



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Анализ температурно-деформационных процессов при сварке взрывом композиции А5 / 12Х18Н10Т с использованием численного моделирования

Юлия Малютина^{1, 2, а, *}, Татьяна Огнева^{1, b}, Иван Батаев^{1, c}, Елена Ложкина^{1, d},
Владимир Пай^{2, e}, Ярослав Лукьянов^{2, f}, Евгений Кузьмин^{3, j}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 15, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ Волгоградский государственный технический университет, пр. им. В.И. Ленина, 28, г. Волгоград, 400005, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-0305-7518>,  iuliamaliutina@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-0081-283X>,  pandorra.06@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>,  ivanbataev@ngs.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-7119-4944>,  lozhkinaelena1987@gmail.com;

^e  <https://orcid.org/0009-0009-3819-8431>,  pai@hydro.nsc.ru; ^f  <https://orcid.org/0000-0003-4526-9399>,  lukyanov@hydro.nsc.ru;

^j  <https://orcid.org/0000-0002-1037-5186>,  e.v.kuzmin@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.3 : 621.791

История статьи:

Поступила: 08 апреля 2026

Рецензирование: 16 апреля 2026

Принята к печати: 30 апреля 2026

Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Сварка взрывом

Метод SPH

Алюминий

Нержавеющая сталь

Угол соударения

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-01117, <https://rscf.ru/project/25-23-01117/>.

Благодарности

Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (НГТУ).

АННОТАЦИЯ

Введение. Сварка взрывом является эффективным методом получения неразъемных соединений разнородных материалов, в частности композиций алюминий-сталь. Традиционные методы сварки редко применяются для соединения таких пар из-за их склонности к образованию хрупких интерметаллидных фаз. Одним из основных параметров, определяющих качество сварного шва при сварке взрывом, является угол соударения γ . **Цель работы:** исследование влияния угла соударения на температурно-деформационные характеристики в зоне соединения при высокоскоростном соударении пластин алюминиевого сплава А5 и стали 12Х18Н10Т с использованием численного моделирования. **Методы исследования.** Для моделирования применялся метод гидродинамики сглаженных частиц, который был реализован в программном комплексе Ansys Autodyn 2020 R2. Во всех расчетах скорость точки контакта была одинаковой $V_K = 2500$ м/с, а угол соударения варьировался ($9,5^\circ$, 12° , $14,5^\circ$). Для описания свойств материалов использовались уравнение состояния Ми – Грюнайзена и модель прочности Джонсона – Кука. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что с увеличением угла соударения возрастают температура и степень пластической деформации, тогда как давление изменяется немонотонно, достигая наибольшего значения ($8,87$ ГПа) при $\gamma = 12^\circ$. При $\gamma = 12^\circ$ формируется наиболее регулярная граница раздела, а при $\gamma = 14,5^\circ$ наблюдается формирование несимметричной волнообразной границы с внедрением стали в алюминий. Все исследованные режимы обеспечивают локальное плавление алюминия при сохранении стали в твердом состоянии. Наиболее предпочтительным из исследованных углов соударения, обеспечивающим благоприятное сочетание давления, температуры и морфологии границы раздела в системе А5 / 12Х18Н10Т при скорости 2500 м/с, является 12° .

Для цитирования: Анализ температурно-деформационных процессов при сварке взрывом композиции А5 / 12Х18Н10Т с использованием численного моделирования / Ю.Н. Малютина, Т.С. Огнева, И.А. Батаев, Е.А. Ложкина, В.В. Пай, Я.Л. Лукьянов, Е.В. Кузьмин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 335–350. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28-2-335-350.

Введение

Сварка взрывом представляет собой один из наиболее эффективных методов соединения разнородных материалов, в частности композиций алюминий-сталь [1–3]. Биметаллы такого типа широко востребованы в химическом машиностроении, судостроении и энергетике благодаря

*Адрес для переписки

Малютин Юлиа Николаевна, к.т.н., доцент

Новосибирский государственный технический университет,

пр. К. Маркса, 20,

630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: +7 913 476-99-90, e-mail: iuliamaliutina@gmail.com

сочетанию высокой прочности и низкой стоимости стали с низкой плотностью и высокой теплопроводностью, а также электропроводностью алюминия [4–6]. Однако соединение этих материалов традиционными методами сварки, основанными на плавлении, затруднено из-за образования хрупких интерметаллидных фаз (FeAl , Fe_3Al и др.), которые резко снижают прочность сварного шва.

Экспериментальному исследованию сварки взрывом пары «алюминий – нержавеющая сталь» посвящен ряд работ [7–12]. В работе Б.С. Злобина выполнен анализ кинематических параметров, определяющих начало образования соединения при косом соударении алюминиевых и стальных пластин, а также приведены экспериментальные данные о течении материала в зазоре между соударяющимися заготовками [7]. Формированию интерметаллидных фаз в биметаллах алюминий-сталь при сварке взрывом посвящены работы [13–15]. Установлено, что термическая обработка сваренных взрывом композитов приводит к образованию хрупких интерметаллидных фаз различного стехиометрического состава, существенно снижающих прочность соединения.

Процесс сварки взрывом основан на высокоскоростном соударении заготовок, для которого характерны большие пластические деформации и локальное выделение тепла. Одним из основных параметров, определяющих характер пластического течения материала в зоне соединения и, как следствие, качество сварки, является угол соударения (γ) [12]. От его величины зависят морфология сварного шва, форма струи и температурно-деформационные условия формирования соединения [16, 17]. F. Grignon с соавторами [16] экспериментально и расчетными методами показали, что при сварке взрывом алюминия с алюминием малые углы соударения ($\gamma = 4^\circ$) способствуют формированию гладкой границы, тогда как увеличение угла до 14° приводит к волновой морфологии соединения.

В соответствии с исследованиями, проведенными с помощью численного моделирования, было показано, что угол соударения определяет контактное давление, сдвиговые напряжения и величину пластической деформации [17]. В макромасштабе характер распределения давления в окрестности точки контакта в значитель-

ной степени зависит от скорости соударения. Эта скорость, в свою очередь, определяется как скоростью метаемой пластины, так и величиной угла соударения γ . Таким образом, параметры соударения существенно влияют на распределение температурных и деформационных полей в зоне соединения. На наноуровне параметры соударения влияют на особенности дислокационного скольжения, а также протекание диффузионных процессов [17].

Экспериментальное определение температуры, а также скорости и степени деформации в процессе высокоскоростного соударения крайне сложно и часто невозможно. Одна из редких работ в этой области представлена В.В. Паем с соавторами, измерение температуры при взрывном обжиге ими проводилось с помощью метода естественной термопары [18]. Несмотря на появление подобных экспериментальных подходов, математическое моделирование является эффективным инструментом для изучения особенностей процесса высокоскоростного соударения. В последние годы для моделирования задач, связанных с реализацией больших пластических деформаций, часто применяется бессеточный метод гидродинамики сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) [19–21]. В работах группы S. Tanaka и K. Nakamoto было показано, что метод SPH позволяет с высокой точностью воспроизводить процессы формирования волновой границы, вихревых зон и струи, а также корректно описывать кинематику процесса соударения [22, 23]. Тем не менее системный анализ влияния угла соударения на комплекс термомеханических характеристик применительно к паре A5 / 12X18H10T в литературе представлен недостаточно полно, и получение таких количественных закономерностей представляет научную новизну настоящей работы.

Целью работы является исследование влияния угла соударения на температурные и деформационные характеристики процесса сварки алюминия A5 с нержавеющей сталью 12X18H10T при высокоскоростном соударении с использованием численного моделирования методом гидродинамики сглаженных частиц (SPH).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

– построение двумерной модели процесса сварки взрывом композиции A5 / 12X18H10T

методом SPH в программном комплексе Ansys Autodyn при скорости точки контакта 2500 м/с и углах соударения 9,5°, 12° и 14,5°;

- исследование морфологии границы раздела в зависимости от угла соударения;

- анализ влияния угла соударения на давление, температуру, эффективную пластическую деформацию и скорость деформации в зоне соединения;

- определение оптимального угла соударения, обеспечивающего формирование качественного биметаллического соединения.

Методика исследований

Численное моделирование проводилось в программном пакете Ansys Autodyn 2020 R2 с применением бессеточного метода гидродинамики сглаженных частиц, который широко используется при моделировании сварки взрывом [24, 25]. Моделирование осуществлялось в двумерной постановке. Схема расчетной области представлена на рис. 1. В качестве метаемой заготовки выступала пластина из алюминиевого сплава марки А5 (Al) размерами 2×15 мм. Неподвижная пластина размерами 1×15 мм была выполнена из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т (SS). Скорость точки контакта во всех случаях составляла $V_K = 2500$ м/с. Угол соударения γ варьировался в диапазоне от 9,5° до 14,5° с шагом 2,5°. Начальная температура всех частиц принималась равной 293 К. Для обоснования выбора размера частиц SPH была проведена серия расчетов с размерами частиц 7,5...200 мкм. Анализ внутренней энергии системы показал, что при размере 10 мкм и мельче ее значения стабилизируются в преде-

лах менее 5 %, что указывает на хорошую сходимость решения. Таким образом, для данного исследования размер частиц был выбран равным 10 мкм, а общее количество частиц составило 450 000.

