

## ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ»

С 29 мая по 1 июня 2012 г. в пос. Кацивели, Большая Ялта (Украина) на базе Дома творчества ученых «Кацивели» НАНУ была проведена Шестая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (MMITWRP-2012). Ее организаторами выступили Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ и Международная ассоциация «Сварка». В работе приняло участие более 50 ученых и специалистов из Украины, России, Германии, Польши и Франции. Конференция была организована в виде пленарных и стендовых сессий, ее рабочими языками были русский и английский, кроме того, был обеспечен синхронный перевод докладов.

Во время работы пленарной сессии было заслушано 25 докладов. Открыл конференцию обзорный доклад академика НАНУ В. И. Махненко «Перспективы развития математического моделирования и информационных технологий в сварке и родственных процессах» (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина). В докладе была отмечена тенденция к более широкому использованию коммерческих компьютерных программ при моделировании характерных физических процессов при сварке и родственных процессах. Тем не менее для отдельных актуальных задач разрабатывается соответствующее проблемно-ориентированное программное обеспечение. Чаще всего это связано либо с проблемой продления срока работы ответственных сварных конструкций (например, радиационного распухания материала внутренних корпусных устройств ядерных реакторов и т. п.), либо с большой аварийностью соответствующих конструкций (например, коррозионные повреждения стыков трубопроводов). Естественно, что при этом прогнозные оценки требуют специфических подходов, связанных с механикой деформирования, механикой разрушения и учетом условий эксплуатации. Что касается традиционных тем математического моделирования и информационных технологий, то они обычно дифференцируются по следующим основным направлениям:

- модели деформирования сварного шва;
- напряжения и деформации при сварке;
- вопросы прочности сварных соединений.

Отметим некоторые из докладов, которые дают представление о спектре обсуждаемых вопросов:

*Математические модели вязкого разрушения сварных соединений на основе механизма порообразования* (В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, Н. И. Пивторак, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина). Модели вязкого разрушения с учетом образования пор при пластическом течении на металлических включениях либо в матрице из микротрещин, не распространяющихся по механизму скола, предусматривают соответствующие алгоритмы роста пор за счет пластических деформаций и соответствующие перераспределения напряженно-деформированного состояния. В настоящее время интерес к этим моделям обусловлен ростом объемов прогнозных и экспертных оценок для сварных конструкций на основе расчетных оценок предельного состояния. В целом ряде случаев, учитывая тенденцию использования в сварных конструкциях высокопрочных и достаточно пластичных материалов, предельное состояние наступает в условиях вязкого деформирования при жестком напряженном состоянии, способствующих развитию порообразования. В результате разрушение происходит при относительно невысоких пластических деформациях, что резко снижает деформационную способность соответствующих сварных узлов перед разрушением;

*Взаимодействие дефектов несплошности материала в сварных конструкциях* (В. И. Махненко, А. С. Миленин, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина). При технической диагностике сварных конструкций вопросу взаимодействия выявленных дефектов уделяется достаточное внимание. Разработаны соответствующие алгоритмы для оценки такого взаимодействия, согласно которым это взаимодействие незначительное (при достаточном удалении дефектов друг от друга) либо приводит к снижению несущей способности при соответствующем объединенном действии групповых дефектов. Между тем возможен вариант групповых дефектов, когда их взаимодействие приводит к увеличению несущей способности соответствующего объекта (сварного узла, соединения и пр.);

*Исследование процессов испарения бинарных сплавов в условиях дуговой сварки* (И. Л. Семенов, И. В. Кривцун, А. Т. Зельниченко, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина). В работе предложена комплексная аналитическая модель испарения бинарного сплава с поверхности расплавленно-



го анода, позволяющая определять состав, газодинамические характеристики плазмы вблизи поверхности металла и характеристики анодного слоя в широком диапазоне температуры поверхности, температуры электронов, состава сплава и плотности тока на аноде. Данная модель включает модели испарения в диффузионном и конвективном режимах, а также модель анодных процессов. Кроме того, сформулирована новая модель Кнудсеновского слоя для бинарной смеси паров, которая содержит корректные с точки зрения кинетической теории выражения балансов массы, импульса и энергии. На основе предложенной комплексной модели проведен численный анализ процессов испарения Al–Mg и Fe–Mn бинарных сплавов в широком диапазоне значений температуры поверхности, температуры электронов и массового содержания примесей (марганца, магния). Определены важные с технологической точки зрения характеристики испарительных процессов: температура кипения бинарного сплава, тепловой и массовые потоки компонент с поверхности расплава, полное газодинамическое давление на эту поверхность, тепловой поток в анод и анодное падение потенциала;

