



# Обработка металлов

## (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Определение основных параметров контактной точечной сварки алюминиевого сплава АМг-5

Виктор Кондратьев<sup>1, 2, a</sup>, Валерий Гозбенко<sup>3, 4, b, \*</sup>, Роман Кононенко<sup>5, c</sup>,  
 Марина Константинова<sup>5, d</sup>, Елена Гусева<sup>5, e</sup>

<sup>1</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Фаворского, стр. 1А, г. Иркутск, 664033, Россия

<sup>2</sup> Череповецкий государственный университет, пр. Луначарского, 5, г. Череповец, 162600, Россия

<sup>3</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, г. Иркутск, 664074, Россия

<sup>4</sup> Ангарский государственный технический университет, ул. Чайковского, 60, г. Ангарск, 665835, Россия

<sup>5</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7437-2291>, [imz@mail.ru](mailto:imz@mail.ru); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8394-0054>, [vgozbenko@inbox.ru](mailto:vgozbenko@inbox.ru);

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0001-5900-065X>, [istu\\_politech@mail.ru](mailto:istu_politech@mail.ru); <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8533-0214>, [mavikonst@mail.ru](mailto:mavikonst@mail.ru);

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8719-7728>, [el.guseva@rambler.ru](mailto:el.guseva@rambler.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.763.1

#### История статьи:

Поступила: 06 марта 2025

Рецензирование: 07 апреля 2025

Принята к печати: 14 мая 2025

Доступно онлайн: 15 сентября 2025

#### Ключевые слова:

Сварка

Контактная точечная сварка

Ядро

Зона термического влияния

Алюминий

Твердость

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Процесс контактной точечной сварки (RSW) широко применяется в различных отраслях промышленности, особенно для массового производства, – в авиационной, автомобильной, мебельной промышленности и др. Процесс RSW имеет некоторые трудности при сварке алюминия и его сплавов. Как правило, алюминиевые сплавы дают плохие сварные швы из-за их физических и металлургических свойств, таких как образование оксидов, тепловое расширение, тепловое сжатие, меньшая свариваемость и образование интерметаллических соединений. Настоящее исследование направлено на оценку осуществимости и механическую характеристику сварных швов RSW на алюминиевых сплавах типа АМг-5. **Цель работы:** оценить возможности контактной точечной сварки алюминиевых сплавов, определить влияние основных параметров RSW на структуру и свойства сварного шва. **Методы исследования.** Использовали листы алюминиевого сплава АМг-5 в состоянии поставки. Точечная сварка выполнялась стационарной контактной точечной сварочной машиной МТ-4240. Образцы для проведения исследований вырезались, полировались и в последующем анализировались на оптическом микроскопе, твердость измерялась микротвердомером. Измерения твердости проводились в двух направлениях (вдоль радиуса ядра и по толщине листа) с применением машины под нагрузкой 100 г. Электромеханическая испытательная машина Instron использовалась для испытаний на сдвиг при постоянной скорости траверсы 1 мм/мин до окончательного разрушения соединения при комнатной температуре. Диаметр ядра измерялся на поверхности излома после испытания на сдвиг при растяжении. **Результаты и обсуждение.** Были определены оптимальные входные параметры процесса для сварки листов алюминия толщиной 2,5 мм, проанализированы три выходные переменные, а именно прочность на разрыв, твердость соединения и диаметр ядра. Было отмечено, что прочность соединения значительно улучшилась за счет увеличения параметров процесса (силы тока, времени сварки). Диаметр ядра сварочной точки находится в корреляции с входными параметрами по току и времени процесса. Было замечено, что увеличение параметров процесса, т. е. времени цикла сварки, давления электрода и сварочного тока, приводит к увеличению размера ядра сварки. Отношение прочности сварной точки к прочности основного металла составляет 0,9. Показано, что сварка алюминиевых листов АМг-5 толщиной 2,5 мм методом RSW возможна и может быть использована в различных отраслях.

**Для цитирования:** Определение основных параметров контактной точечной сварки алюминиевого сплава АМг-5 / В.В. Кондратьев, В.Е. Гозбенко, Р.В. Кононенко, М.В. Константинова, Е.А. Гусева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 6–22. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-6-22.

