

## ВНЕДРЕНИЕ В ЖИДКИЙ РАСПЛАВ ТВЕРДЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ\*

*А.В. Рябов, А.М. Панфилов, Н.С. Семенова*

Разработана методика исследования поведения легкоплавких элементов и графита при введении в металлический расплав. Экспериментально изучен характер процесса внедрения висмутовых и графитовых шариков в стальной расплав методом рентгенотелевизионного наблюдения.

*Ключевые слова: висмут, графит, металлический расплав, рентгенотелевизионная аппаратура.*

В настоящее время в сталеплавильном производстве используют известный технологический прием по введению легирующих элементов, например висмута, в процессе разлива стали. Но высокая упругость пара, низкая растворимость висмута и сложность его введения в сталь, неустойчивость достигаемых результатов его усвоения и, следовательно, получаемого при легировании эффекта [1–3] требуют исследования поведения висмута в жидком расплаве при помощи прямого наблюдения, что может быть сделано при помощи рентгенотелевизионной системы регистрации. В данной работе исследовано поведение висмута и, для сравнения, графита при введении их в металлический расплав в виде твердых сферических образцов. Работа выполнена на кафедре теории металлургических процессов Института материаловедения и металлургии Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Для реализации опытов использовали высокотемпературную установку с рентгенотелевизионной системой наблюдения. Установка включает высокотемпературную печь с контролируемой атмосферой, рентгеновский аппарат для просвечивания материалов, преобразователь рентгеновского излучения в видимый диапазон и высокочувствительную монохромную телевизионную камеру [4].

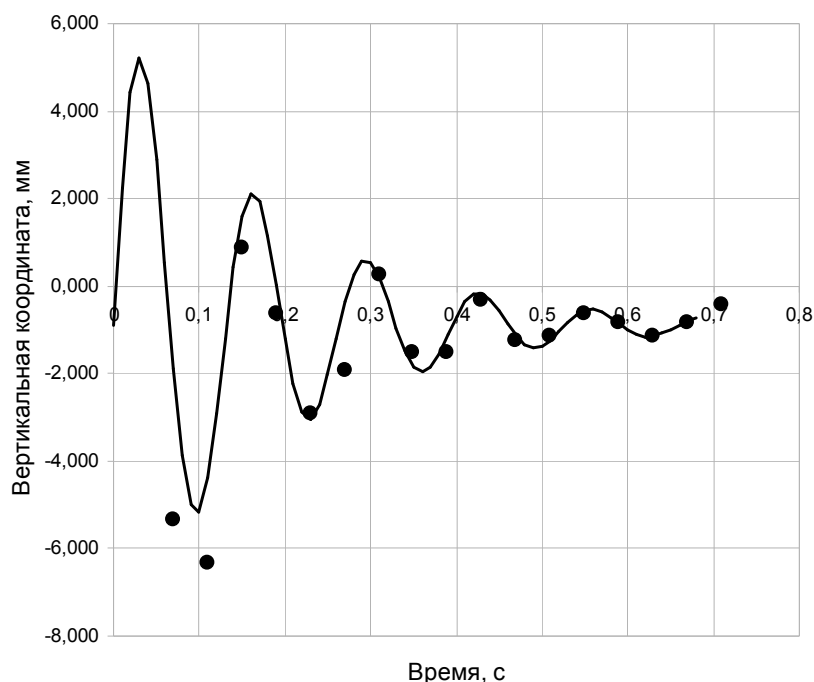
Объектом исследования являлась сталь марки 40Х, навеску которой помещали в корундовый тигель высотой 95 мм с поперечным сечением прямоугольной формы 40×15 мм, установленный в графитовой подставке. Непосредственно в дно тигля упирался горячий спай термодпары, запрессованный в вольфрамовую таблетку для улучшения контакта с ячейкой. Сверху в тигель было вставлено устройство для направления образцов-шариков, состоящее из корундовой трубки, прикрепленной к металлическому кольцу. Конструкция для подачи образцов в направляющее устройство имела роторный тип. Барабан поворачивается на некоторый угол, освобождая шарик, который

падает в расплав. Всего было использовано семь образцов, которые последовательно сбрасывались из холодной зоны печи в находящийся в тигле при температуре 1525 °С стальной расплав с исходной массой 76 г. Во время проведения эксперимента применялась цифровая система наблюдения и записи рентгенотелевизионных изображений с размером элемента изображения 0,1273 мм с 256 градациями серого и частотой до 30 кадров в секунду.

