависимости декремента затухания свободных крутильных колебаний тигля с расплавом особенностей (методических), связанных с пленочными эффектами и явлениями смачивания тигля расплавом. Пленочные эффекты заключаются в резком изменении значений декремента в результате образования или исчезновения вязкой пленки на верхней границе расплава. Влияние явлений смачивания заключается в искривлении свободной поверхности жидкости у стенок тигля и изменении формы мениска при нагреве. При вычислении вязкости эти особенности приводят к появлению ложных аномалий на её температурной зависимости.

Для исключения влияния на результаты измерений пленочных эффектов и явлений смачивания исследования необходимо проводить в условиях эксперимента, при которых во всем температурном интервале жидкий образец имеет цилиндрическую форму и находится в контакте с дном крышки и боковой стенкой тигля ниже уровня крышки. Для реализации таких условий эксперимента возможно использование гомогенизирующего переплава образца перед циклом измерений с его охлаждением до завершения процесса кристаллизации, но без существенного переохлаждения.

Получены температурные зависимости вязкости расплавов бинарных систем Co–B и Co–Si с содержанием второго элемента 11, 19 и 25 ат. % при нагреве от ликвидуса до 1700 °C и последующем охлаждении. Для всех исследованных расплавов температурные зависимости вязкости, полученные в режимах нагрева и охлаждения, совпадают и хорошо описываются уравнением Аррениуса.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (№ гос. регистрации АААА-А17-117022250039-4).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yarmoshchuk Y. I., Nakonechna O. I., Semenko M. P., Zakharenko M. I. Magnetic and transport properties of Co–Si–B metallic glasses with complex dopants // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, vol. 367, pp. 15-18.
2. Wang Y., Lee J. M., Wang X. An investigation of the origin of the electrochemical hydrogen storage capacities of the ball-milled Co–Si composites // International Journal of Hydrogen Energy, 2010, vol. 35, iss. 4, pp. 1669-1673.
3. Qiu S., Huang J., Chu H., Zou Y., Xiang C., Yan E., Xu F., Sun L. The Co-B Amorphous Alloy: A High Capacity Anode Material for an Alkaline Rechargeable Battery // Metals, 2016, № 6, iss. 11, p. 269.
4. Novakovic R., Korthaus B. Advanced ceramics for use in highly oxidizing and corrosive environments: silicides // Key Engineering Materials, 2001, vol. 201, pp. 183-217.
5. Филонов М. Р., Аникин Ю. А., Левин Ю. Б. Теоретические основы производства аморфных и нанокристаллических сплавов методом сверхбыстрой закалки. М.: МИСИС, 2006. 328 с.
6. Mudry S., Korolyshyn A., Vus V., Yakymovych A. Viscosity and structure of liquid Cu–In alloys // Journal of Molecular Liquids, 2013, vol. 179, pp. 94-97.
7. Бранжовски Й., Срока М., Мачейовски И., Неуман А. Свойства сплавов, предназначенных для производства метастабильных и аморфных металлических материалов // Тезисы докладов I Советско-чехословацкого симпозиума по теории металлургических процессов. М., 1989, ч. 1, С. 4-11.
8. Konashkov V., Vyukhin V., Tsepelev V. Viscosity and Density of Co–B Liquid Fusions // Key Engineering Materials, 2016, vol. 705, pp. 209-213.
9. Конашков В. В., Цепелев В. С., Баум Б. А., Тягунов Г. В. Особенности вязкого течения жидких сплавов кобальта с бором // Расплавы. 2003. № 3. С. 9-13.
10. Олянина Н. В., Бельтюков А. Л., Ладьянов В. И. Вязкость расплавов системы Co–B // Расплавы. 2016. № 2. С. 165-175.
11. Баум Б. А., Кочеров П. В. Кинематическая вязкость расплавов систем Co–Si и Ni–Si // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 1968. № 6. С. 84-91.
12. Бельтюков А. Л., Олянина Н. В., Ладьянов В. И. Особенности измерения вязкости жидких сплавов Co–Si // Расплавы. 2017. № 6. С. 470-483.
13. Олянина Н. В., Бельтюков А. Л., Гончаров О. Ю., Ладьянов В. И. Влияние поверхностной пленки на результаты измерения вязкости расплава Co<sub>83</sub>B<sub>17</sub> методом крутильных колебаний // Расплавы. 2012. № 2. С. 83-90.
14. Гончаров О. Ю., Олянина Н. В., Бельтюков А. Л., Ладьянов В. И. Влияние температуры и примесей в газовой фазе на состав поверхностных слоев сплавов системы Co–B // Журнал физической химии. 2015. Т. 89. № 5. С. 842-848.
15. Бельтюков А. Л., Олянина Н. В., Ладьянов В. И. Особенности измерения вязкости металлических расплавов методом крутильных колебаний // Расплавы. 2016. № 2. С. 176-184.
16. Nunes V. M. B., Lourenco M. J. V., Santos F. J. V., Nieto de Castro C. A. The meniscus effect in viscosity determinations by the oscillating-cup method // High Temperatures – High Pressures, 2003/2004, vol. 35/36, no. 1, pp. 75-80.
17. Филонов М. Р., Аникин Д. Ю., Печеркин К. А. Закономерности взаимодействия расплавов Co–B и Fe–B с керамическими материалами // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2003. № 1. С. 64-66.



