



Н. Ю. Борд, К. Е. Белявин, В. К. Шелег

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ
РАСЧЕТЫ
В ПРАКТИКЕ
КОНСТРУИРОВАНИЯ
И ПРИМЕНЕНИЯ
СВАРОЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Борд, Н. Ю. Термодинамические расчеты в практике конструирования и применения сварочных материалов / Н. Ю. Борд, К. Е. Белявин, В. К. Шелег. – Минск: Белорус. наука, 2006. – с. – ISBN 985-08-0746-6.

Рассмотрены основные закономерности протекания металлургических процессов при осуществлении операций сварки и наплавки, в том числе особенности поведения расплавленного металла при сварке электродами с различным типом покрытий. Отмечена важнейшая роль шлаковой системы в формировании структуры и свойств металла шва и показано, что для анализа шлаковых систем необходим расчетный механизм, позволяющий определить термодинамическую активность отдельных компонентов шлака. Приведены базовые сведения по термодинамике и химической кинетике металлических растворов, необходимые для лучшего понимания основного материала.

Рассмотрены расчетные термодинамические методы, используемые для исследования межфазного взаимодействия при сварке.

С позиций термодинамики рассмотрены вопросы поведения металлов-модификаторов, в том числе редкоземельных металлов, основных металлов-раскислителей, применяемых в практике производства сварочных материалов, и проведены соответствующие расчеты. Приведены результаты расчетов величин термодинамической активности отдельных компонентов шлаковой фазы при различных температурах и спрогнозированы особенности их взаимодействия между собой и с окружающей средой.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов в области разработки, производства и использования сварочных материалов из научно-исследовательских институтов, предприятий и организаций, разрабатывающих новые лигатуры и ферросплавы для металлургического и сварочного производства. Она может быть полезна студентам профильных учебных заведений, специализирующимся в разработке и применении методов термодинамического моделирования сварочных процессов.

Ил. 25. Табл. 30. Библиогр.: 53 назв.

Р е ц е н з е н т ы:

доктор физико-математических наук В. М. Федосюк;
кандидат технических наук А. А. Радченко

© Борд Н. Ю., Белявин К. Е.,
Шелег В. К., 2006

© Оформление. РУП «Издательский дом
«Белорусская наука», 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сварочная металлургия отличается от классической металлургии выплавки стали и чугуна более высокими температурами и более коротким временем нахождения ванны расплавленного металла в состоянии, доступном для металлургической обработки металла сварного шва. Свои отличительные особенности имеют и сами процессы кристаллизации сварочной ванны, начинающиеся от границы сплавления и способствующие образованию зоны термического влияния.

В процессе сварки имеет место сложный комплекс одновременно протекающих процессов теплового воздействия на металл в зоне термического влияния, металлургической обработки и кристаллизации металла в объеме сварочной ванны при непрерывном охлаждении металла. Сам же характер структурных превращений существенно отличается, например, от процессов распада аустенита при изотермической выдержке: продолжительность инкубационного периода в 1,5 раза больше, чем при изотермической выдержке; высокая скорость охлаждения приводит к измельчению структуры в зоне изотермического влияния и повышению ее твердости.

Особенности сложных взаимодействий на границе газовой фазы, шлака и расплавленного металла приводят к необходимости специальной металлургической обработки металла: раскисления, легирования и рафинирования. При этом необходимо особо отметить важную роль шлака как одного из основных компонентов сварочного процесса. Функции шлаков могут быть разнообразны, но общим для них является тесный контакт с жидким металлом, а значит, и взаимодействие. Характер этого взаимодействия зависит от составов шлака и жидкого металла и существенно влияет на качество конечного про-

дукта. Анализ возможных реакций между компонентами жидкого металла и шлака, их направление можно оценить с помощью термодинамических расчетов.