Из-за различия в размере и массе образцы при внедрении в расплав обладали кинетической энергией, различающейся почти на порядок величины. Скорости всех образцов при внедрении в расплав были близки, их расчетные значения составляли несколько меньше 2 м/с. Естественно, наименьшей кинетической энергией (1,1...1,2 мДж) обладали графитовые образцы. Их падение в расплав возбуждало колебательные движения поверхности с начальной амплитудой около 7 мм, частотой 7,5 Гц и временем релаксации 190 мс. Очевидно, что в этом процессе участвовал весь объем металла, а его характеристики определялись свойствами стали, размером и формой тигля и присутствием на поверхности металла графитового образца. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведено описание результатов покадровых измерений вертикальной координаты точки на поверхности металла в центре тигля периодическим процессом с указанными параметрами.

После полного растворения образца в стали граница расплава переместилась вверх в среднем на  $0,37 \pm 0,02$  мм. Результат получен усреднением координат 20 точек на границе расплава до внедрения образца и такого же количества точек после его растворения. Если считать, что произошло эквидистантное перемещение границы без изменения ее формы, то изменение объема стали меньше, чем объем образца, на 30 %. Такой результат можно трактовать как свидетельство отрицательных уклонов молярного объема раствора от идеальности. В литературе известны результаты измерений плотности раствора Fe–C, которые свидетель-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-00638.



**Рис. 1. Описание колебаний поверхности стали после падения графитового образца массой 0,72 г со скоростью 1,8 м/с. Точки – результаты обмера рентгенотелевизионного изображения**

ствуют о знакопеременных изменениях этой величины [5], но область отрицательных отклонений существенно уже интервала изменения содержания углерода в нашем опыте. Возможно, здесь сказалось влияние других компонентов раствора, в частности висмута. Такой же эффект наблюдался и на втором образце, для которого разница составила 20 %.

Кинетическая энергия висмутовых образцов превышала таковую графитовых в 2–8 раз. Они сразу проникали вглубь расплава, не сказываясь на колебаниях поверхности. Естественно, что начальная амплитуда существенно возросла – до 20 мм и более, а частота и время релаксации несколько увеличились – до 7,8 Гц и 230 мс соответственно. Эти результаты менее точны, поскольку при таких энергиях в слитке стали наблюдаться и поперечные волны. Следует иметь в виду также, что первый висмутовый образец был сброшен до графитовых, а остальные сбрасывали в металл, близкий по углероду и, видимо, по висмуту к насыщению.

Первый образец был самым маленьким, массой чуть больше одного грамма, и продемонстрировал специфические эффекты. Во-первых, он захватил при внедрении пузырек газа, оторвавшийся от него вблизи дна тигля. Во-вторых, через некоторое время после внедрения, примерно 0,2 с, когда образец успел нагреться и значительная часть его расплавилась, а конвективные потоки еще сохраняли достаточную интенсивность, весь образец или его расплавившуюся часть вынесло на поверхность стального расплава. Это можно уверенно утверждать, поскольку застывший слой висмута обнаружили на поверхности слитка после опыта, а

во время опыта наблюдали характерное изменение формы границы раздела. На рис. 2 приведены координаты нескольких точек на поверхности расплава до и после сбрасывания образца.

На рис. 2 хорошо видно, что с появлением висмута правая часть границы раздела оказалась поднята относительно левой. Единственной возможной причиной такого стабильного состояния поверхности является различие в смачивании сталью различных участков корундового тигля с прямоугольным сечением в горизонтальной плоскости.

Эти наблюдения можно проиллюстрировать и рентгенотелевизионными изображениями. Часть из представленных на рис. 3 изображений получена как результат вычитания градаций одной и той же точки на двух соседних кадрах. На таком изображении особенно отчетливо выявляются области, на которых плотность существенно изменилась за счет перемещения объектов. При этом изображения неподвижных объектов, например, стенок тигля, исчезают.

Хорошо видно, что на поверхности стального расплава появился участок с очень низким поверхностным натяжением, что характерно для жидкого висмута. Поверхностные эффекты реализуют условия, благодаря которым тонкий слой висмута удерживается на поверхности стали, несмотря на его более высокий удельный вес и все возмущения, вызванные падением последующих образцов. Это возможно, когда сумма поверхностного натяжения висмута и его межфазного натяжения на границе со сталью меньше поверхностного натяжения стали, и замена одной границы двумя оказывается энергетически выгодной.