## Введение

Контактная точечная сварка (RSW) широко используется в автомобилестроении, авиационной промышленности, строительстве и энергетике для соединения листовых деталей из стали и алюминиевых сплавов, а также для создания соединений между сталью и алюминием, алюми-

#### \*Адрес для переписки

Гозбенко Валерий Ерофеевич, д.т.н., профессор

Иркутский государственный университет путей сообщения,

ул. Чернышевского, 15,

664074, г. Иркутск, Россия

Тел.: +7 914 951-60-21, e-mail: [vgozbenko@inbox.ru](mailto:vgozbenko@inbox.ru)

нием и магнием, алюминием и титаном [1–10]. Например, производительность современных автоматизированных линий сборки автомобилей достигает 7 млн точек сварки в день [8, 9]. Алюминиевые сплавы широко применяются в аэрокосмической промышленности благодаря сочетанию таких свойств, как низкая плотность, высокая удельная прочность, хорошая обрабатываемость и стойкость к коррозии. Еще одним важным преимуществом алюминиевых сплавов является их широкая доступность.

Плотность алюминиевых сплавов составляет примерно одну треть плотности стали, что позволяет снизить массу конструкции самолета, повысить топливную эффективность и увеличить полезную нагрузку. Для изготовления ответственных силовых элементов конструкции сверхзвуковых самолетов, где критически важна высокая прочность, предпочтительным материалом является сталь [11–15]. Алюминиевые же сплавы широко используются для производства панелей крыла, секций фюзеляжа, элементов оперения, компонентов выхлопной системы, деталей салона и турбин двигателей современных самолетов. Алюминиевые сплавы составляют от 50 до 90 % массы современных космических аппаратов – они широко применялись в космических кораблях «Союз», «Прогресс», космических челноках, спутниках и др. [11–15]. Сплавы алюминия классифицируются по системе легирования типа Al-Mg, Al-Mg-Li, Al-Cu-Li и др. Это наиболее распространенные типы сплавов в авиационной и автомобильной промышленности в высокопрочных инженерных приложениях [14–18].

Одной из ключевых тенденций в автомобильной промышленности является снижение массы транспортных средств. Данная цель достигается посредством использования материалов, обладающих малым удельным весом, таких как алюминий и его сплавы, что, в свою очередь, способствует оптимизации производственных затрат [7–9]. Алюминиевые сплавы служат подходящими металлами для автомобилей, они легко отливаются, формуются в требуемые формы и перспективны в снижении веса по сравнению со сталью. Использование алюминиевых сплавов при изготовлении элементов кузова, панелей кабины, колесных дисков и отделке салона автомобиля обеспечивает снижение массы более

чем на 50 % [10, 11]. Алюминиевые сплавы благодаря сочетанию литейных и деформационных свойств, а также низкому удельному весу выгодно отличаются от сталей и широко распространены в автомобилестроении. Для контактной точечной сварки алюминия и его сплавов требуются сварочные пистолеты повышенной мощности, что обусловлено необходимостью применения сварочного тока, в 2–3 раза превышающего ток, используемый для стали, вследствие более высокой электро- и теплопроводности алюминия, при этом время сварки должно быть уменьшено примерно до 1/3 от времени сварки стали [1, 2].

Контактная точечная сварка (RSW) – это процесс соединения контактирующих металлических поверхностей посредством нагрева, который возникает в результате сопротивления электрическому току, протекающему через соединяемые детали [1]. Процесс сварки регулируется тремя основными параметрами, а именно механическими (давление на электрод сварки), электрическими (сила тока сварки) и электронными (продолжительность времени сварки).

Электрический ток подводится к двум сложенным внахлест листам через соосные электроды и поддерживается в течение достаточного периода времени для получения локального сплавления на границе раздела листов металла. После выключения тока прикладывается давление для получения прочного соединения по линии сплавления. Далее происходит охлаждение расплавленного металла и формируется литая точка (ядро) сварки в замкнутом объеме. Плотность тока и давление должны быть такими, чтобы образовалось литое ядро, но не настолько высокими, чтобы расплавленный металл выталкивался из зоны сварки. Продолжительность сварочного тока должна быть достаточно короткой, чтобы предотвратить чрезмерный нагрев поверхностей электродов. Прижимающее усилие, величина сварочного тока и длительность сварки оказывают определяющее влияние на качество соединения при контактной точечной сварке. Для отслеживания переменных сварки в сварочных аппаратах используется электронный блок управления.