Основным достоинством такого подхода является возможность получения информации априори, без постановки специальных экспериментов. Для этого потребуется расчетный механизм, позволяющий определить термодинамическую активность отдельных компонентов шлака, оценить степень рафинирования расплава под окислительными шлаками (межфазное распределение кислорода, углерода, марганца, кремния), проанализировать реакции, сопровождающие процесс раскисления металлического расплава, а также взаимодействие в системе шлаковая – газовая фаза.

Как известно, при сварке плавлением большинство сопутствующих процессов совершается с участием растворов: расплавленный металл представляет собой жидкий раствор углерода и легирующих элементов в железе; расплавленные шлаки являются сложными растворами оксидов и галоидов и т. п. Состояние раствора как системы определяется совокупностью значений ряда физических величин, которые характеризуют его свойства: температуры, давления, объема, молярной доли и др. Для того, чтобы охарактеризовать свойства раствора как системы, необходимо знать зависимости, связывающие между собой указанные выше параметры. С другой стороны, для термодинамического описания системы необходимо знание термодинамических характеристических функций, таких, как энтальпия, энтропия, свободная энергия. Эти функции позволяют оценить энергию раствора.

К настоящему времени имеется достаточное количество экспериментальных данных о термодинамических свойствах различных веществ и соединений. В разработанных банках данных приводятся сведения о термодинамических параметрах силицидов, боридов, карбидов таких металлов, как железо, хром, никель, молибден, титан, тантал, а также о их соединениях в газовой фазе и расплавах.

Реакции, протекающие при сварке, характеризуются значительным изменением температуры во времени. Тем не менее, учитывая достаточно высокие температуры химических взаимодействий, вполне можно допустить возможность существования состояний кратко-

временного равновесия. Это оправдывает применимость аппарата равновесной термодинамики, а сопоставление расчетных и экспериментальных параметров позволяет определить и ввести в расчетную систему требуемые поправочные коэффициенты.

Очевидно, что методы термодинамики, применяемые для исследования равновесных состояний, дают некоторое «идеализированное» представление о протекающих при сварке процессах. Тем не менее в области высоких температур, характерных для сварочной дуги, можно допустить возможность достижения определенных равновесий, позволяющих применять для исследований аппарат равновесной термодинамики.

Использование термодинамических моделей в значительной степени оправдывает ожидания исследователей. В то же время необходимо учитывать реальные изменения, имеющие место как в температурном поле, так и в составе и структуре флюса (шлака) и расплавленного металла в условиях охлаждения. Немаловажными являются и те пределы допущений, которые принимаются при модельных исследованиях. Так, например, рассчитывая состав электродного покрытия, разработчик может задавать априори степень взаимодействия компонента-раскислителя с образующимся при разложении карбонатов кислородом. Дальнейшая же корректировка состава осуществляется в процессе экспериментальной доработки состава покрытия. С другой стороны, имеет право на существование и допущение об определенной мере взаимодействия расплава шлака «на капле» жидкого металла и построение модели на этой основе. Тем не менее и в этом случае «критерием истины является эксперимент».

Необходимо также обратить внимание на тот факт, что при использовании механизмов термодинамики для исследования взаимодействий, сопутствующих сварочным процессам, большое значение имеет правильная оценка и прогнозирование возможных композиций неметаллических веществ, являющихся основой состава электродных покрытий, порошковых проволок, керамических флюсов и т. п. Наряду с возможностью определения априори некоторых важнейших характеристик этих соединений (например, температуры плавления) исследователь получает возможность оценить их состав, что, в свою оче-

редь, позволяет в дальнейшем рассчитать и соответствующие термодинамические параметры.

В настоящей работе рассмотрены некоторые основные представления термодинамики, имеющие важное прикладное значение для сварочной науки. С одной стороны, при этом преследуется цель восполнить имеющиеся пробелы в образовании как у студентов, так и у практикующих специалистов, до определенного этапа своей деятельности не испытывающих острой необходимости в использовании достаточно сложного аппарата прикладной термодинамики, физической химии, математической статистики и т. п. С другой стороны, на примере анализа многочисленных составов электродных покрытий, а также образующихся при этом шлаковых систем, препарированных с применением современных методов термодинамического анализа, показана важнейшая роль аппарата прикладной термодинамики в процессе создания новых сварочных материалов, расширения представлений о механизме сложных взаимодействий в зоне сварки, выбора оптимального химического состава и содержания в готовой шихте для нанесения покрытий сварочных электродов, создания новых составов порошковых проволок, сварочных флюсов и т. п.