*Эффекты конвективного переноса энергии, импульса и массы в процессах сварки* (В. Ф. Демченко, И. В. Кривцун, И. В. Крикент, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина). В докладе рассмотрены проблемы и задачи конвективного переноса энергии, импульса и массы, возникающие при математическом описании физических процессов в плазме столба сварочной дуги, сварочной ванне и капле электродного металла. Проанализированы различные объемные и поверхностные силовые факторы, обуславливающие движение расплавленного металла и дуговой плазмы. Особое внимание уделено математическому описанию процесса испарения металла с поверхности расплава и оценивается влияние испарительных процессов на гидро(газо)динамическую обстановку и тепловое состояние столба дуги, сварочной ванны и капли электродного металла. Проведен сравнительный анализ воздействия различных силовых факторов (капиллярная сила, сила вязкого трения плазменного потока о поверхность расплава, подъемная сила Архимеда, электромагнитная сила) на формирование сварного шва в зависимости от условий теплового и электромагнитного взаимодействия плазмы столба сварочной дуги с металлическим анодом (сварочной ванной, каплей электродного металла). Обсуждены перспективные способы активации процессов конвективного переноса энергии и массы в сварочной ванне, обеспечивающие повышенную проплавленную способность дуговых и комбинированных способов сварки;

*О причинах взрыва капли электродного металла при дуговой сварке Al–Mg проволокой* (И. Кривцун<sup>1</sup>, В. Демченко<sup>1</sup>, И. Семенов<sup>1</sup>, А. Лесной<sup>1</sup>,

М. Бородочев<sup>1</sup>, У. Райзген<sup>2</sup>, О. Мокров<sup>2</sup>, А. Заби-ров<sup>2</sup>, <sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина, <sup>2</sup>Институт сварки и соединения, г. Аахен, Германия). Доклад посвящен исследованию причин взрыва капли электродного металла из Al–Mg сплава при сварке МИГ методами математического моделирования. Рассмотрена модель конвективного испарения бинарного сплава при нагреве поверхности расплава выше температуры кипения. Численными расчетами установлено, что в Al–Mg сплаве происходит избирательное испарение магния. Приведены расчетные данные о температуре кипения сплава Al–Mg в зависимости от содержания магния, данные о плотности массового потока магния и плотности теплового потока на испарение сплава в зависимости от температуры и содержания магния на поверхности испаряющегося расплава. Эти данные использованы в математической модели, описывающей процессы теплопереноса в капле электродного металла при прохождении импульса сварочного тока. Показано, что в процессе испарения магния его концентрация на поверхности капли снижается, в результате чего уменьшаются потери тепла на испарение, и поверхность капли перегревается до температуры, близкой к температуре кипения алюминия. В результате этого расплав в объеме капли становится перегретым выше температуры кипения, соответствующей данной концентрации магния в сплаве, что приводит к образованию и росту паровых пузырьков разрывающих каплю;

*Расчет распределенных характеристик электрического и магнитного полей в системе электродная проволока–сварочная дуга* (А. П. Семенов, И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина). Электромагнитные процессы, протекающие в системе сварочная проволока–капля–анодный слой–столб дуги при сварке плавящимся электродом, оказывают существенное влияние на нагрев, плавление и перенос электродного металла. В частности, размер капель и частота их отрыва во многом определяются величиной и распределением электромагнитной силы, возникающей в объеме капли в результате взаимодействия сварочного тока с собственным магнитным полем. Особенность математического описания задачи электропереноса в указанной системе состоит в том, что на границе между плазмой дуги и металлом капли (т. е. в анодной области) существует обратный скачок потенциала, значение которого нелинейно зависит от плотности тока, температуры поверхности капли (анода) и температуры электронов в прианодной плазме. В этом докладе рассмотрена вариационная постановка задачи переноса заряда в системе сварочная проволока–капля–анодный слой–столб дуги и предложена методика ее численного решения на основе МКЭ. При этом используется способ триангуляции расчетной области, содержащей внутреннюю границу произволь-