18. Швидковский Е. Г. Некоторые вопросы вязкости жидких металлов. М.: Гостехиздат, 1955. 208 с.
19. Бельтюков А. Л., Ладьянов В. И. Автоматизированная установка для определения кинематической вязкости металлических расплавов // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 2. С. 155-161.
20. Штернер С. Р., Довгопол С. П. Плотность, электросопротивление и ближний порядок расплавов Co–B и Ni–B // Украинский физический журнал. 1983. Т. 28. № 6. С. 858-861.
21. Гельд П. В., Гертман Ю. М. Плотности жидких сплавов кремния с кобальтом и никелем // Физика металлов и металловедение. 1961. Т. 12. № 1. С. 47-50.
22. Попель С. И. Поверхностные явления в расплавах. М.: Metallurgia, 1994. 440 с.

## VISCOSITY OF LIQUID ALLOYS OF COBALT WITH BORON AND SILICON

Olyanina N. V., Beltyukov A. L., Ladyanov V. I.

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

**SUMMARY.** The influence of the experimental conditions on the results of measuring the viscosity of melts by the method of an oscillating-cup method using the example of liquid alloys of the Co-B system have been studied in this work. The possibility of the appearance of features on the temperature dependence of the damping decrement of the torsional oscillations of the crucible with the melt associated with film effects and wetting phenomena of the crucible with the melt is shown. Film effects consist in a sharp change in the values of the decrement as a result of the formation or disappearance of a viscous film at the upper melt boundary. The effect of wetting phenomena is the curvature of the free surface of the liquid at the walls of the crucible and the change in the shape of the meniscus during heating. When calculating the viscosity, these features lead to the appearance of false anomalies on its temperature dependence. To eliminate the influence of film effects and wetting phenomena on the measurement results, the study should be carried out under experimental conditions, in which the liquid sample has a cylindrical shape over the entire temperature range and is in contact with the surface of the lid and the side wall of the crucible. To implement such experimental conditions, it is possible to use the following scheme: firstly, the homogenizing remelting of the sample; secondly, conducting a measurement cycle; thirdly, the crystallization of the sample, but without significant undercooling. The temperature dependences of the viscosity of the melts of the binary Co–B and Co–Si systems with a content of the second element of 11, 19 and 25 at.% were obtained upon heating from the liquidus to 1700 °C and subsequent cooling. For all melts studied, the temperature dependences of viscosity obtained in heating and cooling modes coincide and are well described by the Arrhenius equation.

