



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Формирование структуры сваренных взрывом материалов: экспериментальные исследования и численное моделирование

*Иван Батаев**

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

 <http://orcid.org/0000-0003-2871-0269>,  ivanbataev@ngs.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.13

История статьи:

Поступила: 14 июля 2017

Рецензирование: 31 октября 2017

Принята к печати: 15 ноября 2017

Доступно онлайн: 15 декабря 2017

Ключевые слова:

Сварка взрывом

Волны

Вихри

Моделирование

Гидродинамика сглаженных частиц

Структура

Электронная микроскопия

Деформация

Сталь

Плавление

Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию № 11.7662.2017/БЧ.

АННОТАЦИЯ

Цель: изучение процессов формирования структуры в сваренных взрывом материалах с использованием подхода, основанного на совместном анализе результатов математического моделирования и структурных исследований. **Методы:** в качестве объекта исследований применялась низкоуглеродистая сталь 20, пластины которой соединялись взрывом. Полученный биметалл анализировался с методами оптической микроскопии, растровой электронной микроскопии (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Численное моделирование процесса высокоскоростного соударения стальных пластин проводилось в программном продукте Ansys Autodyn методом гидродинамики сглаженных частиц (Smooth Particle Hydrodynamics, SPH). **Результаты и обсуждение.** Свойства сваренных взрывом материалов в значительной мере определяются структурой тонких слоев, возникающих на межслойных границах при высокоскоростном соударении заготовок. В этих слоях материал претерпевает наиболее существенные структурные изменения. Основная часть свариваемых взрывом пластин деформируется незначительно и остается в слабонагретом состоянии. Высокие скорости деформационных процессов, развивающиеся на межслойных границах, приводят к существенной локализации и разогреву материала вблизи межслойной границы. Пластическая деформация при сварке взрывом происходит в условиях, близких к адиабатическим. Такие условия способствуют фазовым превращениям вблизи межслойной границы и даже локальному плавлению отдельных микрообъемов. В связи с высокой температуропроводностью металлов и значительным температурным градиентом дальнейший отвод тепла в слабдеформированные объемы пластин происходит с высокими скоростями ($10^4 \dots 10^7$ К/с). Это приводит к формированию вблизи межслойной границы метастабильных (в частности, мартенситных) структур. Структура материала, формирующаяся вблизи межслойных границ, является результатом конкуренции процессов деформационного упрочнения и термического разупрочнения свариваемых взрывом металлических заготовок. Показано, что метод гидродинамики сглаженных частиц адекватно воспроизводит явления волно- и струеобразования при сварке взрывом, а геометрические параметры волн, предсказываемые моделью, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Максимальные значения пластической деформации в узком слое вблизи межслойных границ могут превышать $\epsilon = 6$.

Для цитирования: Батаев И.А. Формирование структуры сваренных взрывом материалов: экспериментальные исследования и численное моделирование // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 4 (77). – С. 55–67. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-4-55-67.

Введение

Сварка взрывом является процессом соединения заготовок, происходящим при их высокоскоростном косом соударении [1, 2]. Как правило, необходимая для достижения высокой скорости энергия передается соединяемым телам газообразными продуктами реакции, образующимися

в процессе детонации взрывчатых веществ. В то же время существуют разновидности этого процесса, в которых для разгона заготовок используются магнитно-импульсные и другие устройства [3].

Наиболее ранняя из известных публикаций, посвященных сварке взрывом, является, вероятно, короткой заметкой, опубликованной Л.Р. Карлом в журнале Metal Progress [4], описывающей сварку латунных дисков при воздействии детонационного импульса. Джон Пирсон отмечал, что соединение металлических тел при

*Адрес для переписки

Батаев Иван Анатольевич, к.т.н., доцент

Новосибирский государственный технический университет

пр. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: 8 (383) 346-06-12, e-mail: ivanbataev@ngs.ru

высокоскоростном соударении наблюдалось и до работы Карла при испытаниях боеприпасов, в которых фрагменты боеголовок соударялись со стальными бронепластинами и прочно сваривались с ними [5]. В работе Кроссланда и Вильямса [6] утверждается, что отдельные факты «прилипания» пуль или шрапнели к броневым пластинам были зафиксированы еще во время первой мировой войны. Следует, однако, отметить, что соответствующих ссылок в их работе приведено не было. Тем не менее такой вариант взаимодействия металлических тел кажется достаточно правдоподобным. В монографии [7] М.А. Мейерс отмечает, что после работы Карла объем наиболее значимых исследований был выполнен в 1950-х гг. Райнхартом и Пирсоном [8]. Отдельно в изучении анализируемых явлений Мейерс подчеркивает важную роль российских ученых.

Согласно А.А. Дерибасу [9], автором термина «сварка взрывом» (Explosive Welding) является американец В. Филипчук, который в 1957 г. случайно зафиксировал соединение алюминия и стали при штамповке взрывом. Схема сварки, предложенная в работе Филипчука, реализуется в воде и в настоящее время применяется редко. В монографии [9] утверждается, что в Советском Союзе соединение металлов с использованием энергии взрыва впервые было получено Н.М. Сытым (примерно во второй половине 40-х гг. XX века) – одним из учеников М.А. Лаврентьева. Им был изготовлен монолитный стержень из пучков медной проволоки, обмотанных детонирующим шнуром. Однако особого внимания этому эксперименту уделено не было. Кроме того, в группе М.А. Лаврентьева при изучении кумулятивных зарядов было получено соединение меди со сталью, на котором отчетливо наблюдалось известное для сварки взрывом явление волнообразования. Тем не менее данный эксперимент вряд ли относится к технологии сварки.

В работе [10] приводятся воспоминания самого академика Лаврентьева, в которых утверждается, что сварка взрывом была зафиксирована сотрудниками Института гидродинамики СО РАН при разработке технологии упрочнения заготовок железнодорожных стрелочных переводов. В соответствии с этой технологией на стальную заготовку металась металлическая пластина и в некоторых случаях наблюдалось их соеди-

нение. Такой же точки зрения придерживается А.А. Дерибас [9], который отмечал, что систематические исследования в области сварки взрывом в Советском Союзе начались в Институте гидродинамики СО РАН в 1961 г. после эксперимента Е.И. Биченкова, В.С. Седых, Ю.А. Тришина и самого А.А. Дерибаса. Качан М.С. в своих воспоминаниях утверждал, что изобретателем сварки взрывом в Советском Союзе был один из сотрудников М.А. Лаврентьева В.М. Седых, который целенаправленно работал над процессом соединения металлов взрывом и получил положительный результат независимо от работ по упрочнению стрелок [11].