Кинематические параметры соударения определялись на основе геометрического анализа параллельной схемы сварки по формулам, приведенным в работе [26], и использовались для задания начальных условий при моделировании. На внешних поверхностях пластин заданы условия свободной границы, что является стандартным подходом в задачах высокоскоростного косоуго соударения.

В качестве уравнения состояния в настоящем исследовании использовалась модифицированная модель Ми – Грюнайзена, а в качестве модели прочности – модель Джонсона – Кука. Обе эти модели реализованы в Ansys Autodyn и широко применяются для моделирования процессов высокоскоростных соударений, сопровождающихся большими пластическими деформациями [27]. Константы материалов, используемых в уравнении Джонсона – Кука, а также в уравнении состояния Ми – Грюнайзена, представлены в табл. 1 и 2.

Для оценки влияния угла соударения на температурные и деформационные процессы была проведена серия расчетов с постоянной скоростью точки контакта $V_K = 2500$ м/с и различными углами соударения γ (9,5°, 12° и 14,5°). При моделировании анализировались величины температуры, давления, эффективной пластической деформации и скорости деформации в зоне соударения.

Результаты и их обсуждение

В данном разделе представлены результаты численного моделирования процесса высокоскоростного соударения пластин алюминия А5 и стали 12Х18Н10Т при различных углах соударения γ (9,5°, 12° и 14,5°). Анализ проводился на основе морфологии сварного соединения (рис. 2), распределения полей давления, температуры, эффективной пластической деформации и скорости деформации (рис. 3, 4), а также их временных зависимостей (рис. 5, 6).

На рис. 2 представлены особенности формирования межслойной границы в процессе высо-

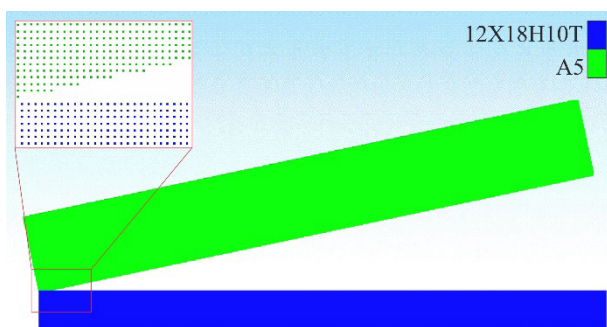


Рис. 1. Расчетная область до начала соударения

Fig. 1. Computational domain before the collision

Таблица 1

Table 1

Параметры уравнения состояния Ми – Грюнайзена [28–30]
Parameters of Mie-Grüneisen equation of state [28–30]

Материал / Material	Начальная плотность ρ_0 , г/см ³ / Initial density ρ_0 , g/cm ³	Коэффициент Грюнайзена, Γ_0 / Grüneisen coefficient, G_0	Параметр $C1$, м/мс / Parameter $C1$, m/ms	Параметр $S1$ / Parameter $S1$	Начальная температура, T_n , К / Initial temperature, T_{room} , К	Удельная теплоемкость c_v , кДж/г · К / Specific heat capacity c_v , kJ/g · К
Al (A5) / <i>Aluminium</i> 1050A	2,712	1,14	5,45	1,25	293	$8,84 \cdot 10^{-4}$
SS (12X18H10T) / <i>Steel 321</i>	7,9	1,93	4,57	1,49	293	$4,23 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Table 2

Параметры модели прочности Джонсона – Кука [28, 29, 31]
Parameters of the Johnson-Cook strength model [28, 29, 31]

Материал / Material	Al (A5) / <i>Al (1050A aluminium)</i>	SS (12X18H10T) / <i>SS (321 steel)</i>
Модуль сдвига G , ГПа / Shear modulus G , GPa	27,6	78
Начальный предел текучести A , ГПа / Initial yield strength A , GPa	0,1484	0,31
Константа упрочнения B , ГПа / Hardening constant B , GPa	0,3455	1
Показатель экспоненты n / Exponent n	0,183	0,65
Константа скорости деформации C / Strain rate constant C	0,001	0,07
Показатель экспоненты m / Exponent m	0,895	1
Температура плавления $T_{пл}$, К / Melting point T_{melt} , К	929	1673
Начальная скорость деформации ($/с$) / Initial strain rate ($/s$)	1	1
Корректировка скорости деформации / Strain rate correction	1 st Order	1 st Order

коскоростного соударения пластин алюминия А5 (показаны зеленым цветом) и стали 12Х18Н10Т (показаны синим цветом) для трех значений угла соударения γ : 9,5° (рис. 2, а–а₂), 12° (рис. 2, б–б₂) и 14,5° (рис. 2, в–в₂) в последовательные моменты времени.

Во всех случаях наблюдается формирование границы раздела, характерной для сварки взрывом. Для всех исследованных режимов спустя некоторое время после начала соударения перед точкой контакта образуется струя. В начальной зоне соударения граница раздела является практически плоской. Однако по мере развития процесса отклонение рельефа межслойной границы от идеальной линии постепенно возрастает. При всех анализируемых углах граница остается

четкой, без значительного перемешивания материалов.

При угле соударения $\gamma = 9,5^\circ$ (рис. 2, а–а₂) отклонения границы раздела от плоской формы выражены слабо. Рельеф границы раздела имеет малую амплитуду и практически симметричную форму. Формирование рельефа происходит относительно медленно, что связано с недостаточной сдвиговой деформацией. При $\gamma = 12^\circ$ (рис. 2, б–б₂) наблюдается наиболее упорядоченный рельеф границы. Процесс формирования границы идет интенсивнее, чем при 9,5°, что указывает на более благоприятные гидродинамические условия. При $\gamma = 14,5^\circ$ (рис. 2, в–в₂) волнистая граница становится несимметричной и ориентированной в сторону более пластично-

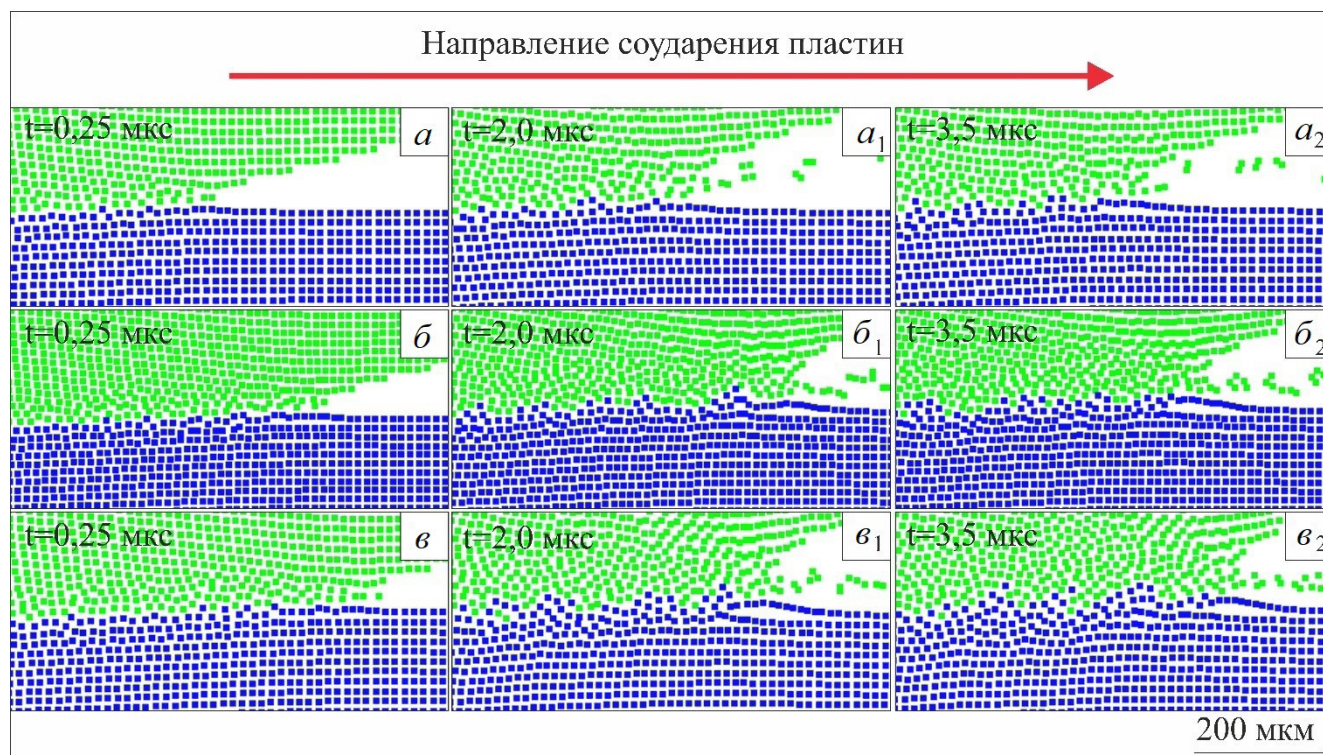


Рис. 2. Формирование рельефа границы раздела при соударении пластин в различные моменты времени: 9,5° ($a-a_2$), 12° ($б-б_2$), 14,5° ($в-в_2$) (зеленые частицы соответствуют алюминию А5, синие частицы соответствуют стали 12Х18Н10Т)