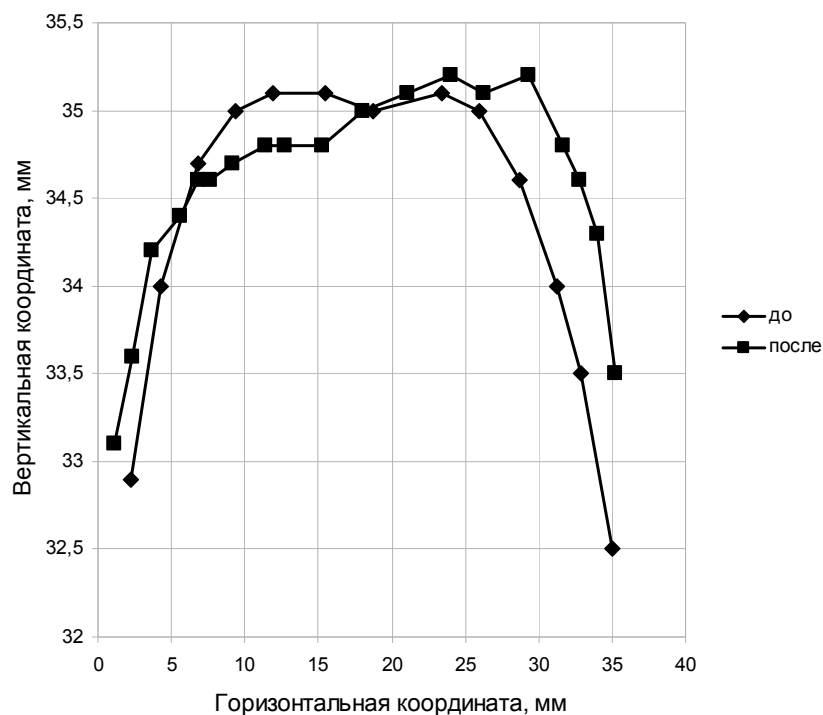


Рис. 2. Изменение формы границы раздела стального расплава с газом после выноса на поверхность висмута

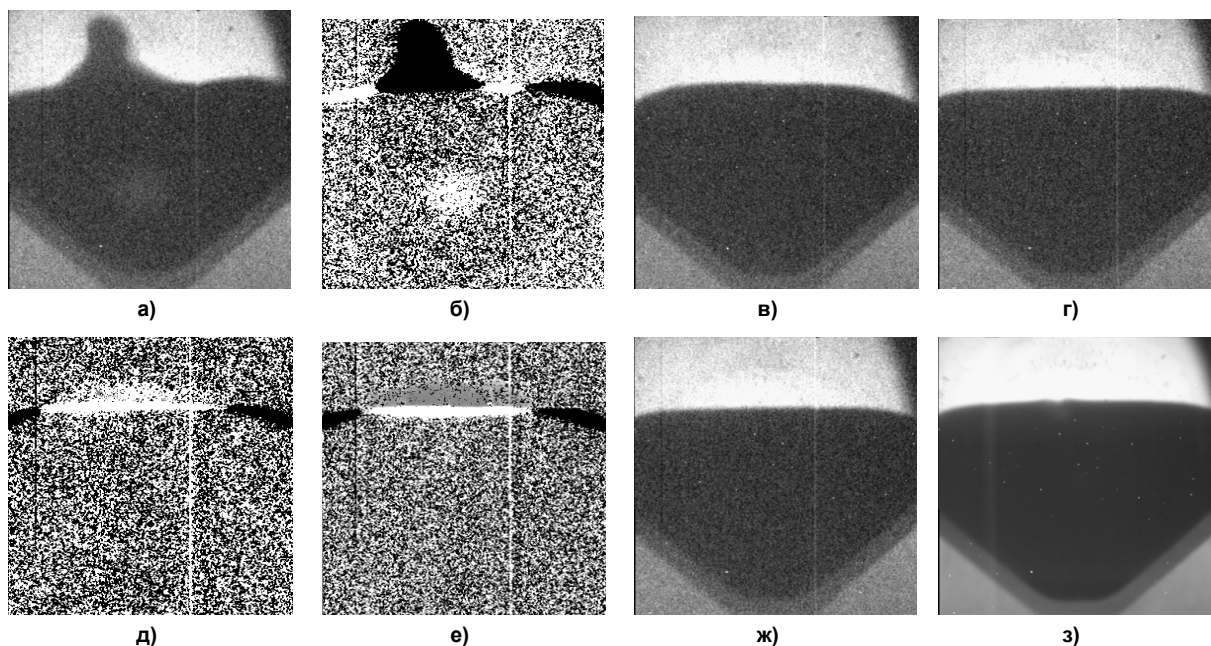


Рис. 3. Изображения исходные (а, в, г, ж, з) и полученные вычитанием из исходного усредненного изображения по всем кадрам до проведения опытов (б, д, е): газовый пузырек в объеме металла через 80 мс после внедрения первого висмутового образца массой 1,1 г (а, б); металл в тигле до внедрения первого висмутового образца (в); металл в тигле через 5 с после внедрения висмутового образца (г, д); граница раздела металл–газ через 0,56 с (е), 5 с (ж) и 4,5 мин (з) после сбрасывания первого висмутового шарика