Качество и прочность сварных швов, выполненных методом контактной точечной сварки, определяются формой и размером сварных

точек. Размер сварной точки является критическим параметром, определяющим несущую способность соединения. В процессе RSW существует прямая корреляция между тепловыделением и размером формирующейся сварной точки. На тепловыделение и, как следствие, на размер сварной точки оказывают влияние следующие основные факторы: контактное сопротивление между свариваемыми поверхностями, плотность сварочного тока, длительность сварки и толщина свариваемых листов.

Особенностью контактной точечной сварки является отсутствие необходимости в прикладных материалах и флюсах. Это основная причина, по которой RSW широко используется в настоящее время. Конкурентным преимуществом RSW по сравнению с альтернативными методами соединения металлов, такими как сварка плавлением в защитных газах (например, GMAW, GTAW) и клепка, является возможность полной автоматизации процесса и его интеграции в роботизированные производственные линии.

К основным проблемам, ограничивающим применение контактной точечной сварки для соединения алюминиевых сплавов, относятся следующие:

1) ограниченный ресурс контактных электродов. Поверхность алюминиевых сплавов характеризуется наличием оксидной пленки ( $Al_2O_3$ ), обладающей высоким электрическим сопротивлением и неоднородной толщиной [1, 2, 12–16]. При сжатии свариваемых листов электродами оксидная пленка деформируется неравномерно, что приводит к концентрации тока в локальных участках контакта. В результате высокой плотности тока в этих областях происходит интенсивный нагрев, локальное плавление и сплавление меди (электрода) и алюминия, что вызывает эрозийный износ рабочей поверхности электрода [1, 2]. Изменение геометрии и состава рабочей поверхности электрода в процессе эксплуатации приводит к нестабильности параметров сварки и снижению прочности сварного соединения [12–15];

2) высокие требования к сварочному току. Для обеспечения формирования качественного сварного соединения при сварке алюминиевых сплавов методом RSW требуется применение значительно более высоких значений сварочно-

го тока, чем для сталей. Этот факт нивелирует потенциальные преимущества алюминиевых сплавов с точки зрения энергоэффективности, связанные с их более низкой плотностью по сравнению со сталями [3, 4, 17, 18].

Существующие исследования контактной точечной сварки алюминиевых сплавов преимущественно ориентированы на материалы большой толщины [19–21]. Тонколистовые алюминиевые сплавы требуют отдельного рассмотрения, поскольку различия в площадях контакта, тепловых режимах и электрических характеристиках обуславливают необходимость корректировки параметров сварки, включая прижимающее усилие и плотность тока [1, 2, 20–22]. Для RSW применяются источники питания постоянного (DC) и переменного (AC) тока с различной частотой [1, 2, 23–29], влияющие на режимы передачи энергии и оптимальную длительность сварки как для стационарных, так и для мобильных установок [1–3, 22, 28, 30, 31, 31–36]. Качество сварки существенно зависит и от внешних факторов, таких как состояние поверхности (шероховатость, загрязнение) [2–8], точность сборки [9], состояние электродов (износ) [9–14], а также точность позиционирования свариваемых деталей (осевое и угловое смещение) [20–22].

Алюминиевые сплавы отличаются высокой чувствительностью к окислению под воздействием окружающей среды. Образующаяся на поверхности оксидная пленка ( $Al_2O_3$ ) характеризуется высоким электрическим сопротивлением, что приводит к повышенному тепловыделению в зоне контакта при сварке. Недостаточная подготовка поверхности, направленная на удаление оксидной пленки, может привести к адгезии алюминия к материалу электродов, к ускоренной деградации электродов и формированию некачественных сварных соединений [1–5, 36–38]. Некоторые исследования посвящены изучению характеристик поверхности сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных методом RSW [3–8], однако лишь в немногих работах сообщается о значительном снижении твердости в зоне сварного шва [1–4] для различных марок алюминиевых сплавов. Ряд работ посвящен изучению снижения прочности сварного соединения по сравнению с основным металлом, а также анализу характера разрушения в центральной зоне сварной точки [29, 39].

Данное исследование направлено на изучение влияния параметров контактной точечной сварки на структуру и механические свойства сварных соединений из алюминиевого сплава АМг-5.

**Целями работы** являются: 1) оценка применимости контактной точечной сварки (RSW) для соединения алюминиевого сплава АМг-5; 2) определение влияния основных параметров RSW на структуру и механические свойства сварного соединения.