Тем не менее очевидно, что интенсивное развитие технологий, связанных с процессами взрыва, в частности штамповки взрывом и упрочнения взрывом, рано или поздно должно было привести к выделению самостоятельного процесса сварки взрывом. Огромный объем работ, посвященных теоретическому и экспериментальному описанию этой технологии, был выполнен в 1960–1980 гг. Значимые результаты исследований опубликованы в монографиях А.А. Дерибаса [9], Ю.А. Конона с соавторами [12], И.Д. Захаренко [13], Б. Кроссланда [2] и др.

В настоящее время теоретические и экспериментальные исследования в области сварки взрывом продолжают в Институте гидродинамики СО РАН, а также в ряде других отечественных и зарубежных лабораторий. Из отечественных следует выделить группы Волгоградского государственного технического университета [14, 15], Института структурной макрокинетики РАН [16, 17]. Большой объем работ по изучению сваренных взрывом материалов проведен коллективами исследователей под руководством Б.А. Гринберга [18, 19], В.В. Рыбина [20], А.А. Бердыченко [21], А.Е. Розена [22]. Среди зарубежных групп, активно публикующих работы по сварке взрывом, выделяются коллективы университета г. Кумамото (Япония), Института металлургии и инженерии материалов Польской академии наук (Польша), Пекинского института технологий (Китай), университета Аннамалаи (Индия).

Взрывные технологии могут быть использованы для соединения заготовок различной формы, однако наиболее часто их применяют для сварки плоских либо трубчатых образцов. Бэн-

кер Д., являвшийся директором отделения плакирования взрывом компании DMC (Dynamic Materials Corporation) – мирового лидера в области сварки взрывом, отмечал, что этот тип сварки востребован, как правило, при получении крупногабаритных металлических пластин, используемых в производстве емкостей высокого давления, теплообменников, химического оборудования. Сваренные взрывом заготовки могут быть использованы также в качестве промежуточных вставок, применяемых в дальнейшем для сварки плавлением заготовок из разнородных материалов.

Максимальные размеры соединяемых взрывом заготовок могут превышать 10 м. Толщина плакирующих слоев находится в диапазоне от 0,025 до 100 мм, а толщина плакируемого материала – от 0,025 мм до 1 м и более. Одно из основных требований, предъявляемых к свариваемым материалам, касается их пластичности, способности выдерживать интенсивную деформацию без разрушения заготовок. Важный фактор, который должен быть также учтен при выборе сочетаний разнородных материалов, связан с возможностью формирования в зонах сварных швов хрупких интерметаллидных фаз.

Типичная схема сварки взрывом, реализуемая при использовании в качестве заготовок плоских образцов, представлена на рис. 1. Над неподвижной пластиной с зазором устанавливается метаемая пластина с нанесенным на нее слоем взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 1, а). Детонация инициируется электрическим детонатором, установленным с одной из сторон пластины. Детонационная волна с высокой скоростью распространяется по заряду ВВ и приводит к

образованию газообразных продуктов, оказывающих давление на метаемую пластину, ускоряя ее по направлению к нижней. Процесс сопровождается изгибом метаемой пластины (рис. 1, б) и ее косым соударением с неподвижным основанием. При определенных режимах соударения (скорости и угле соударения) происходит формирование прочного соединения.

Показано, что в процессе соударения пластин тонкий поверхностный слой свариваемых материалов «выдавливается» вперед в виде так называемой струи или пелены (в англоязычной литературе – «jet»). Это явление приводит к очистке соударяемых пластин от загрязнений и оксидных слоев и обеспечивает контакт ювенильных поверхностей. Высокие значения давлений и температур, достигаемые в зоне контакта, являются факторами, способствующими образованию прочной связи между соединяемыми заготовками.

Одной из характерных особенностей сварки взрывом является образование волнообразных границ раздела между свариваемыми пластинами [9]. Следует отметить, что такая форма границ проявляется не всегда, и плоские границы раздела часто обеспечивают прочные соединения [13].

Сварку взрывом обычно относят к процессам соединения в твердом состоянии [5, 7]. Тем не менее во многих работах показано, что тонкий слой материала, находящийся на границе между соединяемыми заготовками, претерпевает плавление [23, 24]. Расплавленные зоны могут вытягиваться в виде непрерывных прослоек либо формировать отдельные островки вдоль соединяемых пластин. Ввиду характерного тур-

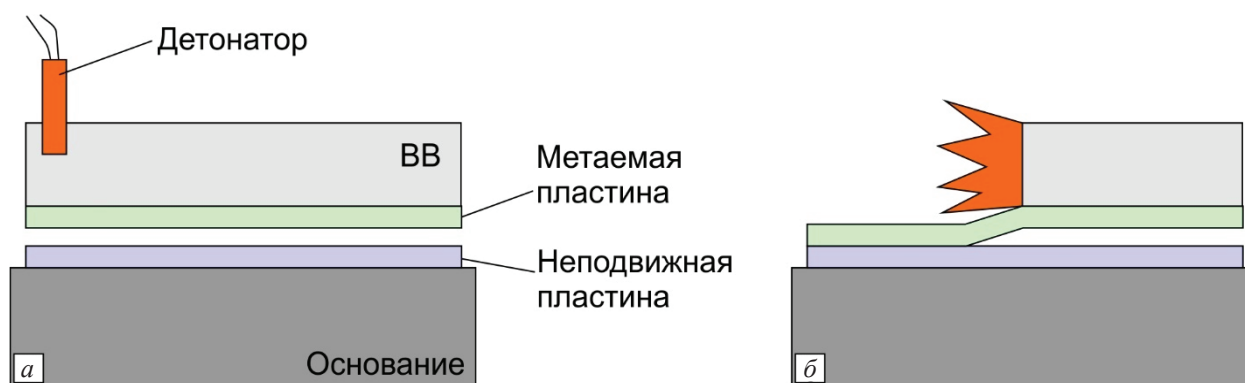


Рис. 1. Типичная схема сварки взрывом с параллельным расположением пластин

Fig. 1. Classical scheme of explosive welding with parallel arrangement of plates

булентного движения металла внутри расплавленных участков их часто называют вихревыми зонами.