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ

1.1. Некоторые общие закономерности сварочной металлургии

Сварочная металлургия отличается от классических металлургических процессов выплавки стали и чугуна более высокими температурами и более коротким временем нахождения ванны расплавленного металла в состоянии, доступном для металлургической обработки металла сварного шва. Кроме того, свои отличительные особенности имеют и сами процессы кристаллизации сварочной ванны, начинающиеся от границы сплавления и способствующие образованию зоны термического влияния, характеризующейся формированием слоя металла, отличного от основного по своей структуре и свойствам.

В процессе сварки имеет место сложный комплекс одновременно протекающих процессов теплового воздействия на металл в зоне термического влияния, металлургической обработки и кристаллизации металла в объеме сварочной ванны. Следует учитывать и процесс непрерывного охлаждения металла. При этом сам процесс и характер структурных превращений существенно отличаются от процессов распада аустенита при изотермической выдержке. При непрерывном охлаждении значение инкубационного периода в 1,5 раза больше, чем при изотермической выдержке. Увеличение скорости охлаждения приводит к измельчению структуры в зоне изотермического влияния и повышению ее твердости. Если же скорость охлаждения превышает критическую скорость, то неизбежно образование структур закалки. В зоне термического влияния наиболее желательными являются пластичные, хорошо обрабатываемые структуры типа перлита или сорбита. Поэтому получение качественных сварных соединений неразрывно связано с формированием желаемых микроструктур, что возможно, например, путем регулирования скорости охлаждения. Так, если

предварительный подогрев способствует перлитному превращению и является действенным средством для предупреждения образования структур закалки, то, изменяя скорость охлаждения, можно получить желаемую твердость в зоне термического влияния. Например, путем ускоренного охлаждения в зоне термического влияния удастся измельчить зерно наплавленного металла, повысить его прочностные свойства и ударную вязкость. С этой же целью применяется так называемый метод сопутствующего охлаждения. При этом сварное соединение в процессе сварки с обратной стороны дуги охлаждается водой или воздушной смесью, что способствует получению крутой ветви скорости охлаждения.

Как известно, при горении дуги вместе с каплями расплавленного металла в сварочную ванну попадает и расплавленное покрытие. Оно взаимодействует с металлом на всем пути своего движения, а затем всплывает на поверхность сварочной ванны и покрывает ее защитным слоем – шлаком. Жидкий металл взаимодействует не только с расплавленным покрытием, но и с газовой средой, в состав которой кроме газообразных составляющих покрытия входят и пары металла. Поэтому не исключена возможность некоторого растворения в металле вредных газов и примесей как из газовой среды, так и при контакте со шлаком, в котором присутствуют кислородосодержащие соединения и вредные примеси (S и P).

Таким образом, в процессе осуществления сварочных операций возникает необходимость специальной металлургической обработки металла: раскисления, легирования и рафинирования. При этом, однако, в связи со специфическими особенностями отдельных участков зоны сварки эти операции протекают с различной степенью полноты и интенсивности.