Fig. 2. Formation of the interface relief during collision of plates at different moments in time:

9.5° ($a-a_2$), 12° ($б-б_2$), 14.5° ($в-в_2$) (green particles correspond to 1050A aluminum, blue particles correspond to 321 steel)

го алюминия. Отмечается более раннее начало формирования рельефа по сравнению с 9,5° и 12°. Однако в момент $t = 3,5$ мкс (рис. 2, $в_2$) форма границы становится менее регулярной и появляются отдельные зоны с локальным внедрением стали в алюминий. Формирование несимметричного волнообразного рельефа может быть связано с развитием сдвиговой неустойчивости [2, 26, 32]. При увеличении угла соударения возрастает тангенциальная составляющая скорости соударения, что приводит к интенсивному перемешиванию материалов на границе раздела. С усилением сдвиговой компоненты скорости процесс пластического течения теряет устойчивость, и формируются локальные несимметричные внедрения более твердой стали в пластичный алюминий. Это объяснение также согласуется с немонотонным изменением давления при увеличении угла соударения.

Таким образом, увеличение угла соударения с 9,5° до 14,5° ускоряет кинетику формирования волнообразного рельефа границы, повышает амплитуду волн, но при этом снижает упорядоченность границы раздела между пластинами алю-

миния А5 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Наиболее упорядоченный рельеф границы, который может рассматриваться как предпочтительный для данного сочетания материалов, формируется при $\gamma = 12^\circ$.

Для проверки достоверности численной модели была проведена сварка взрывом образцов А5 и 12Х18Н10Т при угле соударения 12° и скорости точки контакта $V_K = 2500$ м/с. На рис. 3 представлено поперечное сечение полученного соединения. Из полученных результатов следует, что граница раздела является практически плоской, без волн и макроскопических дефектов, что качественно соответствует расчетной морфологии, показанной на рис. 2, б. Таким образом, предложенная модель корректно описывает формирование соединения при данном угле соударения.

На рис. 4 показаны распределения давления и температуры в зоне контакта для трех значений угла соударения в момент $t = 1,5$ мкс. Во всех случаях наблюдается локализация высоких давлений и температур вдоль границы раздела пластин, что свидетельствует о форми-

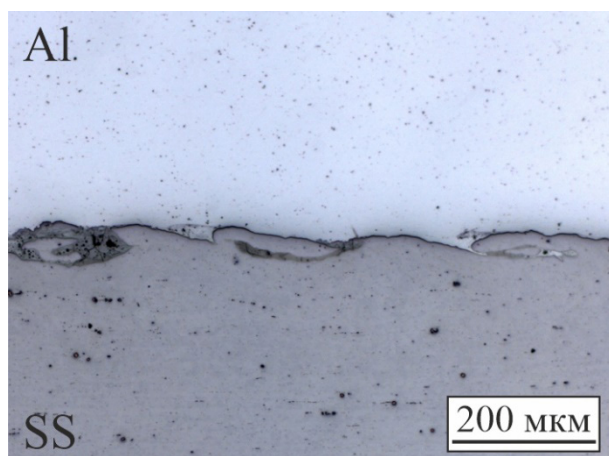


Рис. 3. Поперечное сечение сварного соединения А5 / 12Х18Н10Т, полученного при $\gamma = 12^\circ$ и $V_K = 2500$ м/с (эксперимент)

Fig. 3. Cross-section of the 1050A / 321 explosively weld joint, obtained at $\gamma = 12^\circ$ and $V_c = 2500$ m/s (experiment)

ровании узкой зоны интенсивного взаимодействия. С увеличением угла соударения с $9,5^\circ$ до $14,5^\circ$ зафиксированные на рисунке значения давления и температуры изменяются следующим образом: при $\gamma = 9,5^\circ$ давление составляет

1,05 ГПа, температура 1026 К; при $\gamma = 12^\circ$ давление возрастает до 1,30 ГПа, температура 1120 К; при $\gamma = 14,5^\circ$ давление достигает 1,95 ГПа, температура 1360 К.

Рост давления с увеличением угла соударения обусловлен возрастанием нормальной составляющей скорости соударения, что приводит к более интенсивному ударному сжатию материала в точке контакта. Повышение температуры, в свою очередь, является следствием разогрева при высокоскоростной пластической деформации. Во всех рассмотренных случаях температура превышает температуру плавления алюминия (929 К), что указывает на локальное плавление алюминиевой пластины в зоне соединения. При этом температура остается ниже температуры плавления нержавеющей стали (1673 К), поэтому плавления стали не происходит. Для $\gamma = 14,5^\circ$ температура в зоне контакта достигает 1360 К, что может приводить не только к плавлению алюминия, но и к значительному размягчению приповерхностных слоев стали, а также создавать температурно-деформационные условия, благоприятствующие возможной диффузии

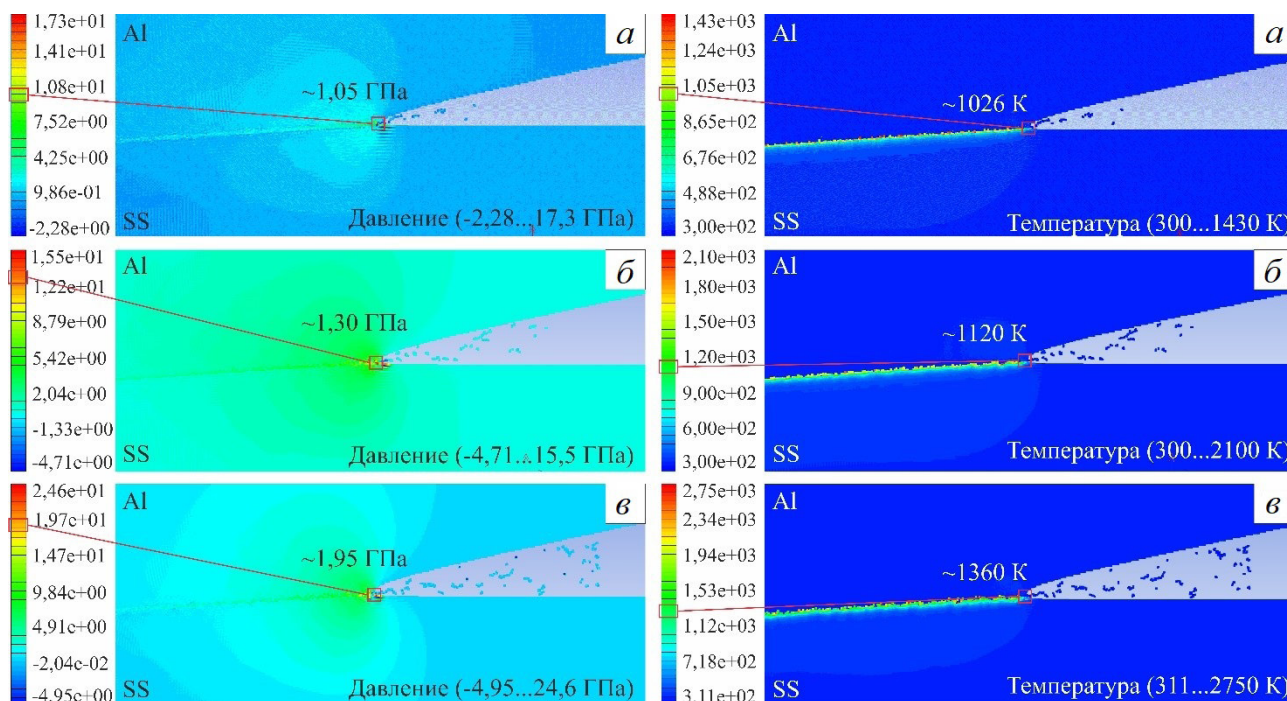


Рис. 4. Распределение давления и температуры вблизи точки контакта пластин А5 и 12Х18Н10Т при их соударении в момент времени 1,5 мкс:

$9,5^\circ$ (а), 12° (б), $14,5^\circ$ (в)

Fig. 4. Distribution of pressure and temperature in the contact zone of 1050A and 321 plates during their collision at a time of 1.5 μ s:

$9,5^\circ$ (а), 12° (б), $14,5^\circ$ (в)

и последующему формированию интерметаллидных фаз.