ной формы между каплей и плазмой сварочной дуги. Проанализированы результаты численных расчетов распределенных характеристик электромагнитного поля (электрического потенциала, плотности тока, объемной плотности электромагнитной силы, магнитного давления, анодного падения напряжения) в зависимости от технологических параметров и способа привязки дуги к капле на различных этапах ее формирования;

*Численное моделирование движения и нагрева частиц, формирующихся при диспергировании проволоки в условиях плазменно-дугового напыления* (М. Ю. Харламов<sup>1</sup>, И. В. Кривцун<sup>2</sup>, В. Н. Коржик<sup>2</sup>, <sup>1</sup>Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина, <sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина). В докладе сформулирована математическая модель, описывающая процессы теплового и динамического воздействия плазменной струи на частицы, которые формируются при распылении проволоки, в условиях плазменно-дугового напыления покрытий. Предполагалось, что частицы срываются с торца расплавленной проволоки-анода в расплавленном состоянии, а эволюция теплового состояния и динамика движения частиц определяются условиями их взаимодействия с высокоскоростным высокотемпературным потоком плазмы. При этом температурное поле частицы описывалось с помощью нестационарного уравнения теплопроводности с учетом конвективно-кондуктивного и радиационного теплообмена плазменного потока с ее поверхностью, а также потерь тепла, связанных с уносом потоком пара энергии испарения атомов материала частицы. Траектория и скорость движения частицы находились путем решения уравнений движения частицы в потоке плазмы под действием силы аэродинамического сопротивления. Проведенные численные исследования показали, что значения числа Вебера для сферических частиц — капель распыляемого материала в процессе их движения в плазменном потоке превышают критические, что свидетельствует о возможности разрушения капель под действием газодинамических сил. Поэтому модель взаимодействия частиц с плазменной струей была дополнена условиями аэродинамического дробления жидких капель в газовом потоке, что позволило при расчетах получать значения размеров, скорости и температуры частиц на дистанции напыления, близкие к экспериментальным данным;

*Аналитическое моделирование динамической характеристики парогазового канала для различных пространственных распределений интенсивности луча лазера при лазерной сварке с глубоким проплавлением* (J. Volpp, M. Gatzel, F. Vollertsen, BIAS — Институт лучевых технологий, г. Бремен, Германия). В докладе показано, что характерный парогазовый канал формируется при лазерной сварке с глубоким проплавлением, когда интенсивность



лазерного луча превышает определенный предел, зависящий от материала. Образовавшаяся парогазовая система, состоящая из парогазового канала и окружающей расплавленной ванны, является высокодинамичной. Причиной нестабильности парогазового канала, которая может привести к его разрушению в процессе сварки, в основном, является динамичность в сварочной ванне и в парогазовом канале. Это может привести к появлению нежелательных включений и пор, которые снижают качество сварного соединения. Для лучшего понимания сложной системы представлена упрощенная аналитическая модель парогазового канала, обеспечивающая описание геометрии парогазового канала. С ее помощью также рассчитано влияние различных пространственных распределений интенсивности лазерного луча на динамику парогазового канала и появляющуюся в результате тенденцию к образованию пор;

*Прогресс в численном моделировании зоны плавления при сварке разнородных металлических материалов* (I. Tomashchuk, P. Sallamand, J.-M. Jouvard, Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS-UniversiteB de Bourgogne, Le Creusot, Франция). Численное моделирование процессов тепло- и массопереноса, протекающих в зоне плавления при сварке разнородных материалов, проводили с помощью одной из коммерческих компьютерных программ. Рассматривали три основных варианта металлических систем: полностью совместимые материалы, формирующие идеальную бинарную систему (например, Cu–Ni); материалы, формирующие интерметаллиды в процессе кристаллизации зоны плавления (например Fe–Ti); несовместимые материалы (например, нержавеющая сталь–титан).