В подготовительной зоне, к которой относится нерасплавленная часть электрода и которая примыкает к рабочему торцу, температура изменяется от 100 °С до температуры плавления электродного покрытия. На этом участке электрода из покрытия выделяется влага (нагрев до 100 °С), в области нагрева до 250–300 °С (ближе к торцу электрода) начинается распад органических составляющих электродного покрытия, который в общем виде можно описать следующим уравнением:

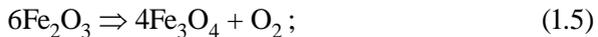
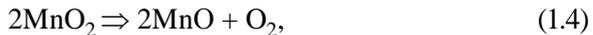


При этом создается восстановительная атмосфера, состоящая из окиси углерода (CO) и водорода (H₂), а общее количество газов может достигать величины до 300 см³ на 1 см³ расплавленного электрода. В зоне с температурой 350 – 450 °С из электродного покрытия выделяется кристаллизационная вода, а при температурах свыше 500 °С и до температуры плавления покрытия имеют место следующие превращения:

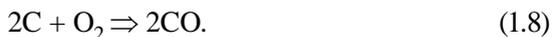
а) диссоциация карбонатов, входящих в покрытие:



б) переход высших оксидов в низшие:



в) окисление выделяемым свободным кислородом поверхностного слоя металла электродного стержня и некоторых составляющих покрытия (например, ферросплавов):



Протекающие в этой зоне окислительные процессы уменьшают количество раскислителей и легирующих элементов, попадающих из покрытия в металл. Этот процесс тем интенсивнее, чем больше содержится в электродном покрытии легкодиссоциирующих соединений, отдающих кислород, и чем меньше по размерам частицы окисляемого элемента, создающие большую суммарную поверхность контакта с окислительной средой.

Далее у торца электрода покрытие начинает плавиться и оказывается непосредственно в контакте с образующейся на торце электрода каплей жидкого металла.

В этой, так называемой реакционной, зоне торца электрода вследствие более замедленного и неравномерного плавления обмазки в сравнении со стержнем капля на торце окружена «чехлом» из обмазки, по внутренним стенкам которого стекает плавящаяся обмазка и покрывает каплю металла шлаковой оболочкой. Шлак интенсивно перемешивается с металлом и частично попадает внутрь капли. За очень короткое (0,1–0,01 с) время формирования капли на торце электрода наиболее важным процессом является ее легирование. Легирование капли происходит в большом объеме и составляет по некоторым элементам до 50–80% их содержания в металле шва. Интенсивному развитию легирования капли способствует высокая температура на торце электрода, близкая к температуре кипения металла. Процесс характеризуется высокой скоростью реакции и пониженным сродством к кислороду у подавляющего большинства элементов. Кроме того, ускорению легирования способствует и механическое перемешивание капли, происходящее в результате бурного выделения газов. Наряду с легированием в металле капли происходит растворение газов из-за контакта с газовой средой, а также раскисление углеродом, что, в свою очередь, приводит к энергичному перемешиванию металла и отрыву капли от торца электрода. Эта зона характеризуется также частичным испарением некоторых примесей, имеющих минимальную величину упругости пара (Mn, Cr).

После отрыва капли от торца электрода она попадает в дуговой промежуток, время перехода через который составляет 0,0001–0,001 с. Сами капли при этом покрыты слоем шлака, толщина которого колеблется от 0,06 до 0,2 мм. Наряду с каплями металла, покрытыми шлаком, в общем потоке наблюдаются и отдельные капли шлака. Несмотря на малое время пребывания капли в дуге, в ней активно развиваются процессы, имеющие место на торце электрода. Высокая температура столба дуги (5000–6000 °С) ускоряет реакции и усиливает взаимодействие шлака, металла и газовой среды.

В этой зоне происходит диссоциация некоторых оксидов, а восстановленные элементы растворяются в металле капель, практически за-

вершая процесс легирования металла элементами покрытия. Одновременно продолжается испарение отдельных элементов, развивающийся процесс выгорания углерода усиливает газообразование внутри капель; под действием этого капли дробятся, искажают свою форму, и наблюдается разбрызгивание металла. Большая суммарная поверхность контакта капель с газовой средой столба дуги, где преимущественно находятся атомарные газы, приводит к насыщению капель этими газами.

В сварочной ванне, куда поступают капли электродного металла и шлаковые частицы, происходит перемешивание, разделение металла и шлака и взаимодействие этих двух фаз.