Характер распределения эффективной пластической деформации и скорости деформации (рис. 5) свидетельствует о локализации пластического течения в узкой приграничной области. Согласно данным, приведенным на рис. 4, для угла $9,5^\circ$ эффективная пластическая деформация составляет 1,8, а скорость деформации – $0,18 \text{ мкс}^{-1}$; для угла 12° эти величины равны 2,4 и $0,23 \text{ мкс}^{-1}$ соответственно; для угла $14,5^\circ$ – 2,7 и $0,57 \text{ мкс}^{-1}$. Наибольшее значение деформации зафиксировано при $\gamma = 14,5^\circ$, что указывает на более интенсивное течение материала в зоне соударения при увеличении угла [33, 34]. Рост скорости деформации более чем в три раза при переходе от $\gamma = 9,5^\circ$ к $\gamma = 14,5^\circ$ объясняется увеличением сдвиговой компоненты деформации, что характерно для косых соударений. Высокие значения эффективной пластической деформации ($> 2,0$) и скорости деформации ($\sim 10^5 \dots 10^6 \text{ с}^{-1}$) обеспечивают реализацию адиабатического режима деформации и формирование ультрамелкозернистой структуры в зоне соединения.

Однако при $\gamma = 14,5^\circ$ высокая степень деформации в сочетании с высокой температурой может способствовать избыточному тепловыделению и увеличению толщины интерметаллидного слоя, что негативно сказывается на прочности соединения.

Анализ временных зависимостей (рис. 6, 7) позволяет уточнить термомеханические условия формирования соединения. Давление достигает максимальных значений в интервале $t = 0,4 \dots 0,6 \text{ мкс}$ после начала соударения для всех анализируемых углов соударения. Наибольшая величина давления (8,87 ГПа) зафиксирована для $\gamma = 12^\circ$ в момент $t = 0,429 \text{ мкс}$. Для $\gamma = 9,5^\circ$ наибольшее давление 4,15 ГПа при $t = 0,481 \text{ мкс}$, а для $\gamma = 14,5^\circ$ максимальное давление 7,71 ГПа наблюдается в момент $t = 0,385 \text{ мкс}$. Отметим, что зависимость давления от угла соударения не является монотонной. Это может быть связано с тем, что с ростом угла увеличивается тангенциальная составляющая скорости соударения, которая приводит к более интенсивному сдвиговому течению и, возможно, частичной разгрузке материала в зоне контакта.

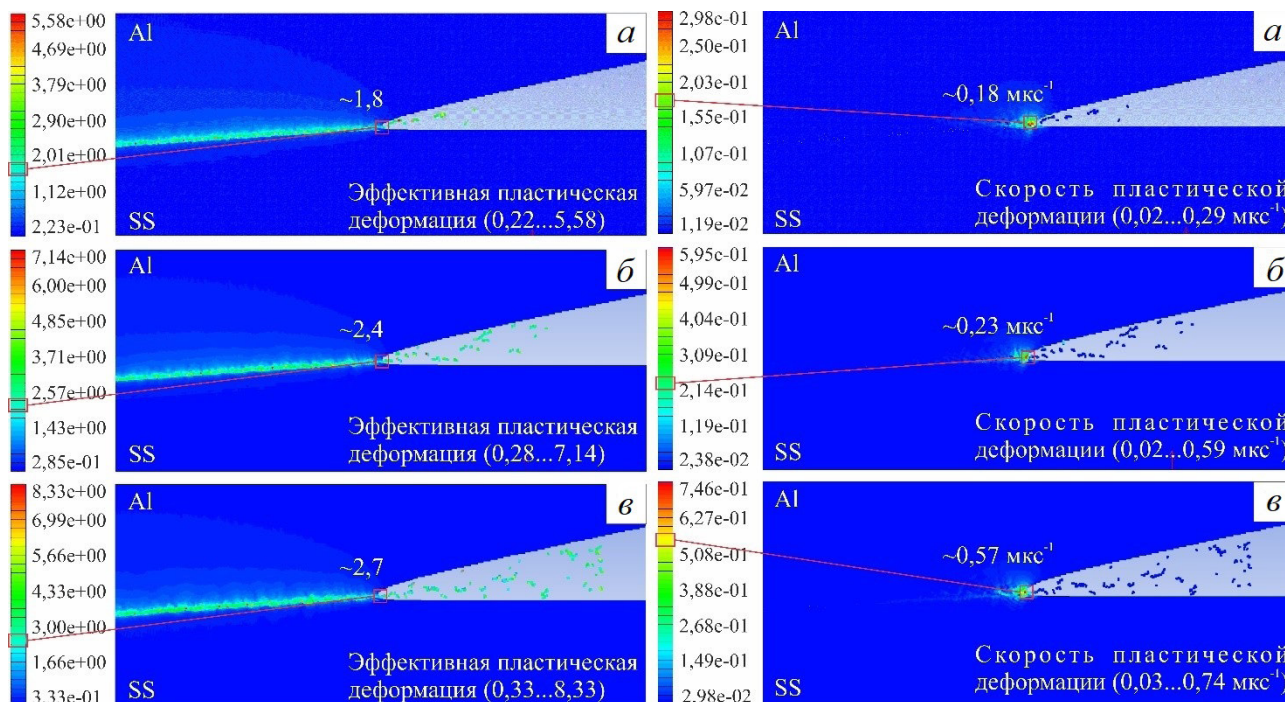


Рис. 5. Распределение эффективной пластической деформации и скорости пластической деформации в зоне контакта пластин А5 и 12Х18Н10Т при их соударении в момент времени 1,5 мкс:

$9,5^\circ$ (а), 12° (б), $14,5^\circ$ (в)

Fig. 5. Distribution of effective plastic strain and strain rate near the contact zone during collision of 1050A and 321 plates at a time of 1.5 μs :

9.5° (a), 12° (б), 14.5° (в)

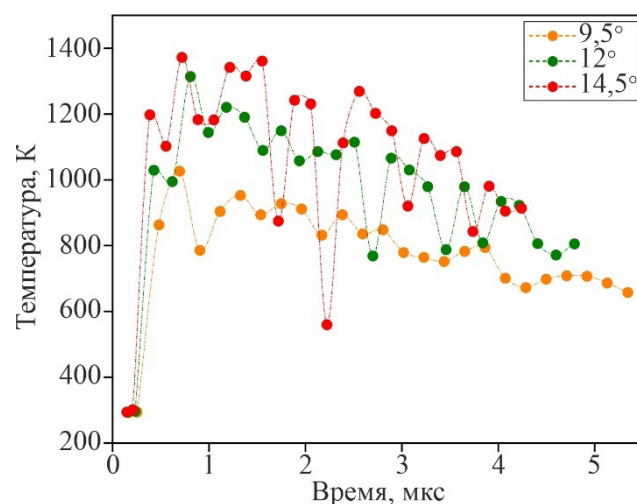
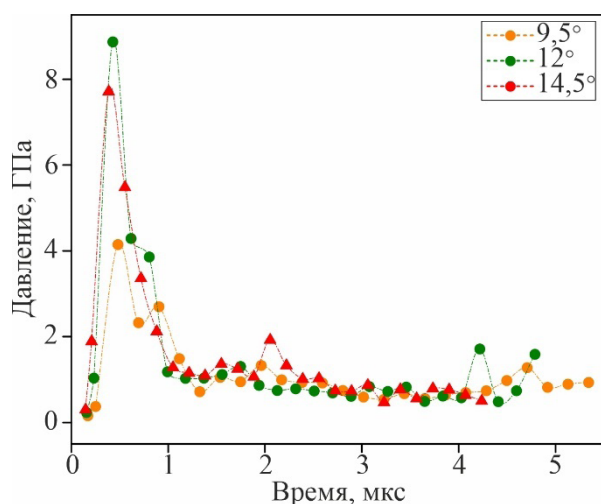


Рис. 6. Кинетика изменения давления и температуры в зоне соударения пластин А5 и 12Х18Н10Т

Fig. 6. Kinetics of pressure and temperature changes in the impact zone of 1050A and 321 plates