Процесс формирования структуры при сварке взрывом вызывает большой интерес специалистов. Как правило, наиболее существенные структурные преобразования сосредоточены в тонких слоях вблизи поверхности сопряжения заготовок. Структура этих слоев определяет качество и набор эксплуатационных характеристик сваренных взрывом материалов. В данной работе для анализа структурных изменений в зоне сварного шва применены современные методы математического моделирования и экспериментальных исследований. В качестве материала для проведения сварки использовалась сталь 20. По ряду причин низкоуглеродистые стали являются удобным модельным материалом для анализа процессов, протекающих при сварке взрывом. Во-первых, они обладают высокой пластичностью и хорошо свариваются в широком диапазоне режимов соударения. Во-вторых, пластическая деформация и нагрев этих сталей приводят к формированию микроструктур, исследованию которых было посвящено множество работ (например, работы В.В. Рыбина [25]). Анализ структуры сварных швов позволяет воссоздать температурные и деформационные условия, которые имели место на границе соединяемых взрывом заготовок. На основании сравнения результатов математического моделирования и микроскопического анализа возможно сделать более точные выводы о процессах формирования структуры свариваемых взрывом материалов. Представленный в данной работе подход и полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для исследования сварки взрывом других, более сложных комбинаций материалов.

Таким образом, цель настоящей работы заключалась в изучении процессов формирования структуры в сваренных взрывом материалах и в подходе, основанном на совместном анализе результатов математического моделирования и структурных исследований.

Материалы и методы

Для сварки взрывом использовались пластины размерами $100 \times 50 \times 1$ мм из отожженной

стали 20. Поверхность пластин была тщательно очищена от оксидных пленок и промыта в ацетоне. Сварка взрывом осуществлялась по схеме, представленной на рис. 1. Расстояние между пластинами составляло 2 мм. В качестве ВВ использовался аммонит 6ЖВ. Толщина слоя ВВ составляла 23 мм. Образцы для структурных исследований вырезались из средней части полученного биметалла.

Микроструктурные исследования проводились на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m, растровом электронном микроскопе (РЭМ) Carl Zeiss EVO 50XVP и просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) FEI Tecnai G2 20 TWIN. Микрошлифы для металлографических исследований готовились по стандартной технологии. На первом этапе образец разрезался вдоль направления вектора точки контакта. Далее полученная заготовка заливалась под давлением в полимерный держатель, шлифовалась при помощи абразивных бумаг и полировалась с использованием алмазных суспензий дисперсностью до 1 мкм. Микроструктуру образцов выявляли химическим травлением в водном растворе хлорного железа. Объекты для ПЭМ готовились путем электролитического утонения в установке Struers Tenupol-5.

Математическое моделирование проводили в программном продукте Ansys Autodyn с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц. Размер частиц составлял 2,5 мкм. Для достижения компромисса между высоким пространственным разрешением и разумной длительностью расчета задача сварки взрывом была существенно упрощена и сведена к двумерной задаче косоугольного соударения двух стальных пластин размером 1×10 мм. Угол соударения пластин составлял 15° , скорость соударения – 1200 м/с. Используемые начальные условия были предварительно рассчитаны по методике, представленной в работе [9]. Прочностные свойства материалов описывались с использованием модели Джонсона–Кука. Коэффициенты, используемые в этой модели, а также другие физические параметры материалов, необходимые для расчетов, брались из стандартной базы данных пакета Autodyn. Подробное описание используемых в расчетах уравнений состояния, а также численные значения коэффициентов подробно даны в работе [26].

Результаты и обсуждение

Микроскопические исследования структурных преобразований, происходящих на границе свариваемых взрывом стальных пластин

Строение сварного соединения в поперечном сечении представлено на рис. 2, а. Межслойная граница имела типичную для сварки взрывом волнистую морфологию. Вблизи вершин и впадин волн располагались вихревые участки. Вокруг границы отчетливо выявлялась темная зона, в пределах которой материал претерпевал значительную деформацию, сопровождающуюся образованием большого количества дефектов (рис. 2, б, д). Между вихревыми участками и сильнодеформированной зоной находился узкий слой рекристаллизованных зерен (рис. 2, в). Основной объем свариваемых взрывом пластин деформирован незначительно. Наиболее существенным признаком пластической деформации материала являлось образование двойников в ферритных зернах (рис. 2, з).

Анализ строения вихревых зон с использованием методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии свидетельствует о формировании внутри вихревых зон мартенситной структуры (рис. 2, е-з). В рекристаллизованных микрообъемах сформирована субмикроструктурная зеренно-субзеренная структура (рис. 2, и). Материал темной зоны, наблюдаемой на рис. 2, б, преимущественно представлен полосовой структурой (рис. 2, к), типичной для стали, находящейся в сильнодеформированном состоянии. Для слабодеформированной зоны характерно присутствие ферритных зерен с повышенным количеством дислокаций (рис. 2, л) и двойников деформационного происхождения (рис. 2, м).

Моделирование процесса сварки взрывом с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц

Процессы формирования структуры материала на границе свариваемых взрывом заготовок осложнены множеством явлений, сопутствующих динамическому взаимодействию металлических заготовок. Происходящие при сварке структурные преобразования зависят от параметров соударения заготовок и возможных сочетаний свариваемых сплавов. Структура материала, формирующаяся в отдельном микро-

объеме сварного соединения, определяется особенностями температурных и деформационных преобразований, происходящих в процессе взаимодействия заготовок. В связи с тем что связанные со сваркой взрывом физические явления локализованы в узком слое, а скорость протекающих процессов чрезвычайно велика, на практике возможно использование лишь небольшого количества экспериментальных методик оценки температурно-деформационных изменений, имеющих место при реализации анализируемой технологии. По этой причине для изучения явлений, сопровождающих сварку взрывом, широко используют расчетные методы. Большой объем исследований, связанных с моделированием происходящих при сварке процессов, выполнен с применением метода конечных элементов. Этот метод дает адекватные результаты при расчете возникающих в процессе соударения давлений, однако в меньшей степени пригоден для описания явлений струе- и волнообразования. В последнее десятилетие для моделирования процессов сварки взрывом все более активно используется метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH – smooth particle hydrodynamics). Важнейшим его достоинством является возможность описания деформационных процессов с высокими степенями и соответствующих температурных изменений, происходящих при динамическом взаимодействии.