### Материалы и методика эксперимента

Циклограмма процесса RSW и конфигурация нахлесточного соединения для испытаний на растяжение представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Для проведения сварки использовали листы алюминиевого сплава АМг-5 (ГОСТ 21631–2023) толщиной 2,5 мм. Подготовка поверхности свариваемых листов включала в себя следующие этапы: предварительное обезжиривание и травление в 4%-м растворе гидроксида натрия (NaOH) в течение 10 минут с последующей обработкой в 2%-м растворе азотной кислоты (HNO<sub>3</sub>) в течение 5 минут для удаления оксидной пленки. Сварка осуществлялась на стационарной машине контактной точечной сварки МТН-100.01. Схема процесса RSW и циклограмма представлены на рис. 2.

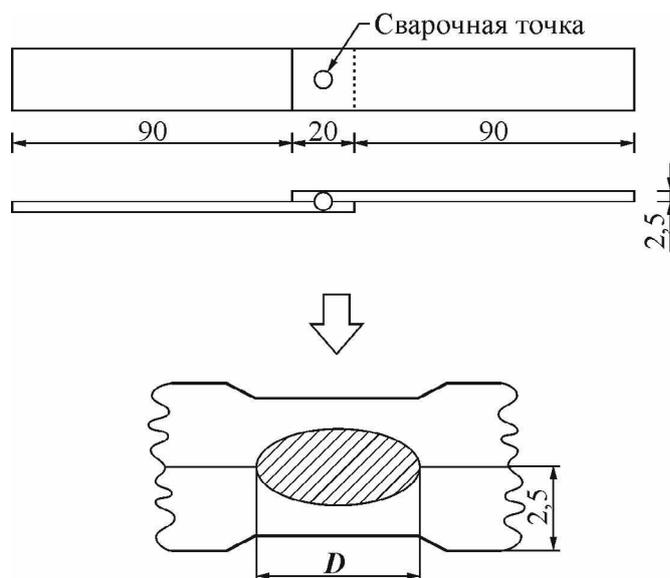


Рис. 1. Размеры образца конфигурации нахлесточного соединения RSW для испытаний на растяжение

Fig. 1. Dimensions of the lap joint specimen produced by resistance spot welding (RSW) for tensile testing

Для контактной точечной сварки алюминиевых сплавов толщиной 2,5 мм использовали три варьируемых параметра: сварочный ток (от 5 до 30 кА), длительность сварки (от 1 до 5 с) и прижимающее усилие (от 2000 до 5000 Н). Эксперимент проводили в тринадцати сериях, каждая из которых включала в себя сварку пяти образцов: четырех для статических испытаний на сдвиг при растяжении и одного для металлографического анализа и измерения твердости.

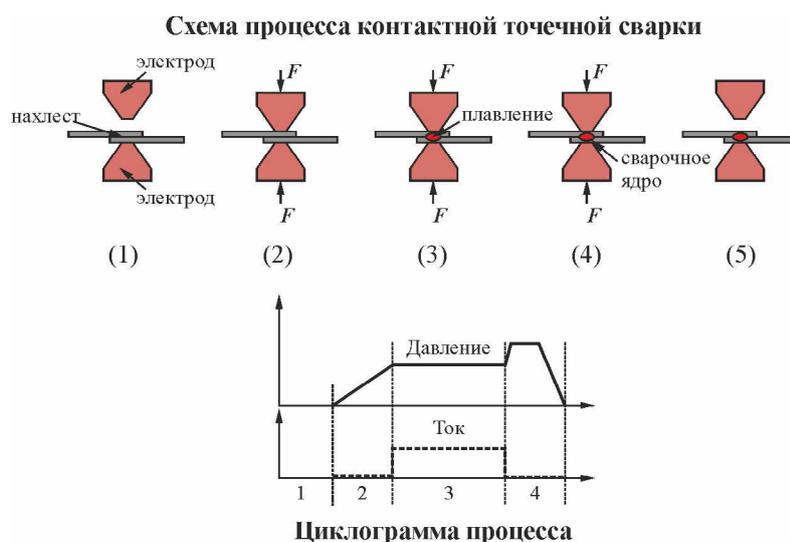


Рис. 2. Схема процесса и циклограмма контактной точечной сварки (RSW)

Fig. 2. Process scheme and cycle diagram of resistance spot welding (RSW)

Образцы для металлографического анализа и измерения твердости вырезали под прямым углом к продольному направлению сваренных образцов из центральной области соединения. Подготовку микрошлифов проводили путем резки образцов на заготовки размером 12×12 мм, шлифовки, полировки и травления для выявления микроструктуры. Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа «Микромед 2». Измерения твердости проводили по двум направлениям (вдоль радиуса ядра и по толщине листа) с использованием микротвердомера при нагрузке 100 г.

