

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ МЕТАЛЛА ШВА И СВАРОЧНЫХ ШЛАКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДИАПАЗОНЕ 100...1000 °С\*

*М.Н. ИГНАТОВ, доктор техн. наук, профессор*  
*А.М. ИГНАТОВА, канд. техн. наук, ассистент*  
*С.В. НАУМОВ, аспирант*  
*(ПНИПУ, г. Пермь)*  
*Е.Е. КОРНИЕНКО, канд. техн. наук, доцент*  
*А.Ю. ЧУМАЧЕНКО, аспирант*  
*(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 3 сентября 2012 года

**Наумов С.В.** – 614000, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», e-mail: NaumovStanislav@yandex.ru

Работа посвящена исследованию зависимостей теплофизических свойств, элементного и фазового составов сварочных шлаков и металла шва. Доказано при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии и дилатометрии, что при нагреве и охлаждении сварочного шлака происходят теплофизические реакции, которые влияют на коэффициенты теплового расширения сварочных шлаков и на отделяемость шлаковой корки в целом.

**Ключевые слова:** дилатометрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, термический анализ, растровая электронная микроскопия, коэффициент теплового расширения, сварочные материалы, металл шва, сварочный шлак.

Одним из важнейших показателей сварочно-технологических свойств сварных соединений является отделяемость шлаковой корки от металла сварного шва. Именно этот параметр приводит к образованию таких отрицательных дефектов, как подрезы и неравномерное формирование шва. Кроме того, это сказывается и на времени сварщика, которое он затратил на зачистку сварного шва, что сильно отражается на производительности [1–2].

Однако проблемы, связанные с использованием альтернативного сырья как заменителя традиционных дефицитных компонентов, возникают чаще, чем с тем же традиционным минеральным сырьем в производстве сварочных материалов. Различия в химическом и минеральном составе, в теплофизических характеристиках альтернативного и традиционного сырья приводят к ухудшению сварочно-технологических свойств, как правило, из-за недостаточно апробированных разработок. Кроме того, в настоящее время нет точных комплексных данных отделяемости шлаковой корки с металла сварного шва от теплофизических свойств, минерального и химического состава сварочных шлаков.

Для решения изложенных проблем необходимо проводить комплексные исследования минерально-сырьевой базы, сварочных материалов и сварных соединений на современном технологическом оборудовании. Исследование и прогнозирование сварочно-технологических свойств разрабатываемых сварочных материалов на стабильность горения и эластичность дуги, формирование сварного шва и отделяемость шлаковой корки является актуальной задачей в сварочном производстве.

Цель работы заключается в исследовании коэффициентов термического расширения металла шва и сварочных шлаков от температуры в диапазоне 100...1000. °С для определения благоприятной отделяемости шлаковой корки от металла сварного шва.

Разрабатываемые сварочные материалы, а именно сварочные флюсы, получают плавлением горных пород Пермского края в графитовых или шамотных тиглях при помощи электрической дуги. Основными горными породами для получения лабораторных образцов являются габброиды Урала, которые получили

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.0136.

**Химический оксидный состав образцов из габбро-диабаз Ломовского месторождения, горнблендита по ГОСТ 2642.0-86 – 2642.15-97 и сварочного флюса АН-348А по ГОСТ 9087-81**

| Материал      | Содержание компонентов, % |                  |                                |                                      |       |       |        |                                      |                                |                  |                  |      |
|---------------|---------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|--------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|------|
|               | SiO <sub>2</sub>          | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO   | MgO   | CaO    | K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaF <sub>2</sub> | S <sub>общ</sub> | п.п. |
| Габбро-диабаз | 48,6                      | 4,4              | 12,4                           | 8,6                                  | 0,2   | 3,7   | 8,3    | 3,5                                  | –                              | –                | < 0,03           | –    |
| Горнблендит   | 47,3                      | 2,3              | 12,5                           | 14,3                                 | –     | 8,3   | 9,5    | 2,1                                  | 0,5                            | –                | –                | 3,2  |
| АН-348А       | 40–44                     | –                | ≤ 6,0                          | 0,5–2,0                              | 31–38 | ≤ 7,0 | ≤ 12,0 | –                                    | –                              | 3–6              | 0,12             | –    |

первичную перспективную оценку пригодности и доступности в производстве сварочных материалов [3].

Объектом исследования служат горные породы Урала, а именно габбро-диабаз Ломовского месторождения Пермского края и горнблендит, образующиеся при добыче строительных материалов из месторождений Урала. Кроме того, для сопоставительного анализа коэффициентов термического расширения переплавленные в процессе сварки горные породы в сварочные шлаки сравниваются с аналогичным по шлаковой системе сварочным флюсом АН-348А (табл. 1).