Захват газового пузырька при внедрении твердого сферического образца в сталь затем повторился на последнем образце, близком по размеру к первому. На трех других образцах существенно большего размера эффект не наблюдался. Таким образом, можно констатировать, что для захвата газового пузырька внедряющейся в стальной рас-

плав сферической частицей ее кинетическая энергия не должна превышать 4 мДж.

Оцениваемые по перемещению границы с газом изменения объема расплава для трех образцов, сброшенных после графитовых, в противоположность последним оказались больше, чем объемы образцов. Превышение составляло от 6 до 30 % от

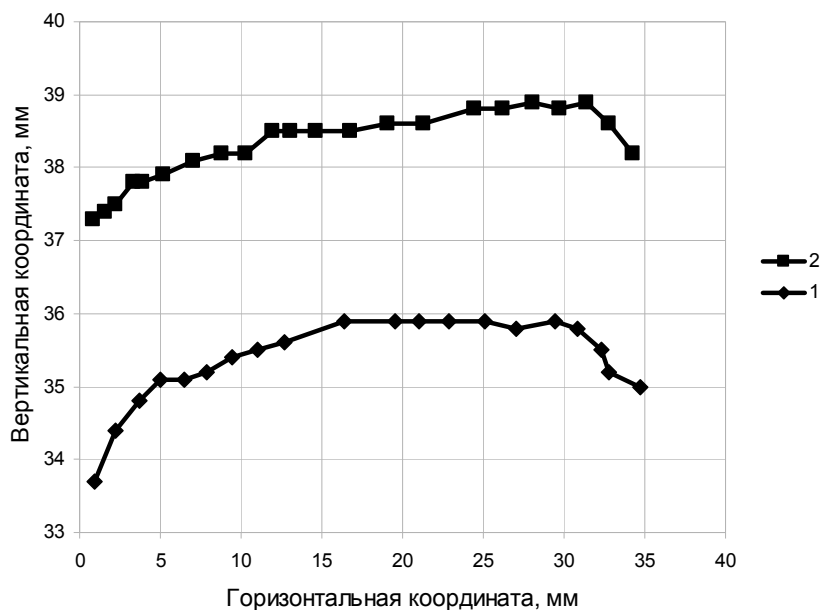


Рис. 4. Перемещение границы раздела расплава с газом после внедрения четырех висмутовых образцов: 1 – исходное положение; 2 – конечное положение

объема образцов. Для двух самых маленьких образцов такую оценку не делали. Следует иметь в виду, что уже первый висмутовый образец насытил стальной расплав, и последующие только увеличивали количество второй жидкой фазы на основе висмута. Возможно, наше наблюдение означает, что многокомпонентный висмутовый раствор имеет положительные отклонения от идеальности по молярному объему.

Рис. 4 иллюстрирует перемещение верхней границы трехфазной жидкометаллической системы, включающей расплав на основе висмута на дне тигля, стальной расплав и слой расплава на основе висмута на поверхности стального расплава после внедрения четырех висмутовых образцов совокупной массой 12,7 г.

Следует иметь в виду, что оценки изменения объема по положению верхней границы могут иметь существенную систематическую погрешность, поскольку допущение об эквидистантном перемещении границы выполняется не вполне строго, так как на рис. 4 видно, что форма границы раздела несколько изменилась. Еще большая погрешность может возникнуть при перераспределении температурного поля в поддерживающем тигель штоке, изготовленном из разнородных материалов, при постоянной температуре расплава, поддерживавшейся системой автоматического регулирования весьма точно.

Обе указанные причины должны приводить к завышению вычисленного изменения объема расплава. Но даже с учетом этого обстоятельства, по видимому, можно утверждать, что потери массы слитка в нашем опыте не наблюдалось. Это означает, что заметного испарения висмута при темпе-

ратуре примерно на 10 °С ниже температуры кипения чистого висмута (1560 °С) не происходило. На записях рентгенотелевизионных изображений не наблюдались всплывающие через стальной расплав пузырьки газа, кроме тех, которые были захвачены при внедрении двух образцов, о чем говорилось выше.