Испытания на сдвиг при растяжении выполняли на универсальной электромеханической испытательной машине Instron при комнатной температуре с постоянной скоростью перемещения траверсы 1 мм/мин до полного разрушения соединения. Диаметр сварной точки измеряли на поверхности разрушения после испытания на сдвиг при растяжении. Значения нагрузки при сдвиге и диаметра сварной точки определяли как среднее арифметическое по результатам пяти измерений для каждой серии.

### Результаты и их обсуждение

Сварные соединения, полученные методом контактной точечной сварки, демонстрировали

удовлетворительное качество поверхности во всем исследованном диапазоне параметров. При этом наблюдалось изменение диаметра и глубины отпечатка электродов в зависимости от режима сварки. При проведении металлографического анализа не обнаружено внутренних дефектов, таких как поры или усадочные раковины в литой структуре сварной точки.

На рис. 3 представлен общий вид микроструктуры сварного соединения, демонстрирующей характерные структурные зоны, включая зону сплавления и зону термического влияния (ЗТВ). В области литой структуры (рис. 3, а, б) наблюдается мелкозернистая рекристаллизованная структура с равноосными зёрнами, нерастворимые включения интерметаллида  $FeAl_3$  (черные), а также узкая зона столбчатых кристаллов, ориентированных вдоль направления отвода тепла в процессе кристаллизации. Зона термического влияния, прилегающая к зоне сплавления (рис. 3, в), характеризуется наличием дендритной структуры. Микроструктура основного материала (рис. 3, г) состоит из зёрен, вытянутых в направлении прокатки.

С целью изучения влияния длительности сварки на микроструктуру сварного соединения был проведен металлографический анализ образцов, сваренных при различных значениях

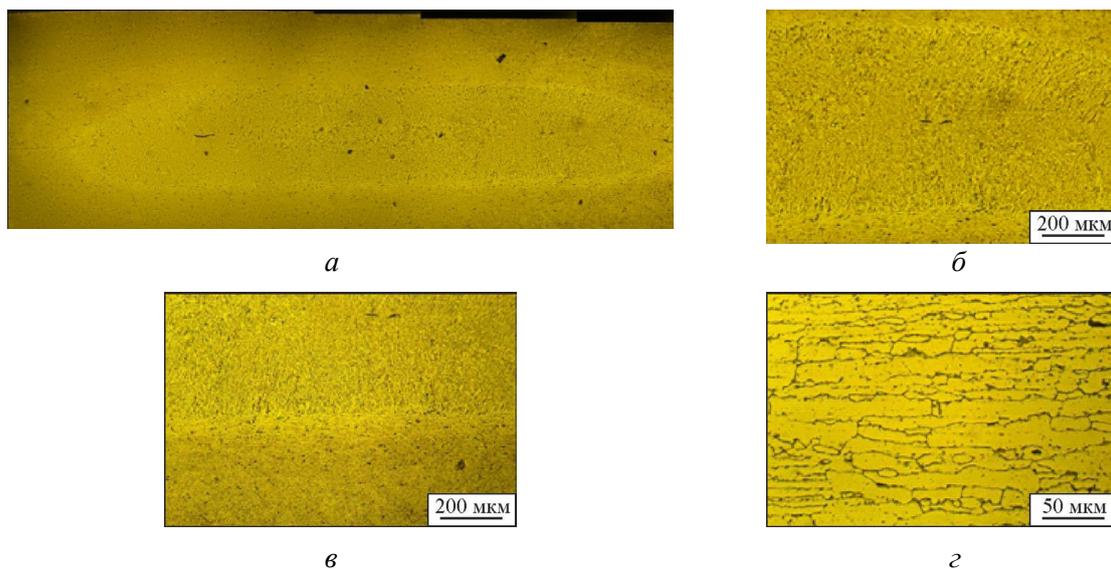


Рис. 3. Панорамный снимок сварного точечного шва (а), микроструктура сварочного ядра (б), граница перехода от сварочного ядра к ЗТВ (в), основной металл (г)