В данной работе метод SPH был использован для симуляции процесса косоугольного соударения двух пластин из стали 20 толщиной 1 мм (рис. 3). Анализ изображений, представленных на рис. 3, а, свидетельствует о том, что метод SPH убедительно воспроизводит процессы волнообразования, механического перемешивания взаимодействующих материалов и формирования струи, движущейся перед точкой соударения. Предсказываемая данной моделью картина деформации адекватна волнам, образующимся в реальном эксперименте (рис. 3, в). Характер распределения значений давления, возникающего в процессе соударения пластин, представлен на рис. 3, б. Анализ расчетных данных свидетельствует о том, что максимальные давления (более 30 ГПа) локализованы в зоне диаметром менее 1 мм, расположенной за точкой соударения. Следует обратить внимание на то, что ударная волна распространяется по всей толщине свариваемых

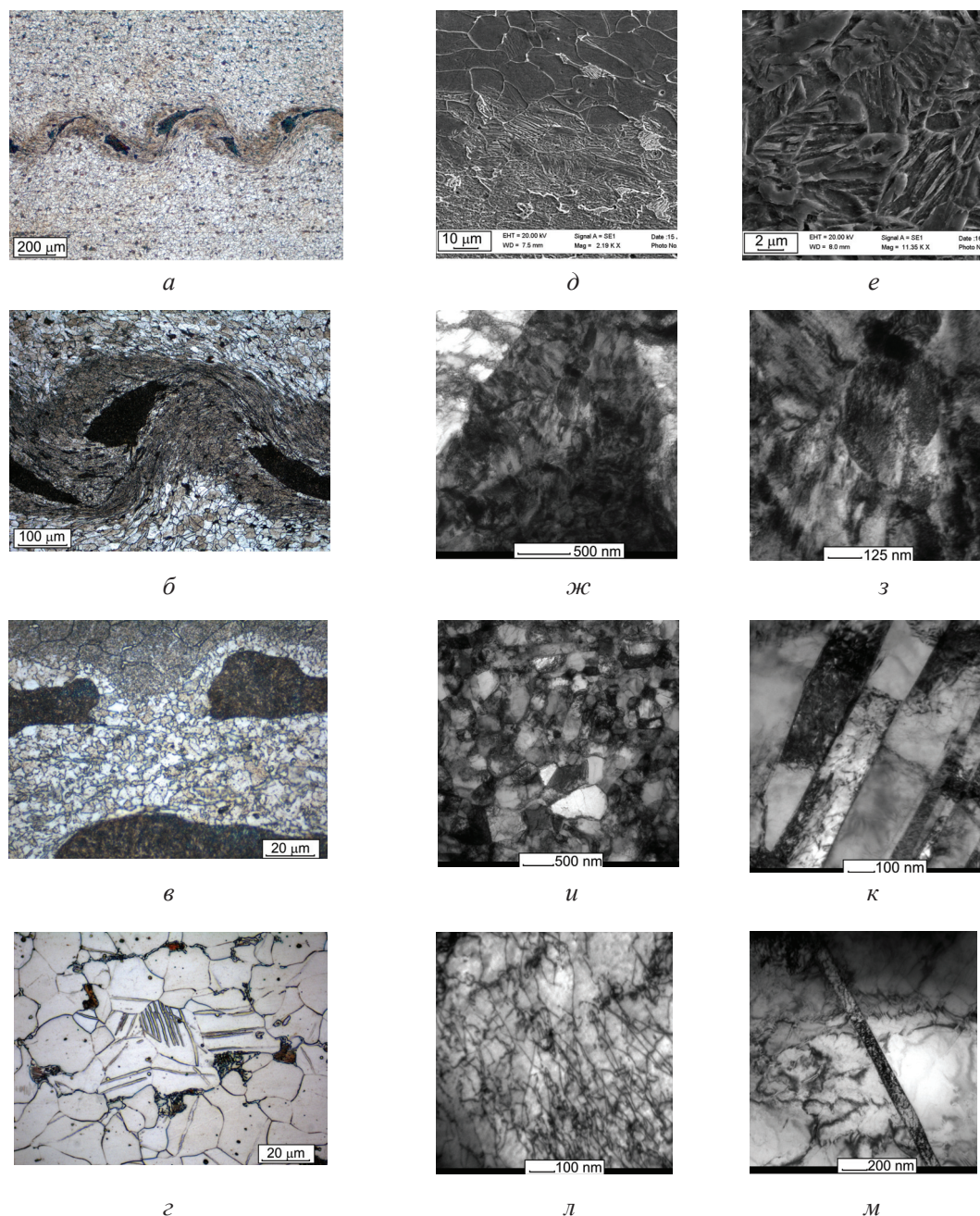


Рис. 2. Микроструктура стали 20, сформированная в процессе сварки взрывом: а – общий вид сварного соединения в поперечном сечении; б – структура материала вблизи межслойной границы; в – область, прилегающая к вихревым зонам; г – двойники деформации в слабodeформированной области стальной пластины; д – граница между слабodeформированной и сильноdeформированной зонами (РЭМ); е – мартенситная структура вихревых зон (РЭМ); ж, з – мартенситная структура вихревых зон (ПЭМ); и – зеренно-субзеренная структура материала вблизи вихревых зон (ПЭМ); к – полосовая структура в сильноdeформированной области (ПЭМ); л, м – дислокации и двойники деформации в слабodeформированной области (ПЭМ)

Fig. 2. Microstructures of low carbon steel (0.2 wt.%C), formed during explosive welding: а – cross section of the joint at low magnification; б – structure of material near the interface; в – area near the vortices; г – deformation twins in slightly deformed area; д – boundary between slightly deformed and significantly deformed areas; е – martensite structure of vortices (SEM); ж, з – martensite structure of vortices (TEM); и – granular and subgranular structure near the vortices (TEM); к – deformation bands in significantly deformed zone (TEM); л, м – dislocations and twins in slightly deformed zone (TEM)