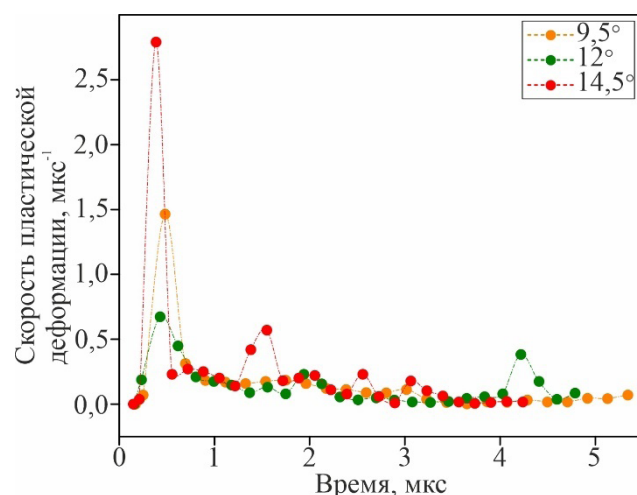
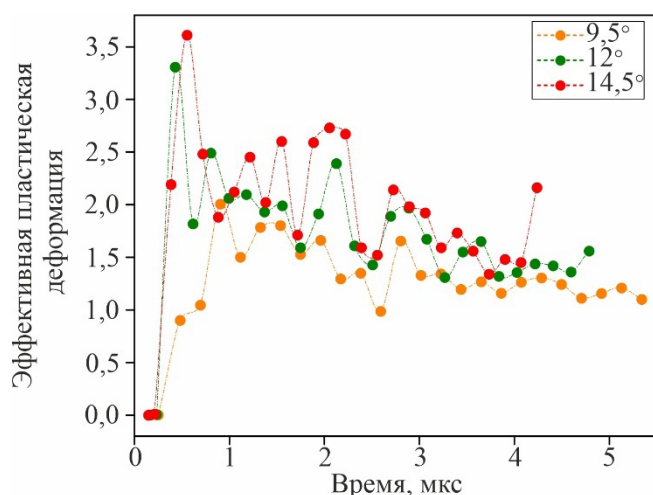


Рис. 7. Кинетика изменения эффективной пластической деформации и скорости пластической деформации в зоне соударения при сварке взрывом композиции А5 / 12Х18Н10Т

Fig. 7. Kinetics of changes in effective plastic strain and rate of plastic strain in the impact zone during explosion welding of the 1050A / 321 plates

Подробный немонотонный характер зависимости давления от угла соударения отмечался в других исследованиях [35, 36]. Например, в работе А.А. Akbari Mousavi et al. [35] был показан рост давления при увеличении угла соударения с 8° до 11° с последующим снижением при дальнейшем увеличении угла до 15° .

Температура в зоне соударения (рис. 6) быстро возрастает, достигает максимума, а затем уменьшается. Максимум температуры для $\gamma = 12^\circ$ достигает 1314 К в момент $t = 0,806$ мкс, а для $\gamma = 14,5^\circ$ он составляет 1372 К при $t = 0,719$ мкс. При этом в последнем случае рост

температуры происходит более резко, а после достижения максимума наблюдается ее быстрое снижение. При $\gamma = 9,5^\circ$ максимальная температура составляет 1026 К ($t = 0,695$ мкс). Таким образом, увеличение угла соударения до $14,5^\circ$ способствует более интенсивному нагреву, однако сопровождается ускоренным снижением температуры, что может влиять на формирование структуры соединения.

Эффективная пластическая деформация (рис. 7) изменяется со временем немонотонно, с чередованием участков роста и снижения, что обусловлено прохождением волн сжатия и по-

следующей разгрузкой материала. Для $\gamma = 14,5^\circ$ уже к моменту $t = 0,554$ мкс достигается значение 3,61 – наибольшее значение, зафиксированное за весь временной промежуток моделирования. При $\gamma = 12^\circ$ максимальная деформация 3,31 достигается в момент $t = 0,429$ мкс, а при $\gamma = 9,5^\circ$ она составляет 2,01 ($t = 0,905$ мкс). Это указывает на то, что с увеличением угла соударения материал быстрее переходит в режим пластического течения, что обусловлено ростом сдвиговой компоненты деформации.

Скорость пластической деформации (рис. 7) достигает наибольших значений уже в начальные моменты соударения. Для $\gamma = 14,5^\circ$ максимальная скорость деформации составляет $2,79 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ($t = 0,385$ мкс), для $\gamma = 9,5^\circ$ – $1,46 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ($t = 0,481$ мкс), а для $\gamma = 12^\circ$ – $0,674 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ($t = 0,429$ мкс). В целом все зафиксированные значения скорости деформации превышают 10^5 с^{-1} , что характерно для сварки высокоскоростным соударением.

Результаты моделирования, полученные в настоящей работе, хорошо согласуются с данными, опубликованными ранее в работах [33, 37]. Согласно источникам [38–40], для биметаллов сталь-алюминий диапазон углов соударения $10...15^\circ$ считается наиболее предпочтительным, обеспечивающим достаточную пластическую деформацию для формирования прочного соединения без образования протяженных интерметаллидных прослоек [38–40]. Для обоснованного сравнения исследованных режимов были выбраны такие критерии, как величина контактного давления, температура (обеспечивающая локальное плавление алюминия, но не приводящая к избыточному размягчению), а также регулярность морфологии границы раздела. При угле соударения 12° зафиксировано наиболее высокое давление в сочетании с умеренным температурным режимом. По сравнению с углами соударения $9,5^\circ$ и $14,5^\circ$ это позволяет ожидать формирования границы раздела с минимальной толщиной интерметаллидного слоя. Несмотря на более высокие значения температуры и деформации, зафиксированные при угле $14,5^\circ$, может происходить избыточное плавление алюминия. Как отмечается в работах [39, 41, 42], подобный перегрев создает риск образования хрупких интерметаллидных фаз.

Проведенное моделирование позволяет сделать вывод о том, что угол соударения является

важным параметром, определяющим особенности тепловыделения и пластической деформации в процессе сварки взрывом. Среди трех исследованных значений углов соударения 12° является наиболее предпочтительным для получения качественного соединения пластин из алюминиевого сплава А5 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. При этом значении зафиксировано высокое давление, а максимальная расчетная температура в зоне соединения (1314 К в момент времени $t = 0,806$ мкс) превышает температуру плавления алюминия (929 К), но остается ниже температуры плавления нержавеющей стали (1673 К), что исключает ее оплавление. Благодаря кратковременности процесса и отсутствию длительного высокотемпературного нагрева диффузионные процессы и рост интерметаллидных фаз оказываются ограниченными. Это, в свою очередь, способствует формированию границы раздела с минимальной объемной долей зон, содержащих интерметаллиды. Необходимо подчеркнуть, что для установления точного фазового состава и определения толщины интерметаллидного слоя требуются дополнительные экспериментальные исследования, а также моделирование с применением методов, учитывающих диффузионные процессы, таких как молекулярная динамика [43].

Выводы

1. С использованием метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) в пакете Ansys Autodyn проведено численное моделирование процесса сварки взрывом биметаллической композиции А5 / 12Х18Н10Т. Расчеты выполнялись при постоянной скорости точки контакта $V_K = 2500 \text{ м/с}$ и трех значениях углов соударения ($9,5^\circ$, 12° и $14,5^\circ$).

2. Показано, что с ростом угла соударения увеличиваются температура, эффективная пластическая деформация и скорость деформации в зоне соединения, тогда как давление изменяется немонотонно, достигая наибольшего значения при $\gamma = 12^\circ$. Наибольшие значения температуры (1372 К при $t = 0,719$ мкс) и деформации (3,61 при $t = 0,554$ мкс) достигаются при $\gamma = 14,5^\circ$. Однако в этом случае наблюдается резкое снижение температуры после достижения максимального значения и формируется несимметричная

волнообразная граница с внедрением стали в алюминий.

3. Во всех рассмотренных режимах температура в зоне контакта превышает температуру плавления алюминия, но остается ниже температуры плавления стали. Это свидетельствует о локальном плавлении алюминиевой заготовки при сохранении стали в твердом состоянии.

4. Показано, что при угле соударения $\gamma = 12^\circ$ формируется наиболее регулярная граница раздела. Для этого угла зафиксировано наибольшее давление 8,87 ГПа при $t = 0,729$ мкс. Умеренный нагрев и высокая степень пластической деформации создают условия для формирования качественного соединения с минимальной толщиной интерметаллидного слоя.

5. Анализ температурно-деформационных характеристик и морфологии границы раздела, показал, что угол 12° является наиболее предпочтительным среди исследованных углов соударения для сварки взрывом композиции А5 / 12Х18Н10Т. Данный режим ($\gamma = 12^\circ$, $V_K = 2500$ м/с) может быть рекомендован для получения биметаллических соединений, обладающих высокой прочностью и минимальным содержанием хрупких интерметаллидных фаз.