Fig. 3. Microstructure of a welded joint obtained by resistance spot welding (RSW): general view of the welded joint (a); microstructure of the cast zone of the weld core (b); transition zone from the weld core to the heat-affected zone (HAZ) (c); microstructure of the base material (d)

длительности сварки (от 33,4 до 167,0 мс) и фиксированном сварочном токе 12 кА. Установлено, что увеличение длительности сварки в указанном диапазоне приводит к росту размеров зерен равноосной, дендритной и столбчатой структуры в зоне сплавления. В зоне термического влияния существенных изменений размера зерен и микроструктуры по сравнению с основным материалом не выявлено. Однако при длительности сварки, превышающей 167,0 мс, наблюдается увеличение размера зерен в ЗТВ, прилегающей к зоне сплавления, по сравнению с размером зерен в основном материале, что обусловлено повышенным тепловложением в процессе сварки.

В зонах сплавления сварных швов, выполненных при минимальном значении сварочного тока, наблюдается столбчатая структура с выраженной зоной ликвации в области, соответствующей границе сплавления (рис. 3, б). Степень выраженности зоны ликвации увеличивается при использовании более низких значений сварочного тока. Повышение сварочного тока приводит к значительному увеличению размера столбчатых кристаллов в зоне сплавления. Кроме того, в центральной области зоны сплавления формируются участки с равноосными зернами, что свидетельствует о снижении скорости охлаждения и температурного градиента. В зоне термического влияния сварных швов, выполненных с применением высоких значений сварочного тока, также наблюдается укрупнение зерен.

Повышение сварочного тока до 17 кА приводило к формированию более мелких и равноосных зерен в зоне сплавления. При увеличении сварочного тока с 12 до 17 кА наблюдалось большее вдавливание электрода в свариваемые листы, что сокращало расстояние между охлаждаемым электродом и центром зоны сплавления. Вследствие этого увеличивался температурный градиент ( $G$ ) в зоне сплавления. Диаметр зоны сплавления в значительной степени определялся значениями сварочного тока и длительности сварки. Более высокий температурный градиент в металле сварного соединения способствует формированию мелкозернистой структуры при кристаллизации, что согласуется с результатами работ [1–7].

Зависимость диаметра зоны сплавления от сварочного тока и длительности сварки представлена на рис. 4 и 5. Наблюдается монотонное

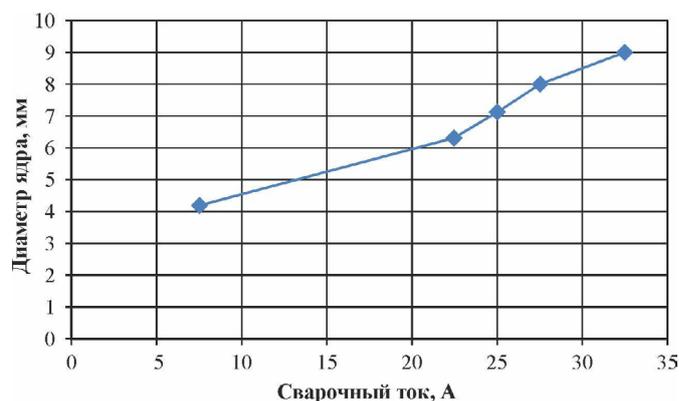


Рис. 4. Зависимость размера ядра сварочной точки от силы тока

Fig. 4. Dependence of the nugget diameter on the welding current (RSW)