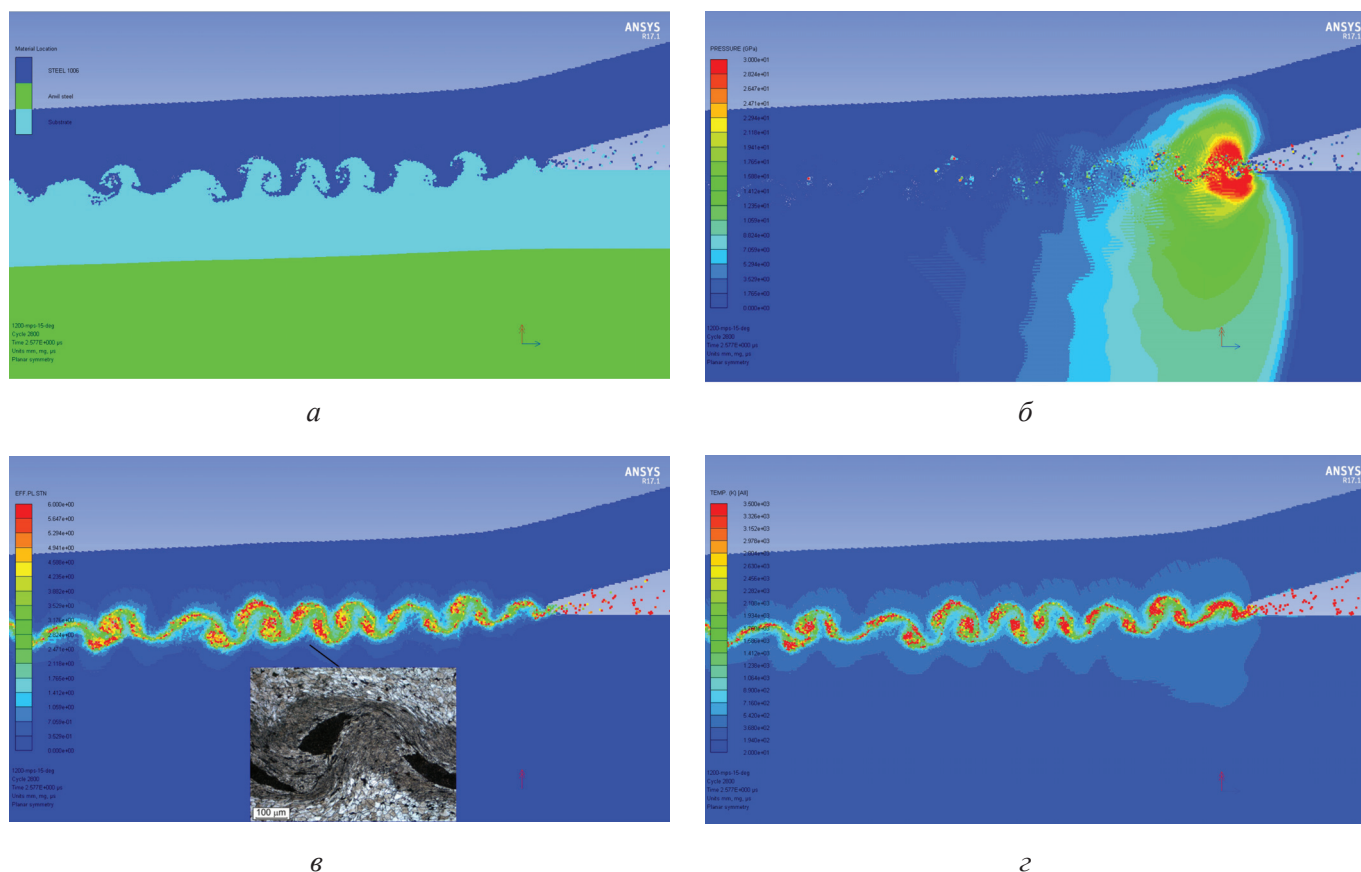


Рис. 3. Результаты моделирования процесса косоугольного соударения пластин из стали 20 методом гидродинамики сглаженных частиц:

a – перераспределение материала, иллюстрирующее формирование волновых и вихревых зон в области сварного шва; *б* – карта распределения значений давления; *в* – карта распределения значений деформации; *г* – карта распределения значений температуры

Fig. 3. Results of SPH simulation of an oblique collision of low carbon steel plates:

a – materials location; *б* – pressure distribution; *в* – plastic strain distribution; *г* – temperature distribution

заготовок. Таким образом, деформационному воздействию подвергается весь объем пластин. Фактически при сварке взрывом отсутствует типичная для других методов сварки зона основного металла с неизменной, т. е. первоначальной структурой.

Согласно расчетам максимальная степень пластической деформации при сварке взрывом достигает 6 и более. Однако значения такого уровня характерны лишь для очень узкого слоя (менее 50 мкм), расположенного вдоль границы соединяемых заготовок, а также для центров вихревых зон, возникающих вблизи гребней и впадин волн. Высокие значения деформации объясняются аномальным уровнем давления, приводящего к существенному нагреву материала и его термическому разупрочнению.

Результаты расчетов, представленные на рис. 3, в, позволяют сделать выводы о харак-

тере температурных изменений, сопутствующих сварке материалов взрывом. Узкая зона вдоль межслойных границ подвергается разогреву до температур, превышающих температуру плавления стали. Особенно высокие температуры достигаются в вихревых зонах. Результаты численного моделирования подтверждают предположение о том, что вихревые зоны в процессе сварки взрывом находятся в расплавленном состоянии.

Следует отметить, что используемая в Autodyn модель взаимодействия заготовок не позволяет учесть эффекты, обусловленные теплопроводностью и приводящие к охлаждению материала. В соответствии с используемой моделью процессы пластической деформации реализуются в адиабатических условиях и теплообмена между разогретым металлом и смежными объемами пластин не происходит. С учетом высоких скоростей соударения данное предпо-

ложение является, вероятно, корректным при описании процессов деформации и нагрева материала. Однако характер формирующейся в итоге структуры в значительной степени зависит от скорости охлаждения разогретого материала. Для оценки скорости охлаждения в работе [27] был разработан подход, основанный на решении уравнения теплопроводности методом конечных разностей. Начальные условия при этом получали путем анализа формирующейся при сварке взрывом микроструктуры. Полученные результаты свидетельствовали о том, что скорость охлаждения при сварке взрывом находится в диапазоне $10^4 \dots 10^7$ К/с, что существенно превышает значения, реализуемые при классической закалке сталей. Указанный диапазон скоростей охлаждения обусловлен высокой теплопроводностью металлических материалов и малым размером зон, нагретых до высоких температур. Таким образом, охлаждение сварных зон реализуется преимущественно за счет отвода тепла от межслойных границ во внутренние слои образца.

Формирование структуры в процессе сварки взрывом

Результаты математического моделирования и микроструктурного анализа, представленные в предыдущих разделах, а также в ряде опубликованных работ [28, 29], дают представление о механизме формирования структуры в процессе сварки взрывом. При высокоскоростном косом соударении заготовок пластическая деформация с высокими степенями наблюдается лишь в достаточно узкой зоне вблизи межслойной границы. Поскольку степень пластической деформации в этой зоне превышает 1, можно полагать, что деформация вблизи границы соответствует критерию «интенсивной пластической деформации».