В момент погружения наиболее крупных капель в ванну, под действием продолжающегося газообразования внутри капель, разрушается шлаковая оболочка, окутывающая капли, и они растворяются в общем объеме металла. Шлаковые частицы, укрупняясь, реагируют с металлом и поднимаются на поверхность сварочной ванны. Более мелкие капли отделяют от себя шлак вследствие разницы в удельном весе металла и шлака.

Таким образом, на поверхности сварочной ванны постепенно создается шлаковый покров, и только район пятна дуги оказывается свободным от шлака.

Тепловое и механическое перемешивание ванны создает общее перемещение металла и шлака в направлении к задней и боковым стенкам ванны. Химическое и физическое взаимодействие металла и шлака является достаточно сложным и в общем виде характеризуется протеканием процессов:

а) раскисления на основе обменных реакций, а также комплексообразования с получением силикатов железа, марганца, титана и др. Реакция раскисления углеродом протекает преимущественно в области повышенных температур, а остальные реакции – в задней части ванны при сниженных температурах;

б) рафинирования металла при контакте шлака и металла, особенно в задней части ванны, где происходит наиболее интенсивное всплывание укрупненных шлаковых частиц и своеобразная «промывка» ими металла.

Здесь же окончательно завершается процесс легирования металла.

Таким образом, контакт жидкого металла и шлаковой фазы наблюдается на всех участках зоны сварки. Взаимодействие этих фаз происходит довольно энергично, что объясняется не только высокими температурами среды, но и большими удельными поверхностями контакта металла и шлака. Скорость реакции взаимодействия между металлом и шлаком определяется скоростью подвода к межфазной границе реагирующих веществ и отвода от нее продуктов реакции.

Следует особо отметить, что шлаки являются одним из основных компонентов сварочного процесса, обеспечивающих протекание технологических процессов сварки. Функции шлаков при этом могут быть разнообразны, но общим для них является тесный контакт с жидким металлом, а значит, и взаимодействие. Характер этого взаимодействия, естественно, зависит от составов шлака и жидкого металла и существенно влияет на качество конечного продукта. Анализ возможных реакций между компонентами жидкого металла и шлака, их направление можно оценить с помощью термодинамических расчетов. И основным достоинством такого подхода является возможность получения информации априори, без постановки специальных экспериментов.

Роль шлака при сварке и наплавке очень велика. Составом шлака определяется состав атмосферы дуги, определяющей ее стабильность, а также состав выделяющихся газов. Так, наличие в составе шлака оксидов щелочных и щелочно-земельных металлов повышает устойчивость горения дуги и процесса сварки.

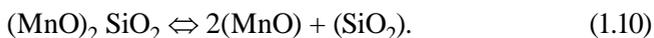
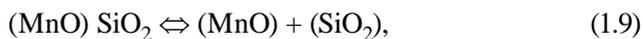
При осуществлении процесса ручной дуговой сварки для защиты расплавленного металла от внешней среды необходимо, чтобы шлак полностью покрывал поверхность сварочной ванны. Для этого нужно минимизировать величину межфазного натяжения на границе металл – шлак и обеспечить возможность плавного изменения вязкости шлака по мере роста температуры. Известно, что лучшую защиту обеспечивают так называемые «длинные» шлаки, характеризующиеся плавным снижением вязкости при затвердевании. Необходимо также, чтобы температура затвердевания шлака была ниже температуры затвердевания металла.

Интенсивность испарения компонентов шлака в процессе сварки относительно невелика, поэтому этот фактор практически не влияет на изменение парциального давления азота и водорода в зоне сварки. Исходя из этого, наиболее эффективно влияние газовых компонентов, получаемых при разложении компонентов покрытий (или флюсов). Так, например, для снижения содержания водорода и, следовательно, уменьшения пористости шва в зону сварки вводят фториды. При этом максимальный эффект обеспечивается за счет реакции взаимодействия между водородом и фторидом кремния SiF (с образованием фторида водорода HF), причем последний является продуктом реакции между фторидом кальция CaF_2 и диоксидом кремния SiO_2 . Кроме того, растворение в металле шва водорода уменьшается и за счет процессов окисления сварочной ванны шлаком или кислородом.