Список литературы

1. Кузьмин В.И., Лысак В.И., Тулицин М.А. Исследование закономерностей образования соединения при сварке взрывом толстолистовых сталей-алюминиевых композитов // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 3. – С. 64–69.
2. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 224 с.
3. Comparison of Cu, Ti and Ta interlayer explosively fabricated aluminum to stainless steel transition joints for cryogenic pressurized hydrogen storage / S.M. Aceves, F. Espinosa-Loza, J.W. Elmer, R. Huber // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – Vol. 40 (3). – P. 1490–1503. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.11.038.
4. ASM handbook. Vol. 6A. Welding fundamentals and processes / ed. by T. Lienert, T. Siewert, S. Babu, V. Acoff. – ASM International, 2011. – 912 p. – ISBN 978-1-61503-001-9.
5. Chadwick M.D., Jackson P.W. Explosive welding in planar geometries // Explosive Welding, Forming and Compaction. – Dordrecht: Springer Netherlands, 1983. – P. 219–287.
6. Findik F. Recent developments in explosive welding // Materials & Design. – 2011. – Vol. 32 (3). – P. 1081–1093. – DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.017.
7. Zlobin B.S. Explosion welding of steel with aluminum // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2002. – Vol. 38. – P. 374–377. – DOI: 10.1023/A:1015674407898.
8. Interfacial investigation of explosion-welded Al/Steel plate: the microstructure, mechanical properties and residual stresses / Q. Chu, T. Xia, P. Zhao, M. Zhang, J. Zheng, F. Yan, P. Cheng, C. Yan, C. Liu, H. Luo // Materials Science and Engineering: A. – 2022. – Vol. 833. – Art. 142525. – DOI: 10.1016/j.msea.2021.142525.
9. Hokamoto K., Izuma T., Fujita M. New explosive welding technique to weld aluminum alloy and stainless steel plates using a stainless steel intermediate plate // Metallurgical Transactions A. – 1993. – Vol. 24. – P. 2289–2297. – DOI: 10.1007/BF02648602.
10. Li X., Ma H., Shen Z. Research on explosive welding of aluminum alloy to steel with dovetail grooves // Materials and Design. – 2015. – Vol. 87. – P. 815–824. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.085.
11. Исследование термостойкости композиционного сталеалюминиевого материала и пути ее повышения / В.И. Кузьмин, В.И. Лысак, О.В. Строков, В.В. Литвинов // Перспективные материалы. – 2007. – № 5. – С. 78–81.
12. Исследование влияния режимов сварки взрывом и термической обработки на структуру и свойства биметалла АД1-сталь Ст3 / Л.М. Гуревич, Д.В. Проничев, А.Ф. Трудов, Ю.П. Трыков, М.Д. Трунов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – № 9. – С. 17–21.
13. Investigating the effect of post weld heat treatment on corrosion properties of explosive bonded interface of AA5083/AA1050/SS 321 tubes / S.F. Shargh, A. Saadat, A. Najafi, M.-R.K. Gharehshiran, G. Khalaj // Mater. Res. Express. – 2020. – Vol. 7. – P. 036529. – DOI: 10.1088/2053-1591/ab8095.
14. Design of explosively welded Fe–Al multilayer laminated composite pipes: a critical microscopy analysis of stand-off distance and post-weld heat treatment effects on interface properties / M.R. Jandaghi, H. Pouraliakbar, J. Moverare, V. Fallah, G. Khalaj // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 33. – P. 2645–2660. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.10.003.
15. Effects of heat treatments on mechanical properties of fe/al explosion-welded structural transition joints / L. Tricarico, R. Spina, D. Sorgente, M. Brandizzi // Materials and Design. – 2009. – Vol. 30. – P. 2693–2700. – DOI: 10.1016/j.matdes.2008.10.010.
16. Explosive welding of aluminum to aluminum: analysis, computations and experiments / F. Grignon, D. Benson, K.S. Vecchio, M.A. Meyers // International Journal of Impact Engineering. – 2004. – Vol. 30 (10). – P. 1333–1351. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.049.

17. Atomistic simulation into Cu–Al explosive welding joint formation mechanisms and deformation characteristics / V.-T. Nguyen, T.T.V. Nhu, X.-T. Vo, H. Van Huong // *Physica B: Condensed Matter*. – 2025. – Vol. 705. – Art. 417084. – DOI: 10.1016/j.physb.2025.417084.

18. Измерение температуры кумулятивной струи из конической облицовки / В.В. Пай, В.М. Титов, Я.Л. Лукьянов, К.М. Зубашевский // *Физика горения и взрыва*. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 123–126. – DOI: 10.15372/FGV20200313.

19. Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study / I.A. Bataev, S. Tanaka, Q. Zhou, D.V. Lazurenko, A.M.J. Junior, A.A. Bataev, K. Hokamoto, A. Mori, P. Chen // *Materials and Design*. – 2019. – Vol. 169. – Art. 107649. – DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107649.

20. Батаев И.А. Формирование структуры сваренных взрывом материалов: экспериментальные исследования и численное моделирование // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2017. – Т. 19, № 4. – С. 55–67. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-4-55-67.

21. О модели волнообразования при косом, симметричном соударении алюминиевых пластин / С.П. Киселев, В.П. Киселев, Н.П. Киселев, В.Н. Зайковский // *Физика горения и взрыва*. – 2025. – DOI: 10.15372/FGV2025.9600.

22. Bataev I., Mori A., Hokamoto K. Behavior of materials under extremely high-velocity oblique impact // *Explosion, Shock-wave and High-strain-rate Phenomena of Advanced Materials*. – Elsevier, 2021. – P. 71–92. – DOI: 10.1016/B978-0-12-821665-1.00006-7.

23. Tanaka K. Numerical studies on the explosive welding by smoothed particle hydrodynamics (SPH) // *Shock Compression of Condensed Matter – 2007: Proceedings of the American Physical Society Topical Conference*. – AIP, 2008. – P. 1301–1304. – (AIP Conference Proceedings; vol. 955). – DOI: 10.1063/1.2832962.

24. Comparison of explosive welding of pure titanium/SUS 304 austenitic stainless steel and pure titanium/SUS 821L1 duplex stainless steel / X. Chen, D. Inao, S. Tanaka, X. Li, I.A. Bataev, K. Hokamoto // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2021. – Vol. 31 (9). – P. 2687–2702. – DOI: 10.1016/S1003-6326(21)65685-6.

25. Numerical study of the mechanism of explosive/impact welding using Smoothed Particle Hydrodynamics method / X. Wang, Y. Zheng, H. Liu, Z. Shen, Y. Hu, W. Li, Y. Gao, C. Guo // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 35. – P. 210–219. – DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.047.

26. Crossland B. Explosive welding of metals and its application. – Oxford: Clarendon Press, 1982. – 256 p. – ISBN 0-19-859119-5.

27. Experimental and numerical investigation of microstructure and evolution of TiNi alloy/Q235 steel interfaces prepared by explosive welding / M. Yang, D. Chen, H. Zhou, J. Xu, H. Ma, Z. Shen, B. Zhang, J. Tian // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 15. – P. 5803–5813. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.044.

28. Investigations on the microstructure evolution and mechanical properties of explosive welded ODS-Cu/316L stainless steel composite / B. Zhang, H. Ma, J. Xu, L. Li, Z. Shen, L. Ding, J. Tian // *Fusion Engineering and Design*. – 2022. – Vol. 179. – Art. 113142. – DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113142.

29. Numerical and experimental studies of the interface characteristics and wave formation mechanism of Hastelloy/stainless steel explosive welding composite plate / Y. Ma, T. Wang, G. Wang, X. Fang, C. Chu // *Materials Today Communications*. – 2023. – Vol. 36. – Art. 106880. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106880.

30. Experimental and numerical approach to titanium-aluminum explosive welding / X. Wu, C. Shi, K. Feng, L. Gao, W. Li, K. Qian // *Materials Research Express*. – 2021. – Vol. 8. – Art. 096503. – DOI: 10.1088/2053-1591/ac2017.

31. Campanella D., Buffa G., Fratini L. A two steps Lagrangian–Eulerian numerical model for the simulation of explosive welding of three dissimilar materials joints // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2021. – Vol. 35. – P. 541–549. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.08.010.

32. Неоднородность пластического течения, сопутствующая процессам высокоскоростного нагружения металлических материалов / П.А. Рябинкина, Ю.Ю. Эмурлаева, И.А. Батаев, С. Танака // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2021. – № 12. – С. 41–47. – DOI: 10.30906/mitom.2021.12.41-47.