### Выводы

1. Получены новые экспериментальные данные о внедрении висмута и графита в жидкий расплав, полезные для прогнозирования и оценки их поведения при выплавке и разливке стали.

2. При внедрении в стальной расплав твердых сферических металлических частиц, обладающих кинетической энергией менее 4 мДж, может происходить захват газового пузырька с последующим его всплыванием и удалением из расплава.

3. При температуре 1520 °С кипение насыщенного сплава Вi–Fe–C–Cr–Si не наблюдается даже при пониженном до 0,8 атм давлении гелиевой атмосферы.

4. Сумма поверхностного натяжения сплава на основе висмута и его межфазного натяжения со сталью 40Х меньше поверхностного натяжения стали, благодаря чему попавший на поверхность стального расплава по случайным причинам висмутовый расплав не тонет и не удаляется с нее даже при очень интенсивном перемешивании.

5. Из результатов прямых измерений следует, что с увеличением содержания углерода в стали наблюдаются отрицательные отклонения от идеальности по молярному объему, а с увеличением количества висмута в расплаве на его основе – положительные.

### Литература

1. Alternatives to lead as a machinability enhancer in free cutting steels / P. Reynolds, V. Block, I. Essel, F. Klocke // *Steel Research International*. – Dec. 2007. – Vol. 78, iss. 12. – P. 908–914.

2. Рябов, А.В. Распределение висмута в автоматной стали / А.В. Рябов, Д.Я. Поволоцкий, В.В. Рябов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2002. – № 9. – С. 23–25.

3. Рябов, А.В. Автоматные стали с висму-

том. Особенности производства / А.В.Рябов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – 140 с.

4. Установка для измерения вязкости оксидных расплавов методом Стокса / А.М. Панфилов, Н.С. Лямкина, А.И. Сотников, А.А. Зиновкин // *Приборы и техника эксперимента*. – 2002. – № 1. – С. 147–149.

5. Андронов, В.Н. Жидкие металлы и шлаки / В.Н. Андронов, Б.В. Чекин, С.В. Нестеренко. – М.: Металлургия, 1977. – 127 с.

**Рябов Андрей Валерьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры общей металлургии, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте; avrmetall@ya.ru.

**Панфилов Александр Михайлович**, канд. техн. наук, доцент кафедры теории металлургических процессов Института материаловедения и металлургии, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург); amp@mtf.ustu.ru.

**Семенова Наталья Сергеевна**, канд. хим. наук, доцент кафедры теории металлургических процессов Института материаловедения и металлургии, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург); lyamkinans@gmail.com.

Поступила в редакцию 24 марта 2014 г.

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series “Metallurgy”**  
**2014, vol. 14, no. 1, pp. 19–23**

---

## INTRODUCTION OF SOLID SPHERICAL PARTICLES INTO THE LIQUID MELT

**A.V. Ryabov**, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russian Federation, avrmetall@ya.ru,

**A.M. Panfilov**, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation, amp@mtf.ustu.ru,

**N.S. Semenova**, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation, lyamkinans@gmail.com

A new method to study the behaviour of low-melting-point elements and graphite introduced to the metal melt is developed. The process of the introduction of bismuth and graphite balls to molten steel is studied experimentally by means of X-ray television observation.

*Keywords: bismuth, graphite, metal melt, X-ray television facilities.*

### References

1. Reynolds P., Block V., Essel I., Klocke F. Alternatives to Lead As a Machinability Enhancer in Free Cutting Steels. *Steel Research International*, 2007, vol. 78, no. 12, pp. 908–914. doi: 10.2374/SRI07SP030-78-2007-908.

2. Ryabov A.V., Povolotskii D.Ya., Ryabov V.V. Bismuth Distribution in Free-Cutting Steel. *Steel in Transition*, 2002, vol. 32, no. 9, pp. 49–52.

3. Ryabov A.V. *Avtomatnye stali s vismutom. Osobennosti proizvodstva* [Free-Cutting Steels with Bismuth. Production Features]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2009. 140 p.

4. Panfilov A.M., Lyamkina N.S., Sotnikov A.I., Zinovkin A.A. A Unit for Measuring Viscosity of Oxide Melts by the Stokes Method. *Приборы и техника эксперимента* [Instruments and Experimental Techniques], 2002, no. 1, pp. 147–149. (in Russ.)

5. Andronov V.N., Chekin B.V., Nesterenko S.V. *Zhidkie metally i shlaki* [Liquid Metals and Slags]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 127 p.

Received 24 March 2014