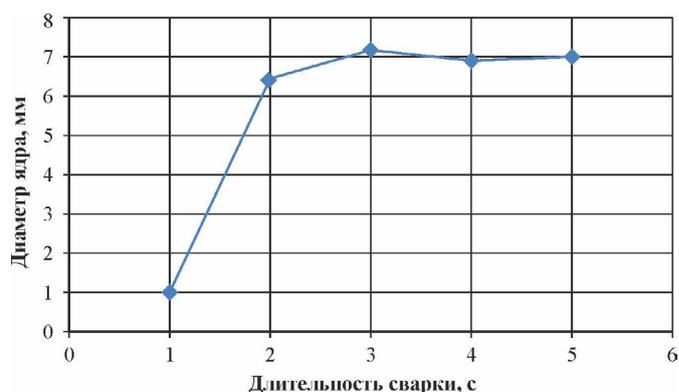


Рис. 5. Влияние времени сварки на размер ядра

Fig. 5. Effect of welding period on the nugget size

увеличение диаметра зоны сплавления с ростом сварочного тока вплоть до максимального значения, достижимого на используемом оборудовании (рис. 4). Эта тенденция обусловлена увеличением тепловложения с ростом сварочного тока и согласуется с результатами исследований для углеродистых сталей [1]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что заданное прижимающее усилие было недостаточным для проявления эффекта выброса металла и последующего уменьшения диаметра зоны сплавления, поскольку, несмотря на незначительное количество выбросов при токе 28,7 кА, уменьшения диаметра зоны сплавления не наблюдалось (рис. 4).

Ряд исследователей отмечают возможность увеличения сварочного тока без возникновения эффекта выброса металла за счет повышения усилия на электродах [2–5]. Металлографический анализ отдельных образцов, сваренных при высоких значениях тока, зафиксировал неполное

вытеснение металла. Кроме того, сварочный ток оказывает влияние на глубину отпечатка электродов на поверхности металла. Все сварные соединения демонстрируют наличие отпечатка электрода, глубина которого в значительной степени определяется величиной сварочного тока.

Прижимающее усилие оказывает незначительное влияние на диаметр зоны сплавления при значениях до 4000 Н. Однако при увеличении усилия выше этого значения наблюдается некоторое уменьшение диаметра зоны сплавления (рис. 6). Этот эффект может быть объяснен улучшением контакта между свариваемыми поверхностями и, как следствие, снижением электрического сопротивления и тепловложения при высоких значениях усилия на электродах. Влия-

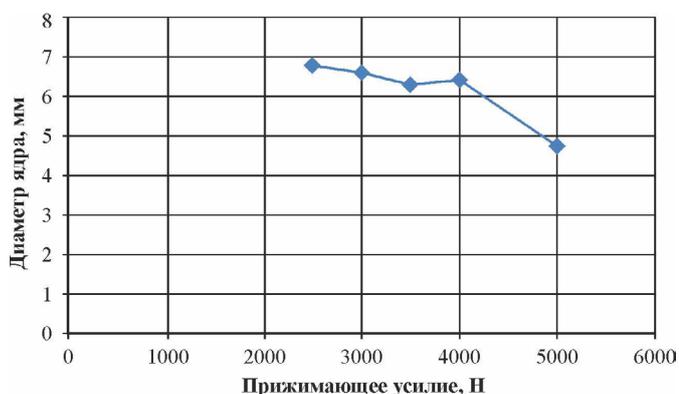


Рис. 6. Влияние усилия на электродах на диаметр ядра

Fig. 6. Effect of the electrode force on the nugget

ние контактной поверхности раздела между свариваемыми листами на изменение размера зоны сплавления в зависимости от усилия сжатия электродов также отмечается в работах [19–22].

Влияние прижимного усилия на глубину отпечатка (вдавливания) оказалось незначительным в пределах исследованного диапазона. Для детального анализа влияния прижимающего усилия на уменьшение толщины свариваемых листов были проведены измерения при промежуточном значении сварочного тока 26,4 кА и времени сварки цикла в диапазоне усилий сжатия от 2354 до 4709 Н. Установлено, что прижимающее усилие не оказывает существенного влияния на глубину отпечатка (вдавливания), при этом для всех сварных соединений наблюдалось уменьшение толщины свариваемых листов примерно на 10 %.

С целью оценки прочности и несущей способности сварных соединений были проведены испытания на растяжение (табл. 1).

В табл. 1 также представлены результаты, отражающие влияние параметров сварки на прочность соединения, диаметр зоны сплавления и твердость. Установлено, что увеличение прижимающего усилия с 2 до 3 кН и сварочного тока с 7 до 8 кА приводит к значительному повышению прочности на растяжение. Изменение длительности сварки в диапазоне от 15 до 25 мс оказывало незначительное влияние на прочность соединения.