**KEYWORDS:** melt, Co–B, Co–Si, kinematic viscosity, temperature dependence of viscosity, Arrhenius equation, concentration dependence of viscosity.

## REFERENCES

1. Yarmoshchuk Y. I., Nakonechna O. I., Semenko M. P., Zakharenko M. I. Magnetic and transport properties of Co–Si–B metallic glasses with complex dopants. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, vol. 367, pp. 15-18. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.04.078>
2. Wang Y., Lee J. M., Wang X. An investigation of the origin of the electrochemical hydrogen storage capacities of the ball-milled Co–Si composites. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, iss. 4, pp. 1669-1673. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.026>
3. Qiu S., Huang J., Chu H., Zou Y., Xiang C., Yan E., Xu F., Sun L. The Co–B Amorphous Alloy: A High Capacity Anode Material for an Alkaline Rechargeable Battery. *Metals*, 2016, № 6, iss. 11, p. 269. <https://doi.org/10.3390/met6110269>
4. Novakovic R., Korthaus B. Advanced ceramics for use in highly oxidizing and corrosive environments: silicides. *Key Engineering Materials*, 2001, vol. 201, pp. 183-217. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.201.183>
5. Filonov M. R., Anikin Yu. A., Levin Yu. B. *Teoreticheskie osnovy proizvodstva amorfnykh i nanokristallicheskiykh spлавov metodom sverkhbystroi zakalki* [Theoretical foundations for the production of amorphous and nanocrystalline alloys by the method of rapid quenching]. Moscow: MISIS Publ., 2006. 328 p.
6. Mudry S., Korolyshyn A., Vus V., Yakymovych A. Viscosity and structure of liquid Cu–In alloys. *Journal of Molecular Liquids*, 2013, vol. 179, pp. 94-97. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2012.12.019>
7. Branzhovsky Y., Sroka M., Macheyovski I., Neuman A. Svoystva spлавov, prednaznachennykh dlya proizvodstva metastabilnykh i amorfnykh metallicheskiykh materialov [Properties of alloys for the production of metastable and amorphous metallic materials]. *Tezisy dokladov I Sovetsko-chekhoslovatskogo simpoziuma po teorii metallurgicheskikh protsessov* [Abstracts of the reports of the 1st Soviet-Czechoslovak Symposium on the Theory of Metallurgical Processes]. Moscow, 1989, part 1, pp. 4-11.