33. Hokamoto K., Ujimoto Y., Fujita M. Basic characteristics of the explosive welding technique using underwater shock wave and its possibilities // *Materials Transactions*. – 2004. – Vol. 45 (9). – P. 2897–2901. – DOI: 10.2320/matertrans.45.2897.

34. Akbari Mousavi A.A., Al-hassani S. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2005. – Vol. 53. – P. 2501–2528. – DOI: 10.1016/j.jmps.2005.06.001.

35. Study on parameters and wave growth mechanism of explosive welding based on SPH-FEM[J] / X. Wu, Ch. Shi, L. Gao, W. Li, K. Feng // *Rare Metal Materials and Engineering*. – 2023. – Vol. 52 (4). – P. 1272–1282.

36. Оптимизация параметров сварки взрывом и структурные особенности композитов сталь – толстолистовой алюминий / Ю.П. Бешапошни-

ков, Б.А. Гринберг, М.С. Пушкин, А.В. Иноземцев, А.М. Пацелов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 362–375. – DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.009.

37. Formation of intermetallic structures at the interface of steel-to-aluminium explosive welds / G.H.S.F.L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R.M. Leal, A. Loureiro // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 142. – P. 432–442. – DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.005.

38. Investigation of crack control mechanisms for intermetallic compounds at the interface of aluminum/steel during explosive welding / J. Wang, X. Li, H. Yan, X. Wang, J. Wang // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2025. – Vol. 78. – Art. 121. – DOI: 10.1007/s12666-025-03582-2.

39. Experimental and numerical analysis of the formation behavior of intermediate layers at explosive welded Al/Fe joint interfaces / Y. Aizawa, J. Nishiwaki, Y. Harada, S. Muraishi, S. Kumai // *Journal of*

Manufacturing Processes. – 2016. – Vol. 24. – P. 100–106. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.08.002.

40. A wavy versus straight interface in the explosive welding of aluminum to steel / A. Szecket, O.T. Inal, D.J. Viguera, J. Rocco // *Journal of Vacuum Science and Technology A*. – 1985. – Vol. 3 (6). – P. 2588–2593. – DOI: 10.1116/1.572839.

41. Особенности пластической деформации металла околошовной зоны при сварке взрывом разнородных материалов / С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, В.В. Рыбин, А.П. Пеев // *Известия ВолгГТУ*. – 2010. – Т. 5, № 65. – С. 4–11.

42. Atomic diffusion behavior in cu-al explosive welding process / S.Y. Chen, Z.W. Wu, K.X. Liu, X.J. Li, N. Luo, G.X. Lu // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – Vol. 113. – DOI: 10.1063/1.4775788.

43. Multi-scale simulation and microstructure characteristics of TC4 ELI/Al 6013 plates by explosive welding / J. Zhou, N. Luo, H. Liang, W. Sun // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 124. – P. 1180–1192. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.07.014.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 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



Analysis of temperature–strain processes during explosive welding of the 1050A / 321 composite using numerical simulation

Yulia Malyutina^{1, 2, a, *}, Tatyana Ogneva^{1, b}, Ivan Bataev^{1, c}, Elena Lozhkina^{1, d},
 Vladimir Pai^{2, e}, Yaroslav Lukyanov^{2, f}, Evgeny Kuzmin^{3, j}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15 Akademika Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin, Volgograd, 400005, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-0305-7518>, iuliamaliutina@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0002-0081-283X>, pandorra.06@mail.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>, ivanbataev@ngs.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-7119-4944>, lozhkinaelena1987@gmail.com;
^e <https://orcid.org/0009-0009-3819-8431>, pai@hydro.nsc.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0003-4526-9399>, lukyanov@hydro.nsc.ru;
^j <https://orcid.org/0000-0002-1037-5186>, e.v.kuzmin@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 08 April 2026

Revised: 16 April 2026

Accepted: 30 April 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Explosive welding

SPH method

Aluminum

Stainless steel

Impact angle

Funding

This research was supported by grant No. 25-23-01117 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-23-01117/>.

Acknowledgements

The research was conducted using equipment at the Center for Collective Use “Structure, Mechanical, and Physical Properties of Materials” (NSTU).

ABSTRACT

Traditional welding methods are rarely used to join such material pairs due to their tendency to form brittle intermetallic compounds. One of the main parameters determining the quality of the weld is the impact angle γ . **The aim of the work** is to study the influence of the impact angle on the temperature-strain characteristics in the joint zone during high-velocity impact of aluminum 1050A and steel 321 plates using numerical simulation. **Research methods.** The smoothed particle hydrodynamics (SPH) method implemented in *Ansys Autodyn 2020 R2* software was used for the simulations. In all calculations, the contact point velocity was constant at $V_c = 2,500$ m/s, and the impact angle varied (9.5° , 12° , 14.5°). The *Mie–Grüneisen* equation of state and the *Johnson–Cook* constitutive model were used to describe the properties of the materials. **Results and discussion.** It was found that an increase in the impact angle leads to higher pressure, temperature, and plastic strain. Specifically, temperature and plastic strain increase monotonically with γ , whereas pressure varies non-monotonically, reaching a peak of 8.87 GPa at $\gamma = 12^\circ$. At $\gamma = 12^\circ$, the most uniform interface is formed, and at $\gamma = 14.5^\circ$, an asymmetrical interface with the penetration of steel into aluminum is observed. All studied impact conditions result in local melting of aluminum while keeping the steel solid. The most favorable of the investigated impact angles, which provides a beneficial combination of pressure, temperature, and interface morphology for the 1050A/321 system at a speed of 2,500 m/s, is 12° .

For citation: Malyutina Yu.N., Ogneva T.S., Bataev I.A., Lozhkina E.A., Pai V.V., Lukyanov Ya.L., Kuzmin E.V. Analysis of temperature–strain processes during explosive welding of the 1050A / 321 composite using numerical simulation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 335–350. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-335-350. (In Russian).

* Corresponding author

Malyutina Yuliya N., PhD (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 913 476-99-90, **e-mail:** iuliamaliutina@gmail.com

References

1. Kuzmin V.I., Lysak V.I., Tupitsin M.A. Issledovanie zakonomernostei obrazovaniya soedineniya pri svarke vzryvom tolstolistovykh stalealuminievyykh kompozitov [An investigation of the mechanism of steel–al joint formation under explosion welding of composite plates]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials*, 2013, no. 3, pp. 64–69. (In Russian).
2. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosive welding]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 224 p.
3. Aceves S.M., Espinosa-Loza F., Elmer J.W., Huber R. Comparison of Cu, Ti and Ta interlayer explosively fabricated aluminum to stainless steel transition joints for cryogenic pressurized hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40 (3), pp. 1490–1503. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.11.038.
4. Lienert T., Siewert T., Babu S., Acoff V., eds. *ASM Handbook. Vol. 6A. Welding Fundamentals and Processes*. ASM International, 2011. 912 p. ISBN 978-1-61503-001-9.
5. Chadwick M.D., Jackson P.W. Explosive welding in planar geometries. *Explosive welding, forming and compaction*. Dordrecht, Springer Netherlands, 1983, pp. 219–287.
6. Findik F. Recent developments in explosive welding. *Materials & Design*, 2011, vol. 32 (3), pp. 1081–1093. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.017.
7. Zlobin B.S. Explosion welding of steel with aluminum. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2002, vol. 38, pp. 374–377. DOI: 10.1023/A:1015674407898.
8. Chu Q., Xia T., Zhao P., Zhang M., Zheng J., Yan F., Cheng P., Yan C., Liu C., Luo H. Interfacial investigation of explosion-welded Al/Steel plate: the microstructure, mechanical properties and residual stresses. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 833, art. 142525. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142525.
9. Hokamoto K., Izuma T., Fujita M. New explosive welding technique to weld aluminum alloy and stainless steel plates using a stainless steel intermediate plate. *Metallurgical Transactions A*, 1993, vol. 24, pp. 2289–2297. DOI: 10.1007/BF02648602.
10. Li X., Ma H., Shen Z. Research on explosive welding of aluminum alloy to steel with dovetail grooves. *Materials and Design*, 2015, vol. 87, pp. 815–824. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.085.
11. Kuz'min V.I., Lysak V.I., Stokov O.V., Litvinov V.V. Issledovanie termostoikosti kompozitsionnogo stalealuminievogo materiala i puti ee povysheniya [Study of the heat resistance of composite steel-aluminum material and ways to improve it]. *Perspektivnye materialy = Journal of Advanced Materials*, 2007, no. 5, pp. 78–81. (In Russian).
12. Gurevich L.M., Pronichev D.V., Trudov A.F., Trykov Yu.P., Trunov M.D. Issledovanie vliyaniya rezhimov svarki vzryvom i termicheskoi obrabotki na strukturu i svoystva bimetalla AD1–stal' St3 [Investigation of the influence of explosive welding modes and heat treatment on the structure and properties of AD1–St3 steel bimetal]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2014, no. 9, pp. 17–21.
13. Shargh S.F., Saadat A., Najafi A., Gharehshiran M.-R.K., Khalaj G. Investigating the effect of post weld heat treatment on corrosion properties of explosive bonded interface of AA5083/AA1050/SS 321 tubes. *Materials Research Express*, 2020, vol. 7, art. 036529. DOI: 10.1088/2053-1591/ab8095.
14. Jandaghi M.R., Pouraliakbar H., Moverare J., Fallah V., Khalaj G. Design of explosively welded Fe–Al multilayer laminated composite pipes: a critical microscopy analysis of stand-off distance and post-weld heat treatment effects on interface properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 33, pp. 2645–2660. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.10.003.
15. Tricarico L., Spina R., Sorgente D., Brandizzi M. Effects of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al explosion-welded structural transition joints. *Materials and Design*, 2009, vol. 30, pp. 2693–2700. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.10.010.
16. Grignon F., Benson D., Vecchio K.S., Meyers M.A. Explosive welding of aluminum to aluminum: analysis, computations and experiments. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, vol. 30 (10), pp. 1333–1351. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.049.
17. Nguyen V.-T., Nhu T.T.V., Vo X.-T., Van Huong H. Atomistic simulation into Cu–Al explosive welding joint formation mechanisms and deformation characteristics. *Physica B: Condensed Matter*, 2025, vol. 705, art. 417084. DOI: 10.1016/j.physb.2025.417084.
18. Pai V.V., Titov V.M., Luk'yanov Ya.L., Zubashevskii K.M. Izmerenie temperatury kumulyativnoi strui iz konicheskoi oblitsovki [Temperature measurement of the shaped-charge jet from a conical liner]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 123–126. DOI: 10.15372/FGV20200313. (In Russian).