При исследовании физико-химических процессов, происходящих в сварочных шлаках на примере образца габбро-диабаз в температурном диапазоне 100...1300 °С, применена дифференциальная сканирующая калориметрия на следующем оборудовании: NETZSCH STA 409 PC/PG Luxx для нагрева на низких скоростях. Первоначально было исследовано поведение образца габбро-диабаз при медленном нагреве. Температурный диапазон испытания 20...1300 °С при нагреве и 1300...600 °С при охлаждении (рис. 1).

Пики при температуре 557 и 604 °С фиксируют процессы поглощения тепла, которые сопровождаются разрушением кристаллической решетки слоистого силиката  $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_6(\text{Si}, \text{Al})_{4-10}(\text{OH}, \text{O})_8$ . При температуре 816 °С было зафиксировано изменение ДСК с экзотермическим эффектом с широким интервалом. Одновременно с этим эффектом было зафиксировано изменение массы на 0,68 %, что позволяет объяснить данный процесс, как термическое

разложение и удаление связанных летучих элементов из материала. При температуре 1112 °С зафиксировано разрушение цепочного силиката  $\text{Al}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ . Пики при температуре 1186 и 1224 °С фиксируют момент разрушения кристаллических минеральных соединений  $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$  и  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ . Данная последовательность описывает поэтапные процессы разрушения химических связей в структурных составляющих, сопровождающееся их разложением на более простые минеральные соединения и выделением энергии, определен минимальный уровень температуры плавления сырья, равный 1150 °С.

Отсутствие каких-либо пиков на диаграмме охлаждения свидетельствует о том, что все нестабильные соединения разлагаются под воздействием температуры или переходят в более стабильное состояние при плавлении, структура материала упорядочивается и упрощается, что характерно для образования пироксеновой структуры [4].

В заключение по проведенному термическому анализу можно сказать, что на сварочно-технологические свойства сварочных материалов влияют такие теплофизические свойства, как температура плавления флюса (1350...1400 °С), температура стеклования (на термограмме охлаждения в диапазоне 1160,6...1170,2 °С), протекание при нагреве экзо- и эндотермических реакций, соответствующих разрушению тех или иных минеральных составляющих. Эти теплофизические характеристики в основном влияют на формирование сварного шва и на стабильность горения дуги. Чем меньше пики на диаграмме, тем стабильнее процесс сварки и, как следствие, благоприятнее форма шва, тем лучше отделяемость шлаковой корки. Учитывая влияния доли летучих компонентов при термическом разложении сварочных материалов, было выявлено, что в результате нагрева суммарная потеря веса образца составила 3,05 %, из которых на долю летучих пришлось 0,98 % от общей массы образца. Низкое выделение летучих компонентов положительно сказывается на стабильности горения и эластичности дуги.

Однако недостаточно определить теплофизические свойства стеклования и газовую составляющую при плавлении сварочных шлаков с помощью термического анализа для полноценного прогнозирования

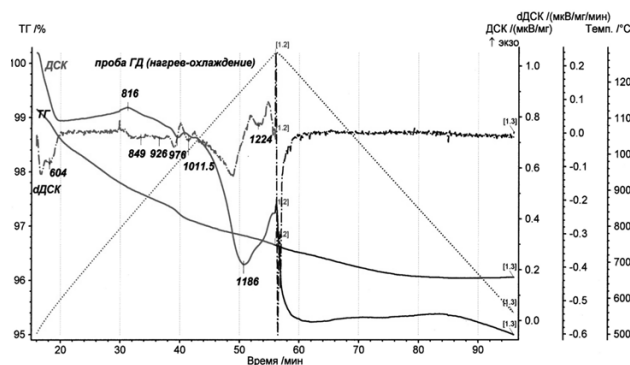


Рис. 1. Термограмма нагрева и охлаждения при скорости нагрева 30 °С/мин

Таблица 2

Коэффициент линейного теплового расширения стали 25,  $\alpha_{Me} \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  [6]

| Марка стали | Температура, $^{\circ}\text{C}$ |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|-------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
|             | 20–100                          | 20–200 | 20–300 | 20–400 | 20–500 | 20–600 | 20–700 | 20–800 | 20–900 | 20–1000 |
| Сталь 25    | 12,2                            | 13,0   | 13,7   | 14,4   | 14,7   | 15,0   | 15,2   | 12,7   | 12,4   | 13,4    |

ния сварочно-технологических свойств сварочных материалов. Одним из основных методов прогнозирования отделяемости шлаковой корки от металла сварного шва является метод дилатометрии, позволяющий определить коэффициент температурного расширения металла шва и сварочных шлаков [5].