По мере удаления от межслойной границы степень пластической деформации резко снижается, и основная часть материала деформируется лишь незначительно при прохождении ударных волн. Следует подчеркнуть также, что пластическое течение при сварке взрывом реализуется в условиях, близких к гидростатическому сжатию, что в совокупности с высокими значениями температуры, достигаемыми в зоне соударения, позволяет материалу деформироваться с высокой степенью без разрушения.

В соответствии с общепринятой дислокационной моделью пластической деформации материал в процессе сварки взрывом должен упрочняться за счет формирования значительного числа дефектов. В то же время в связи с высокой скоростью процесса сварки взрывом образующееся в результате деформации тепло не успевает отводиться во внутренние слои материала. Эта особенность обуславливает термическое разупрочнение стали. Конечная структура материала является результатом конкуренции действующих одновременно процессов деформационного упрочнения и термического разупрочнения.

Вблизи межслойной границы нагрев локальных микрообъемов происходит до значений, превышающих температуру плавления стали. Наиболее вероятно формирование расплава внутри вихревых зон, характерной особенностью которых является перемешивание микрообъемов материалов взаимодействующих пластин. Зоны, примыкающие к вихрям, также деформируются с высокими степенями (см. рис. 2 в, и). Тепла, выделяющегося в них, недостаточно для плавления стали, в то же время достигаемая температура превышает температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения. Высокая степень дефектности сильнодеформированной структуры способствует быстрой фазовой перекристаллизации материала. Температура в темных зонах, наблюдаемых на рис. 2, б, является недостаточно высокой для протекания фазовых превращений, сопровождаемых перекристаллизацией, а времени пребывания этих зон при высокой температуре не хватает для развития рекристаллизационных процессов. В соответствии с проведенными исследованиями для этих зон характерно формирование структуры полосового типа (рис. 2, к).

Последующие структурные превращения происходят в условиях высокоскоростного охлаждения, что объясняет образование мартенситной структуры в вихревых зонах. Этот факт хорошо коррелирует с результатами работы [27], в которой высокоскоростное охлаждение приводило к формированию в вихревых зонах аморфных и квазикристаллических фаз.

Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования и микроструктурных исследо-

ваний сварных соединений между пластинами стали 20. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Метод гидродинамики сглаженных частиц адекватно воспроизводит явления волно- и струеобразования при сварке взрывом. Геометрические параметры волн, предсказываемых моделью, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

2. Формирование структуры в процессе сварки взрывом происходит в условиях конкурирующих процессов деформационного упрочнения и термического разупрочнения. Высокие степени пластической деформации (более 1) наблюдаются лишь в узкой зоне вблизи межслойной границы. В результате высокой скорости деформационных процессов образующееся тепло не успевает отводиться во внутренние слои пластин, что приводит к локальному плавлению и фазовой перекристаллизации.

3. В связи с тем что основная часть свариваемых пластин остается слабдеформированной и соответственно слабонагретой, после завершения процесса соударения образовавшееся на границе тепло быстро отводится во внутренние объемы пластин. Достигаемые скорости охлаждения превышают 10^4 К/с, что приводит к образованию закалочных структур.

4. Представленный в работе подход, основанный на совместном анализе результатов математического моделирования и микроструктурных исследований, может быть эффективно использован для объяснения структурных превращений, имеющих место при сварке взрывом других сочетаний материалов.

Список литературы

1. *Crossland B.* Review of the present state-of-the-art in explosive welding // *Metals Technology*. – 1976. – Vol. 3, iss. 1. – P. 8–20. – doi: 10.1179/030716976803391845.
2. *Crossland B.* Explosive welding of metals and its application. – Oxford: Oxford University Press, 1982. – 233 p. – ISBN 978-0198591191.
3. *Shanthala K., Sreenivasa T.N.* Review on electromagnetic welding of dissimilar materials // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 11, iss. 4. – P. 363–373. – doi: 10.1007/s11465-016-0375-0.
4. *Carl L.R.* Brass welds made by detonation impulse // *Metal Progress*. – 1946. – Vol. 46. – P. 102–103.

5. *Blazynski T.Z.* Explosive welding, forming and compaction. – Netherlands: Springer, 1983. – 402 p. – ISBN 978-94-011-9751-9.

6. *Crossland B., Williams J.D.* Explosive welding // *Metallurgical Reviews*. – 1970. – Vol. 15, iss. 1. – P. 79–100. – doi: 10.1179/mtlr.1970.15.1.79.

7. *Meyers M.A.* Dynamic behavior of materials. – New York: John Wiley & Sons, 1994. – 668 p. – ISBN 9780471582625.

8. *Rinehart J.S., Pearson J.* Explosive working of metals. – New York: Macmillan, 1963. – 360 p. – ISBN 978-0080101699.

9. *Дерибас А.А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 224 с.

10. *Васильев А.А.* Укрошенный взрыв // *Наука из первых рук*. – 2015. – Т. 64, № 4. – С. 14–33.

11. *Качан М.С.* Изобретена сварка взрывом [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.proza.ru/2013/01/05/517> (дата обращения: 15.11.2017).

12. *Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д.* Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.

13. *Захаренко И.Д.* Сварка металлов взрывом. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с. – ISBN 5-343-00551-9.

14. *Лысак В., Кузьмин С.* Сварка взрывом. – Москва: Машиностроение, 2005. – 543 с. – ISBN 5-94275-220-6.

15. *Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгунов В.Г.* Титаностальные композиты и соединения. – Волгоград: ВолгГТУ, 2013. – 344 с. – ISBN 978-5-9948-1011-8.

16. Компьютерное моделирование деформации составляющих слоев биметалла в процессе сварки взрывом с использованием программы LS-DYNA / И.В. Денисов, А.Ю. Муйземнек, А.Е. Розен, О.Л. Первухина, Ю.А. Гордополов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2010. – № 5 (65). – С. 66–74.

17. Влияние состава атмосферы на образование соединения титана со сталью при сварке взрывом / О.Л. Первухина, А.А. Бердыченко, Л.Б. Первухин, Д.В. Олейников // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2006. – № 9. – С. 51–54.

18. Сварка взрывом: процессы и структуры / О.В. Антонова, Ю.П. Бешапошников, А.М. Власова, Б.А. Гринберг, Л.М. Гуревич, О.А. Елкина, М.А. Иванов, А.В. Иноземцев, В.Е. Кожевников, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, А.М. Пацелов, В.П. Пиллюгин, А.В. Плотников, М.С. Пушкин, В.В. Рыбин, Г.А. Салищев, О.В. Слаутин, А.П. Танкеев, Т.П. Толмачев, В.О. Харламов. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 236 с. – ISBN 978-5-9909179-0-3.