Важной характеристикой шлаковой фазы является и ее отделенность от поверхности металла, которая, в свою очередь, зависит от окисляющего действия на металл жидкого шлака. Если в жидком шлаке содержатся оксиды железа, марганца, титана или кремния, то такой шлак способствует окислению металла. Образующаяся при этом тонкая пленка оксида прочно удерживается на поверхности металла шва. Если же в самом шлаке содержатся соединения типа оксидов алюминия, хрома и др., имеющие прочное сцепление с оксидной пленкой, то следует ожидать удерживания шлака на поверхности металла, т. е. ухудшения отделяемости последнего. Таким образом, для снижения прочности сцепления шлака с поверхностью металла шва необходимо обеспечить условия минимизации содержания в шлаке оксидов железа, марганца, кремния или титана.

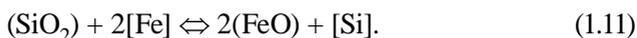
Взаимодействие расплавленного шлака с жидким металлом определяет и конечные химический состав и свойства металла шва.

Для большинства жидких плавленных шлаков характерно наличие оксидов типа (SiO_2) и (MnO) , образующихся вследствие диссоциации силикатов марганца:



Концентрация свободных оксидов SiO_2 и MnO оказывается достаточно большой, и они активно взаимодействуют с жидким металлом. При этом имеет место два важных металлургических процесса – кремневосстановительный и марганцевосстановительный, протекающие на основе обменных реакций.

При достаточно высоком содержании в шлаковой фазе SiO_2 и низкой концентрации монооксида железа может наблюдаться восстановление кремния по реакции:



Эта реакция смещена направо в высокотемпературной зоне сварки (в каплях и передней части сварочной ванны). В этом случае закись железа распределяется между шлаком и металлом и преимущественно переходит в шлак. Термодинамическая вероятность развития этой реакции вправо подтверждается ростом константы равновесия реакции с повышением температуры.

$$\lg K''_C = -\frac{26050}{T} + 9,5. \quad (1.12)$$

Однако по мере снижения температуры равновесие реакции (1.11) смещается влево и термодинамически более вероятным является окисление кремния за счет растворенного в железе кислорода. Тем не менее конечное содержание кремния в шве будет несколько повышенным, так как для полного окисления перешедшего в металл кремния имеющегося в наличии кислорода, частично прореагировавшего с углеродом, оказывается недостаточно.

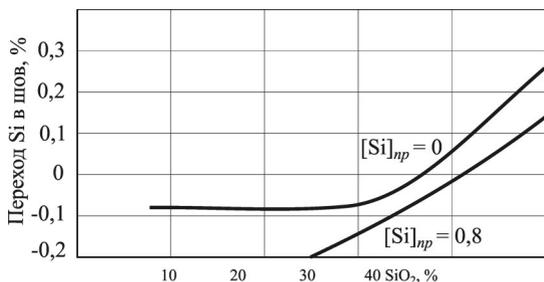


Рис. 1.1. Влияние (SiO_2) во флюсе и кремния в электродной проволоке на переход кремния в наплавленный металл

На рис. 1.1 показано одновременное влияние содержания (SiO_2) во флюсе и кремния в электрод-

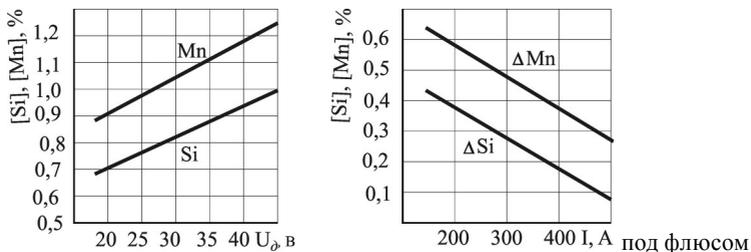


Рис. 1.2. Влияние тока и напряжения на переход кремния и марганца при сварке

ной проволоке (а значит, и в металле капли) на переход кремния из шлака в металл.