Проведение дилатометрии позволит дополнить прогнозируемую оценку сварочно-технологических свойств сварных соединений и разрабатываемых сварочных материалов из минерального сырья Пермского края. Для исследования коэффициентов термического расширения шлаковых корок использован дилатометр NETZSCH DIL 402C. Образцы, вырезанные из сварочных шлаков разрабатываемых флюсов и АН-348А, имеют размеры  $4 \times 4 \times 20$  мм, диапазон нагрева 20...1000  $^{\circ}\text{C}$ , скорость нагрева 10  $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , скорость охлаждения 30  $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ .

Полученные результаты дилатометрии сварочных шлаков приведены на рис. 3. Коэффициенты линейного теплового расширения  $\alpha$  образцов сварочных шлаков сопоставлены с металлом сварного шва стали 25. Известно по справочным данным, что металл шва имеет такой  $\alpha$ , как приведено в табл. 2.

Из рис. 2 видно, что наиболее высокой отделяемостью шлаковой корки обладает сварочный флюс из горнблендита, имеющий наибольшее отклонение  $\alpha$  от  $\alpha_{Me}$  ( $\alpha = 1,19\text{--}1,61 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  в области температур 20...1000  $^{\circ}\text{C}$ ), где по РД 03-613-03 «Порядок применения сварочных материалов при изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции технических устройств для опасных производственных объектов: Технологический регламент проведения аттестации сварочных материалов» был определен максимальный балл – 5. Шлак отделяется после сварки без дополнительного механического воздействия. Однако

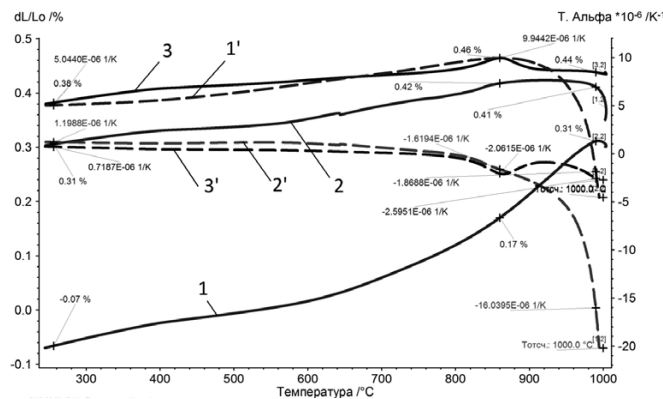


Рис. 2. Термограмма дилатометрии сварочных шлаков в диапазоне температур 20...1000  $^{\circ}\text{C}$ :

1 – шлак габбро-диабаз; 2 – шлак горнблендита; 3 – шлак АН-348

флюс из габбро-диабаз имеет 4–5 баллов, хорошую отделяемость шлаковой корки, которая отделяется при незначительном механическом воздействии. Это объясняется тем, что значения  $\alpha$  на всех интервалах температур более близки к  $\alpha_{Me}$  ( $\alpha = 5,04\text{--}9,94 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  в области температур 20...1000  $^{\circ}\text{C}$ ). Сварочный флюс АН-348А обладает, как и флюс на основе горнблендита, высокой оценкой по отделяемости шлаковой корки ( $\alpha = 0,71\text{--}2,59 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  в области температур 20...1000  $^{\circ}\text{C}$ ).

Таким образом, благодаря исследованиям коэффициентов линейного теплового расширения можно достичь наилучшей оценки по отделяемости шлаковой корки и проводить корректировку химического состава на стадии апробации сварочных материалов. Например, кварц и слюда будут эффективно понижать  $\alpha$  ( $0,7\text{--}3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), известняк и оксид алюминия незначительно понижают, мрамор в зависимости от  $\alpha = 5,5\text{--}14,1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , марганец повышает  $\alpha = 22 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .

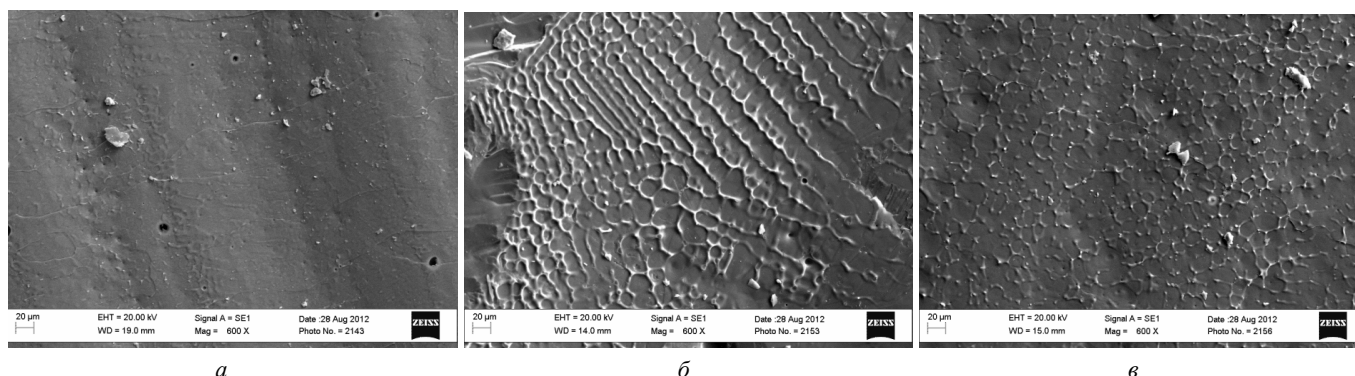


Рис. 3. Поверхность шлаковой корки со стороны сварного шва,  $\times 600$ :