19. Fragmentation processes during explosion welding (review) / B. Grinberg, M. Ivanov, V.V. Rybin,

- O. Elkina, A.M. Patselov, O. Antonova, A. Inozemtsev, T.P. Tolmachev // Russian Metallurgy (Metally). – 2013. – Vol. 2013, iss. 10. – P. 727–737. – doi: 10.1134/S0036029513100030.
20. Rybin V.V., Zolotarevskii N.Yu., Ushanova E.A. Analysis of the misoriented structures in the model copper-copper compound formed by explosion welding // Technical Physics. – 2014. – Vol. 59, iss. 12. – P. 1819–1832. – doi: 10.1134/S106378421412024X.
21. Berdychenko A.A., Pervukhin L.B., Pervukhina O.L. Evolution of titanium structure in the zone of the joint formed by explosive welding // Metal Science and Heat Treatment. – 2009. – Vol. 51, iss. 9–10. – P. 476–481. – doi: 10.1007/s11041-010-9196-7.
22. Розен А.Е. Разработка научных основ технологических процессов взрывного прессования, формирования структуры и свойств сегнетокерамических материалов: дис. ... д-ра техн. наук. – Волгоград, 1999. – 391 с.
23. Explosively welded multilayer Ni-Al composites / I.A. Bataev, T.S. Ogneva, A.A. Bataev, V.I. Mali, M.A. Esikov, D.V. Lazurenko, Y. Guo, A.M. Jorge Junior // Materials and Design. – 2015. – Vol. 88. – P. 1082–1087. – doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.103.
24. Metallic glass formation at the interface of explosively welded Nb and stainless steel / I.A. Bataev, K. Hokamoto, H. Keno, A.A. Bataev, I.A. Balagansky, A.V. Vinogradov // Metals and Materials International. – 2015. – Vol. 21, iss. 4. – P. 713–718. – doi: 10.1007/s12540-015-5020-7.
25. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
26. Батаев И.А. Структура и механические свойства многослойных композиционных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 226 с.
27. High cooling rates and metastable phases at the interfaces of explosively welded materials / I.A. Bataev, D.V. Lazurenko, S. Tanaka, K. Hokamoto, A.A. Bataev, Y. Guo, A.M. Jorge // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 135. – P. 277–289. – doi: 10.1016/j.actamat.2017.06.038.
28. Formation and structure of vortex zones arising upon explosion welding of carbon steels / I.A. Bataev, A.A. Bataev, V.I. Mali, V.G. Burov, E.A. Prihod'ko // Physics of Metals and Metallography. – 2012. – Vol. 113, iss. 3. – P. 233–240. – doi: 10.1134/S0031918X12030039.
29. Structural changes of surface layers of steel plates in the process of explosive welding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, V.I. Mali, V.A. Bataev, I.A. Balaganskii // Metal Science and Heat Treatment. – 2014. – Vol. 55, iss. 9–10. – P. 509–513. – doi: 10.1007/s11041-014-9663-7.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2017 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science



Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Structure of Explosively Welded Materials: Experimental Study and Numerical Simulation

Ivan Bataev *

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

 <http://orcid.org/0000-0003-2871-0269>,  ivanbataev@ngs.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 July 2017

Revised: 31 October 2017

Accepted: 15 November 2017

Available online: 15 December 2017

Keywords

Explosive welding

Explosive cladding

Waves

Vortices

Simulation

Smooth particle hydrodynamics

Structure

Electron microscopy

Deformation

Steel

Melting

ABSTRACT

Purpose: the properties of explosively welded materials to a large extent depend on structure of thin layers which appear near the interface during a high velocity collision of workpieces. The main purpose of this paper was to study formation of materials structure in these layers by simultaneous analysis of numerical simulation results and results of materials characterization. **Methods:** low carbon steel plates (0.2 wt. %C) were used for explosive welding. The structure of explosively welded material was studied using light microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The numerical simulation was carried out using smooth particle hydrodynamic (SPH) method in Ansys Autodyn software. **Results and discussion:** the most significant structural changes occur in a thin layer near the interface of explosively welded materials. The main part of the sample is just insignificantly deformed and slightly heated. High strain rate deformation in the vicinity of the interface leads to localization of strain and significant heating of materials. The conditions of the deformation during the welding are close to adiabatic. Due to the high temperature diffusivity and large temperature gradients the subsequent transfer of the heat to slightly heated layers occurs with high rates ($10^4 \dots 10^7$ K/s). This leads to formation of metastable structures (in this study, the martensite structures were observed). The structure of the welded plates forms as a result of competition between strain hardening and temperature softening processes. The SPH simulation successfully reproduced wave formation, vortices formation and jetting phenomena. The geometry of the interface predicted by the simulation was in a very good agreement with geometry, observed in metallographic study. The simulation predicts that the strain in a very thin layer near the interface can exceed $\varepsilon = 6$.

Funding:

This research was supported by Ministry of Education and Science of Russian Federation according to state task No 11.7662.2017/BCh.

For citation: Bataev I.A. Structure of explosively welded materials: experimental study and numerical simulation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2017, no. 4 (77), pp. 55–67. doi: 10.17212/1994-6309-2017-4-55-67. (In Russian).

References

1. Crossland B. Review of the present state-of-the-art in explosive welding. *Metals Technology*, 1976, vol. 3, iss. 1, pp. 8–20. doi: 10.1179/030716976803391845.
2. Crossland B. *Explosive welding of metals and its application*. Oxford, Oxford University Press, 1982. 233 p. ISBN 978-0198591191.
3. Shanthala K., Sreenivasa T.N. Review on electromagnetic welding of dissimilar materials. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2016, vol. 11, iss. 4, pp. 363–373. doi: 10.1007/s11465-016-0375-0.
4. Carl L.R. Brass welds made by detonation impulse. *Metal Progress*, 1946, vol. 46, iss. 1, pp. 102–103.