Как видно, при определенных условиях, возможен и обратный переход кремния из металла в шлак. Это может наблюдаться при повышенном содержании Si в электродной проволоке и малых концентрациях кремния в шлаке, т. е. при пониженной кислотности флюса.

Изменение режима сварки приводит к усилению или ослаблению перехода кремния из шлака в металл. При этом максимальное влияние оказывает напряжение на дуге и величина тока. Как видно из рис. 1.2, с увеличением напряжения на дуге и уменьшением величины тока наблюдается рост перехода кремния в металл шва.

Реакция кремния имеет большое значение при сварке малоуглеродистых сталей, особенно кипящих плавок, когда в качестве электродной проволоки применяется малоуглеродистая бескремнистая сталь. Известно, что при наличии в металле ванны восстановленного кремния свыше 0,2% обеспечивается подавление в кристаллизующемся металле ванны реакции выгорания углерода, что способствует образованию плотных беспористых швов.

Однако к отрицательным последствиям кремневосстановительного процесса следует отнести возможность засорения шва дисперсными силикатными включениями, отрицательно влияющими на ударную вязкость металла шва.

Реакция восстановления марганца из монооксида марганца, находящегося в шлаке, выглядит следующим образом:



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Особенности металлургических процессов при сварке	7
1.1. Некоторые общие закономерности сварочной металлургии	7
1.2. Особенности металлургии сварки электродами с различным типом покрытий	17
1.2.1. Рудно-кислородное покрытие	17
1.2.2. Фтористо-кальциевое покрытие	19
1.2.3. Покрытие рутилового типа	19
Глава 2. Основы расчета металлических растворов и металлургических шлаков	21
2.1. Металлургические шлаки	21
2.1.1. Диаграммы фазовых равновесий в изучении металлургических шлаков	25
2.2. Металлические растворы	41
2.2.1. Типы растворов	41
2.2.2. Константа равновесия	49
2.2.3. Термодинамическая активность	53
Глава 3. Методы термодинамики (программные пакеты) для исследования межфазного взаимодействия при сварке	58
3.1. Метод материального баланса	58
3.2. Метод нахождения экстремума термодинамического потенциала	60
3.3. Программа для расчета равновесных состояний MTDATA	62
Глава 4. Основы взаимодействия наплавленного металла с газовой фазой	65
Глава 5. Термодинамические расчеты в практике применения и конструирования сварочных материалов	77

5.1. Термодинамическая активность железа и углерода в легированном наплавленном металле	79
5.2. Получение специальных компонентов электродных покрытий	92
5.2.1. Обогащенный ильменитовый концентрат	92
5.2.2. Специальные тугоплавкие лигатуры	96
5.3. Термодинамическая активность раскисляющих и модифицирующих компонентов	103
5.4. Особенности изменения термодинамической активности компонентов электродных покрытий и флюсов в зависимости от типа покрытия	125
Литература	147
Приложения	150

Научное издание

Борд Наум Юрьевич
Белявин Климентий Евгеньевич
Шелег Валерий Константинович

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
В ПРАКТИКЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ
И ПРИМЕНЕНИЯ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Редактор *А. А. Баранова*
Художественный редактор *В. А. Жаховец*
Технический редактор *Т. В. Летьен*
Компьютерная верстка *Н. И. Кашуба*

Подписано в печать 19.09.2006 г. Формат 60×84¹/₁₆. Бум. писчая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,0. Усл. кр.-отт. 10,5. Уч.-изд. л.
9,1. Тираж 300 экз. Заказ 279.

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Белорусская наука». ЛИ 02330/0131569 от 11.05.2005 г. 220141. Минск, ул. Ф. Скорины, 40.

Отпечатано в РУП «Издательский дом «Белорусская наука»