а – флюса АН-348А; б – флюса из габбро-диабаз; в – флюса из горнблендита

В подтверждение полученным данным дилатометрии для поверхностной диагностики сварочных шлаков проведена растровая электронная микроскопия на оборудовании Carl Zeiss EVO50 XVP. Для проведения исследований взяты образцы после наплавки под флюсом с целью получения плотного и беспористого сварочного шлака при осуществлении следующего режима:  $I = 550 \text{ А}$ ,  $V_{\text{св}} = 55 \text{ см/мин}$ ,  $U = 30 \text{ В}$  (рис. 3).

Исходя из рис. 3 видно, что сварочный шлак флюса АН-348А имеет небольшую волнистость и возможные микроскопические газовые поры диаметром до 10 мкм, поверхность гладкая и шлаковая корка хорошо отделяется с поверхности сварного шва. Однако сварочный шлак габбро-диабазы имеет большую шероховатость по сравнению с АН-348А (рис. 3, б), шлаковая корка отходит несамостоятельно из-за этого, но легко отделяется, количество газовых пор на поверхности шлака ниже, чем у АН-348, что подтверждается ранее проведенной дифференциальной сканирующей калориметрией [7]. Большой интерес вызывает сварочный шлак флюса на основе горнблендита (рис. 3, в). Мелкая чешуйчатость и шероховатость поверхности, мелкие газовые поры размером до 2-3 мкм говорят о высокой отделяемости шлака с поверхности сварного шва, что подтверждается отделением сварочного шлака с поверхности шва без механического воздействия.

### Выводы

Установлено, что протекающие теплофизические реакции в сварочных шлаках в процессе сварки влияют на сварочно-технологические свойства сварного соединения и сварочных материалов. Чем меньше выделяется энергии и более пологая форма экзо- и

эндотермических реакций на термограммах нагрева и охлаждения при плавлении сварочного флюса, тем стабильнее процесс сварки, благоприятнее форма шва и лучше отделяемость шлаковой корки.

В результате полученных данных по дилатометрии, можно сказать, что чем больше разница между коэффициентами линейного теплового расширения сварочных материалов (сварочных шлаков) и металла шва, тем лучше отделяемость шлаковой корки.

### Список литературы

1. Подгаецкий В.В., Кузьменко В.Г. Сварочные шлаки. – Киев: Наукова думка, 1988. – 253 с.
2. Подгаецкий В.В., Люборец И.И. Сварочные флюсы. – Киев: Техніка, – 1984. – 167 с.
3. Наумов С.В., Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Опыт использования минерального сырья Пермского края в производстве сварочных материалов // Сб. трудов МНТК «Современные проблемы машиностроения». – Томск: НИ ТПУ, 2010. – С. 372–377.
4. Китайгородский И.И. О некоторых закономерностях начальных стадий образования стеклокристаллических структур/ И.И. Китайгородский, Э.М. Рабинович, В.И. Шелюбский // Стекло и керамика. – 1963. – № 12. – С. 45–56
5. Амауни А.Н. Методы и приборы для определения температурных коэффициентов линейного расширения материалов. – М., 1972. – 140 с.
6. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и сплавов. – Машиностроение, 2003. – 784 с.
7. Игнатова А.М., Наумов С.В. Исследование доли летучих компонентов при термическом разложении сварочных материалов на основе синтетических минеральных сплавов // Сб. трудов «Исследование материалов с использованием метода термического анализа, калориметрии и сорбции газа». – СПб: ООО «Гипроникель», 2012. – С. 14–22.

### Research of dependence of temperature-expansion coefficients of metal seam and welding slags from temperature in range 100 – 1000 °C

M.N. Ignatov, A.M. Ignatova, S.V. Naumov,  
E.E. Kornienko, A.Yu. Chumachenko

Work on research of dependences of heats-physical properties, element and phase compositions of welding slags and seam metal is devoted. By means of differential scanning calorimetry and dilatometry that at heating and cooling of welding slag there are heat-physical reactions which influence temperature-expansion coefficient of welding slags and on separability of a slag crust as a whole is proved.

**Key words:** dilatometry, differential scanning calorimetry, thermal analysis, raster electronic microscopy, temperature-expansion coefficient, welding materials, seam metal, welding slag.