8. Konashkov V., Vyukhin V., Tsepelev V. Viscosity and Density of Co–B Liquid Fusions // Key Engineering Materials, 2016, vol. 705, pp. 209-213. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.705.209>
9. Konashkov V. V., Tsepelev V. S., Baum B. A., Tyagunov G. V. Osobennosti vyazkogo techeniya zhidkikh splavov kobal'ta s borom [Characteristic properties tough flow of the cobalt-boron liquid alloys]. *Rasplavy* [Russian metallurgy (Metally)], 2003, no. 3, pp 9-13.
10. Olyanina N. V., Bel'tyukov A. L., Lad'yanov V. I. Viscosity of Co–B Melts. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, vol. 2016, no. 2, pp. 150-155. <https://doi.org/10.1134/S0036029516020105>
11. Baum B. A., Kocherov P. V. Kinematische vyazkost' rasplavov sistem Co–Si i Ni–Si [Kinematic viscosity of melts of Co–Si and Ni–Si systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*. [Russian Journal of Non-Ferrous Metals], 1968, no. 6. pp. 84-91.
12. Bel'tyukov A. L., Olyanina N. V., Lad'yanov V. I. Osobennosti izmereniya vyazkosti zhidkikh splavov Co-Si [Peculiarities of viscosity measuring of the Co-Si melts]. *Rasplavy* [Russian metallurgy (Metally)], 2017, no. 6, pp. 470-483.
13. Olyanina N. V., Bel'tyukov A. L., Goncharov O. Yu., Lad'yanov V. I. Vliyaniye poverkhnostnoi plenki na rezul'taty izmereniya vyazkosti rasplava  $Co_{83}B_{17}$  metodom krutil'nykh kolebanii [Influence of the surface film on the measurement results of viscosity of  $Co_{83}B_{17}$  melt by method of torsional vibrations]. *Rasplavy* [Russian metallurgy (Metally)], 2012, no. 2, pp. 83-90.
14. Goncharov O. Yu., Olyanina N. V., Bel'tyukov A. L., Lad'yanov V. I. Effects of temperature and gas phase impurities on the composition of Co-B alloy surface layers. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2015, vol. 89, no. 5, pp. 857-863. <https://doi.org/10.1134/S0036024415050143>
15. Bel'tyukov A. L., Olyanina N. V., Lad'yanov V. I. Torsional vibration measurement of the viscosity of a metallic melt. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, vol. 2016, no. 2, pp. 156-161. <https://doi.org/10.1134/S0036029516020026>
16. Nunes V. M. B., Lourenco M. J. V., Santos F. J. V., Nieto de Castro C. A. The meniscus effect in viscosity determinations by the oscillating-cup method. *High Temperatures – High Pressures*, 2003/2004, vol. 35/36, no. 1, pp. 75-80. DOI: 10.1068/htjr083
17. Filonov M. R., Anikin D. Yu., Pecherkin K. A. Zakonomernosti vzaimodeystviya rasplavov Co–B i Fe–B s keramicheskimi materialami [Regularities of the interaction of Co–B and Fe–B melts with ceramic materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [Russian Journal of Non-Ferrous Metals], 2003 no. 1, pp. 64-66.
18. Shvidkovskiy Ye. G. *Nekotoryye voprosy vyazkosti rasplavlennykh metallov* [Some questions of the viscosity of molten metals]. Moscow: Gostekhizdat Publ., 1955. 208 p.
19. Bel'tyukov A. L., Lad'yanov V. I. An automated setup for determining the kinematic viscosity of metal melts. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, vol. 51, no. 2, pp. 304-310. <https://doi.org/10.1134/S0020441208020279>
20. Shterner S. R., Dovgopol S. P. Plotnost', elektrosoprotivleniye i blizhniy poryadok rasplavov Co–B i Ni–B [Density, electrical resistance, and short-range order of Co–B and Ni–B melts] *Ukrainskiy fizicheskiy zhurnal* [Ukrainian Physical Journal], 1983, vol. 28, no. 6, pp. 858-861.
21. Gel'd P. V., Gertman Yu. M. Plotnosti zhidkikh splavov kremniya s kobal'tom i nikel'em. [Density of liquid alloys of silicon with cobalt and nickel]. *Fizika Metallov i Metallovedenie* [Physics of Metals and Metallography], 1961, vol. 12, no. 1, pp. 47-50.
22. Popel S. I. *Poverkhnostnyye yavleniya v rasplavakh* [Surface phenomena in melts] Moscow: Metallurgy Publ. 1994. 440 p.

---

Олянина Наталья Владимировна, младший научный сотрудник, НЦ металлургической физики и материаловедения УдмФИЦ УрО РАН, тел. +7(3412)21-65-66, e-mail: [oljanina@udman.ru](mailto:oljanina@udman.ru)

Бельтюков Анатолий Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, НЦ металлургической физики и материаловедения УдмФИЦ УрО РАН, тел. 8(912)7470704, e-mail: [albeltyukov@udman.ru](mailto:albeltyukov@udman.ru)

Ладьянов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, руководитель Научного центра металлургической физики и материаловедения УдмФИЦ УрО РАН, тел. +7(3412)21-65-77, e-mail: [vilad@udman.ru](mailto:vilad@udman.ru)