19. Bataev I.A., Tanaka S., Zhou Q., Lazurenko D.V., Junior A.M.J., Bataev A.A., Hokamoto K., Mori A., Chen P. Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study. *Materials and Design*, 2019, vol. 169, art. 107649. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107649.
20. Bataev I.A. Formirovanie struktury svarennnykh vzryvom materialov: eksperimental'nye issledovaniya i chislennoe modelirovanie [Structure of explosively welded materials: experimental study and numerical simulation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 55–67. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-4-55-67.
21. Kiselev S.P., Kiselev V.P., Kiselev N.P., Zaikovskii V.N. O modeli volnoobrazovaniya pri kosom, simmetrichnom soudarenii alyuminievykh plastin [On the model of wave formation during oblique, symmetrical collision of aluminum plates]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2025. DOI: 10.15372/FGV2025.9600. (In Russian).
22. Bataev I., Mori A., Hokamoto K. Behavior of materials under extremely high-velocity oblique impact. *Explosion, Shock-wave and High-strain-rate Phenomena of Advanced Materials*. Elsevier, 2021, pp. 71–92. DOI: 10.1016/B978-0-12-821665-1.00006-7.
23. Tanaka K. Numerical studies on the explosive welding by smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Shock Compression of Condensed Matter – 2007: Proceedings of the American Physical Society Topical Conference. AIP Conference Proceedings*, vol. 955. Melville, NY, AIP, 2008, pp. 1301–1304. DOI: 10.1063/1.2832962.
24. Chen X., Inao D., Tanaka S., Li X., Bataev I.A., Hokamoto K. Comparison of explosive welding of pure titanium/SUS 304 austenitic stainless steel and pure titanium/SUS 821L1 duplex stainless steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, vol. 31 (9), pp. 2687–2702. DOI: 10.1016/S1003-6326(21)65685-6.
25. Wang X., Zheng Y., Liu H., Shen Z., Hu Y., Li W., Gao Y., Guo C. Numerical study of the mechanism of explosive/impact welding using Smoothed Particle Hydrodynamics method. *Materials and Design*, 2012, vol. 35, pp. 210–219. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.047.
26. Crossland B. *Explosive welding of metals and its application*. Oxford, Clarendon Press, 1982. 256 p. ISBN 0-19-859119-5.
27. Yang M., Chen D., Zhou H., Xu J., Ma H., Shen Z., Zhang B., Tian J. Experimental and numerical investigation of microstructure and evolution of TiNi alloy/Q235 steel interfaces prepared by explosive welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 5803–5813. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.044.
28. Zhang B., Ma H., Xu J., Li L., Shen Z., Ding L., Tian J. Investigations on the microstructure evolution and mechanical properties of explosive welded ODS-Cu/316L stainless steel composite. *Fusion Engineering and Design*, 2022, vol. 179, art. 113142. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113142.
29. Ma Y., Wang T., Wang G., Fang X., Chu C. Numerical and experimental studies of the interface characteristics and wave formation mechanism of Hastelloy/stainless steel explosive welding composite plate. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 36, art. 106880. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106880.
30. Wu X., Shi C., Feng K., Gao L., Li W., Qian K. Experimental and numerical approach to titanium-aluminum explosive welding. *Materials Research Express*, 2021, vol. 8, art. 096503. DOI: 10.1088/2053-1591/ac2017.
31. Campanella D., Buffa G., Fratini L. A two steps Lagrangian–Eulerian numerical model for the simulation of explosive welding of three dissimilar materials joints. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, vol. 35, pp. 541–549. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.08.010.
32. Ryabinkina P.A., Emurlaeva Yu.Yu., Bataev I.A., Tanaka S. Neodnorodnost' plasticheskogo techeniya, soputstvuyushchaya protsessam vysokoskorostnogo nagruzheniya metallicheskih materialov [Inhomogeneity of plastic flow accompanying rapid loading of metallic materials]. *Metalovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2021, no. 12, pp. 41–47. DOI: 10.30906/mitom.2021.12.41-47. (In Russian).
33. Hokamoto K., Ujimoto Y., Fujita M. Basic characteristics of the explosive welding technique using underwater shock wave and its possibilities. *Materials Transactions*, 2004, vol. 45 (9), pp. 2897–2901. DOI: 10.2320/matertrans.45.2897.
34. Akbari Mousavi A.A., Al-hassani S. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, vol. 53, pp. 2501–2528. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.06.001.
35. Wu X., Shi Ch., Gao L., Li W., Feng K. Study on parameters and wave growth mechanism of explosive welding based on SPH-FEM. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, vol. 52 (4), pp. 1272–1282.
36. Besshaposhnikov Yu.P., Grinberg B.A., Pushkin M.S., Inozemtsev A.V., Patselov A.M. Optimizatsiya parametrov svarki vzryvom i strukturnye osobennosti kompozitov stal' – tolstolistovoi alyuminii [Optimization of explosive welding parameters and structural features of steel-thick aluminum composites]. *Fundamental'nye*

problemy sovremennogo materialovedeniya = *Basic Problems of Material Science*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 362–375. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.009.

37. Carvalho G.H.S.F.L., Galvão I., Mendes R., Leal R.M., Loureiro A. Formation of intermetallic structures at the interface of steel-to-aluminium explosive welds. *Materials Characterization*, 2018, vol. 142, pp. 432–442. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.005.

38. Wang J., Li X., Yan H., Wang X., Wang J. Investigation of crack control mechanisms for intermetallic compounds at the interface of aluminum/steel during explosive welding. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2025, vol. 78, art. 121. DOI: 10.1007/s12666-025-03582-2.

39. Aizawa Y., Nishiwaki J., Harada Y., Muraishi S., Kumai S. Experimental and numerical analysis of the formation behavior of intermediate layers at explosive welded Al/Fe joint interfaces. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, vol. 24, pp. 100–106. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.08.002.

40. Szecket A., Inal O.T., Vigueras D.J., Rocco J. A wavy versus straight interface in the explosive welding of aluminum to steel. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1985, vol. 3 (6), pp. 2588–2593. DOI: 10.1116/1.572839.

41. Kuz'min S.V., Lysak V.I., Ribin V.V., Peev A.P. Osobennosti plasticheskoi deformatsii metalla okoloshovnoi zony pri svarke vzryvom raznorodnykh materialov [Features of plastic deformation of steel in the heat-affected zone during explosion welding of dissimilar metals]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2010, vol. 5, no. 65, pp. 4–11.

42. Chen S.Y., Wu Z.W., Liu K.X., Li X.J., Luo N., Lu G.X. Atomic diffusion behavior in Cu–Al explosive welding process. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, art. 044901. DOI: 10.1063/1.4775788.

43. Zhou J., Luo N., Liang H., Sun W. Multi-scale simulation and microstructure characteristics of TC4 ELI/Al 6013 plates by explosive welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 124, pp. 1180–1192. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.07.014.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 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>).