Во время проведения сессии стендовых докладов «маститые» и молодые ученые в максимально открытой форме обсуждали различные вопросы математического моделирования процессов, протекающих при сварке, а также методологические аспек-



ты проведения вычислительного эксперимента, от инженерной постановки, физической и математических моделей до алгоритмизации задачи и разработки программного обеспечения.

Тезисы докладов вместе с программой работы конференции были опубликованы к началу ее проведения. Сборник трудов конференции будет издан к концу 2012 г. Все сборники трудов международных конференций «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» в электронном виде можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».

Программный и организационный комитеты конференции выражают признательность и благодарность академикам НАНУ И. К. Походне, В. И.

Махненко и И. В. Кривцу за постоянное внимание к конференции и поддержку молодых ученых, которые подготовили около половины всех докладов, представленных на конференции.

Конференция проходила в творческой и дружеской атмосфере и завершилась поездкой участников конференции на вершину Ай-Петри с заездом на водопад Учан-Су и прогулкой по набережной в Ялте.

Следующая, Седьмая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», будет проведена в пос. Качивели, Большая Ялта в последней декаде сентября 2014 г.

А. Т. Зельниченко, канд. физ.-мат. наук,  
И. Ю. Романова, канд. техн. наук

## К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Б. Е. ЧЕРТОКА



Исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося ученого-конструктора в области ракетно-космической техники, одного из ближайших соратников С. П. Королева, Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской и Государственной премии СССР, академика Российской академии наук Бориса Евсеевича Чертока.

Свой замечательный трудовой путь Б. Е. Черток начал в 1930 г. на Московском авиационном заводе, где прошел от электромонтера по промышленному оборудованию до начальника конструкторской бригады по самолетному оборудованию и вооружению.

После окончания в 1940 г. Московского энергетического института до 1945 г. Б. Е. Черток работал в ОКБ Главного конструктора В. Ф. Болховитинова начальником отдела электро- и спецоборудования, автоматики и управления.

Во время Великой Отечественной войны Б. Е. Черток разрабатывал автоматику управления вооружением самолетов. Им была создана система управления и электрического зажигания ЖРД ракетного самолета «БИ-1». В апреле 1945 г. в составе специальной комиссии Б. Е. Черток был командирован в Германию, где до января 1947 г. руководил работой группы советских специалистов по изучению ракетной техники. В составе группы был и С. П. Королев. С этого времени Борис Евсеевич тесно сотрудничал с С. П. Королевым. С 1950 г. он работал в ОКБ-1, главным конструктором которого был С. П. Королев, сначала заместителем, а потом начальником отдела систем управления.

С 1957 по 1963 гг. Б. Е. Черток работал заместителем главного конструктора ОКБ-1. В 1963 г. он был назначен заместителем начальника предприятия по научной работе. С 1966 г. — заместителем главного конструктора — руководитель комплекса Центрального конструкторского бюро экспериментального машиностроения (ЦКБМ). В 1974 г. Б. Е. Черток стал заместителем генерального конструктора НПО «Энергия» по системам управления. В этой должности он проработал до 1993 г., а с 1993 г. до конца жизни (2011 г.) являлся главным научным консультантом генерального конструктора РКК «Энергия» им. С. П. Королева.

Вся научно-инженерная деятельность Б. Е. Чертока связана с разработкой и созданием систем управления ракетными и космическими аппаратами. Он возглавлял разработку систем управления пилотируемых космических кораблей серии «Восток», многих автоматических межпланетных станций и спутников. Научно-исследовательская и конструкторская деятельность Б. Е. Чертока явилась фундаментом для создания целого направления в космонавтике — науки о системах управления и навигации пилотируемых космических кораблей.

Им создана школа, которая до настоящего времени определяет научные направления и уровень техники в этой области.

Б. Е. Черток — автор более 200 научных трудов. В 1994–1999 гг. им подготовлена уникальная историческая серия (4 монографии «Ракеты и люди»).

В 1961 г. за создание образцов ракетной техники и обеспечение успешного полета Ю. А. Гагарина он был удостоен звания Героя Социалистического Труда. Б. Е. Черток — кавалер многих орденов и медалей СССР и России. Он награжден золотыми медалями им. Б. Н. Петрова и им. С. П. Королева. Б. Е. Черток удостоен Ленинской премии за участие в создании первых искусственных спутников Земли (1957) и Государственной премии СССР за