* Corresponding author

Ivan A. Bataev, Ph.D. (Engineering), Assistant Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa, 630073, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (383) 346-06-12, e-mail: ivanbataev@ngs.ru

5. Blazynski T.Z. *Explosive welding, forming and compaction*. Netherlands, Springer, 1983. 402 p. ISBN 978-94-011-9751-9.
6. Crossland B., Williams J.D. Explosive welding. *Metallurgical Reviews*, 1970, vol. 15, iss. 1, pp. 79–100. doi: 10.1179/mtlr.1970.15.1.79.
7. Meyers M.A. *Dynamic behavior of materials*. New York, John Wiley & Sons, 1994. 668 p. ISBN 9780471582625.
8. Rinehart J.S., Pearson J. Explosive working of metals. New York, Macmillan, 1963. 360 p. ISBN 978-0080101699.
9. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and welding by explosion]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 224 p.
10. Vasil'ev A.A. Ukroshchennyi vzryv [The controlled explosion]. *Nauka iz pervykh ruk = Science First Hand*, 2015, vol. 64, no. 4, pp. 14–33. (In Russian).
11. Kachan M.S. *Izobretena svarka vzryvom* [Explosive welding was discovered]. Available at: <https://www.proza.ru/2013/01/05/517> (accessed 15.11.2017).
12. Konon Yu.A., Pervukhin L.B., Chudnovskii A.D. *Svarka vzryvom* [Explosion welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 216 p.
13. Zakharenko I.D. *Svarka metallov vzryvom* [Explosive welding of metals]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1990. 205 p. ISBN 5-343-00551-9.
14. Lysak V., Kuz'min S. *Svarka vzryvom* [Explosive welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 543 p. ISBN 5-94275-220-6.
15. Trykov Yu.P., Gurevich L.M., Shmorgun V.G. *Titanostal'nye kompozity i soedineniya* [Titanium-steel composites and joints]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2013. 344 p. ISBN 978-5-9948-1011-8.
16. Denisov I.V., Muizemnek A.U., Rozen A.E., Pervukhina O.L., Gordoplov U.A. Komp'yuternoe modelirovanie deformatsii sostavlyayushchikh sloev bimetalla v protsesse svarki vzryvom s ispol'zovaniem programmy LS-DYNA [Computer modelling of deformation of making layers of bimetal in the course of explosion welding with program LS-DYNA]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2010, vol. 4, no. 5 (65), pp. 66–74.
17. Pervukhina O.L., Berdychenko A.A., Pervukhin L.B., Oleinikov D.V. Vliyanie sostava atmosfery na obrazovanie soedineniya titana so stal'yu pri svarke vzryvom [The influence of the composition of the atmosphere on formation of joint between titanium and steel by explosion welding]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2006, no. 9, pp. 51–54.
18. Antonova O.V., Besshaposhnikov Yu.P., Vlasova A.M., Grinberg B.A., Gurevich L.M., Elkina O.A., Ivanov M.A., Inozemtsev A.V., Kozhevnikov V.E., Kuz'min S.V., Lysak V.I., Patselov A.M., Pilyugin V.P., Plotnikov A.V., Pushkin M.S., Rybin V.V., Salishchev G.A., Slautin O.V., Tankeev A.P., Tolmachev T.P., Kharlamov V.O. *Svarka vzryvom: protsessy i struktury* [Explosion welding: processes and structures]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2017. 236 p. ISBN 978-5-9909179-0-3.
19. Grinberg B., Ivanov M., Rybin V.V., Elkina O., Patselov A.M., Antonova O., Inozemtsev A., Tolmachev T.P. Fragmentation processes during explosion welding (review). *Russian Metallurgy (Metally)*, 2013, vol. 2013, iss. 10, pp. 727–737. doi: 10.1134/S0036029513100030.
20. Rybin V.V., Zolotorevskii N.Yu., Ushanova E.A. Analysis of the misoriented structures in the model copper-copper compound formed by explosion welding. *Technical Physics*, 2014, vol. 59, iss. 12, pp. 1819–1832. doi: 10.1134/S106378421412024X.
21. Berdychenko A.A., Pervukhin L.B., Pervukhina O.L. Evolution of titanium structure in the zone of the joint formed by explosive welding. *Metal Science and Heat Treatment*, 2009, vol. 51, iss. 9–10, pp. 476–481. doi: 10.1007/s11041-010-9196-7.
22. Rozen A.E. *Razrabotka nauchnykh osnov tekhnologicheskikh protsessov vzryvnogo pressovaniya, formirovaniya struktury i svoystv segnetokeramicheskikh materialov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of scientific basis of technological processes of explosion compaction, formation of structure and properties of segnetoceramic materials. Dr. eng. sci. diss.]. Volgograd, 1999. 391 p.
23. Bataev I.A., Ogneva T.S., Bataev A.A., Mali V.I., Esikov M.A., Lazurenko D.V., Guo Y., Jorge Junior A.M. Explosively welded multilayer Ni-Al composites. *Materials and Design*, 2015, vol. 88, pp. 1082–1087. doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.103.
24. Bataev I.A., Hokamoto K., Keno H., Bataev A.A., Balagansky I.A., Vinogradov A.V. Metallic glass formation at the interface of explosively welded Nb and stainless steel. *Metals and Materials International*, 2015, vol. 21, iss. 4, pp. 713–718. doi: 10.1007/s12540-015-5020-7.

25. Rybin V.V. *Bol'shie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov* [Large plastic deformations and failure of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 224 p.

26. Bataev I.A. *Struktura i mekhanicheskie svoystva mnogosloinykh kompozitsionnykh materialov, sformirovannykh po tekhnologii svarki vzryvom tonkolistovykh zagotovok iz nizkouglerodistoi stali*. Diss. kand. tekhn. nauk [Structure and mechanical properties of multilayer composite materials, fabricated by explosion welding of thin sheets of low carbon steel. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2010. 226 p.

27. Bataev I.A., Lazurenko D.V., Tanaka S., Hokamoto K., Bataev A.A., Guo Y., Jorge A.M. High cooling rates and metastable phases at the interfaces of explosively welded materials. *Acta Materialia*, 2017, vol. 135, pp. 277–289. doi: 10.1016/j.actamat.2017.06.038.

28. Bataev I.A., Bataev A.A., Mali V.I., Burov V.G., Prikhod'ko E.A. Formation and structure of vortex zones arising upon explosion welding of carbon steels. *Physics of Metals and Metallography*, 2012, vol. 113, iss. 3, pp. 233–240. doi: 10.1134/S0031918X12030039.

29. Bataev I.A., Bataev A.A., Mali V.I., Bataev V.A., Balaganskii I.A. Structural changes of surface layers of steel plates in the process of explosive welding. *Metal Science and Heat Treatment*, 2014, vol. 55, iss. 9–10, pp. 509–513. doi: 10.1007/s11041-014-9663-7.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2017 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).