Таблица 1

Table 1

**Значения предела прочности, диаметра ядра, средней микротвердости**  
**Values of ultimate strength, weld core diameter, and average microhardness**

№ эксп. / Exp. No.	Прочность на разрыв, МПа / Tensile strength, MPa	Диаметр сварочного ядра, мм / Nugget diameter, mm	Средняя микротвердость, HV / Average microhardness, HV
Основной металл / Base metal	272	–	94
1	231	7,91	110
2	220	7,68	105
3	228	7,62	103
4	218	7,59	98
5	198	6,94	103
6	187	6,85	101
7	210	7,20	106
8	203	6,87	101
9	189	7,12	106

Для характеристики механических свойств сварного соединения определяли микротвердость по Виккерсу в зоне сварки (рис. 7). Установлено, что микротвердость в зоне сплавления увеличивается с ростом сварочного тока и длительности сварки. Максимальные значения твердости составили 110 и 107 HV. Средние значения твердости в зоне сплавления превышали твердость основного металла (рис. 7, красная линия), что свидетельствует о снижении пластичности сварного соединения по сравнению с основным материалом.

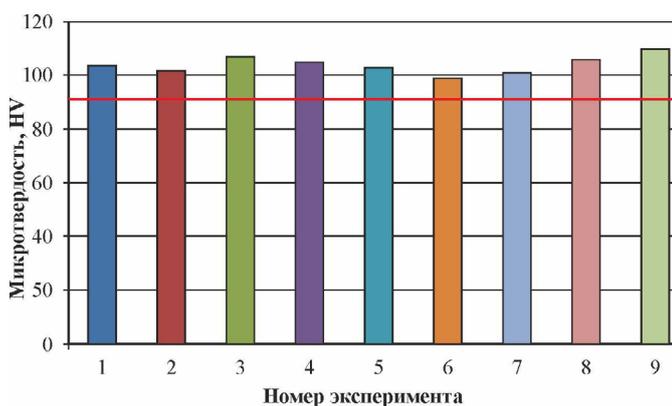


Рис. 7. Значения микротвердости сварного шва по номеру эксперимента

Fig. 7. Values of microhardness of the weld versus experiment number

Контактная точечная сварка представляет собой термомеханический процесс соединения, в котором тепло играет ключевую роль в формировании соединения между свариваемыми элементами. Согласно закону Джоуля – Ленца, количество теплоты, выделяющейся при контактной точечной сварке, определяется сварочным током, длительностью сварки и электрическим сопротивлением материалов. Таким образом, сварочный ток, длительность сварки и прижимающее усилие являются основными параметрами, определяющими процесс сварки и, как следствие, качество сварного соединения (рис. 2). Циклограмма процесса RSW, как правило, отражает изменение этих трех параметров во времени и позволяет определить оптимальные диапазоны их значений для достижения требуемых характеристик сварного соединения [1–7].

Известно, что недостаточное значение сварочного тока может привести к реализации холодной сварки, в то время как чрезмерное увеличение сварочного тока может вызвать эффект

выброса металла из зоны сплавления, а также формирование внутренней пористости или трещин в литой структуре. Недостаточное прижимающее усилие может способствовать растеканию жидкого металла по границе сплавления, в то время как избыточное прижимающее усилие может снизить эффективность тепловыделения из-за уменьшения контактного сопротивления [1].

В процессе сварки по мере повышения температуры металла происходит увеличение его электрического сопротивления. Общее сопротивление в сварочном контуре (включая сопротивление сварочной машины, электродов и свариваемых деталей) определяет величину сварочного тока. Для формирования литой зоны при контактной точечной сварке необходимо обеспечить определенное значение суммарного электрического сопротивления в контуре, складывающегося из сопротивлений на каждом участке прохождения тока через свариваемые заготовки [1, 2]. Более высокое значение суммарного сопротивления обеспечивает лучшую свариваемость [1]. Величина суммарного сопротивления зависит от состояния поверхности свариваемых материалов и электродов, геометрии поверхности электродов и прижимающего усилия. Максимальное тепловыделение происходит в зоне контакта между свариваемыми деталями, где сосредоточено основное электрическое сопротивление. При этом высокая теплопроводность медных электродов и их интенсивное водяное охлаждение предотвращают достижение температуры плавления на поверхности основного металла.

По мере увеличения температуры в зоне максимального электрического сопротивления происходит плавление металла и образование литой зоны (ядро сварного соединения). Одновременно с этим происходит утонение свариваемых листов, а расстояние между электродами уменьшается под действием прижимающего усилия, что приводит к снижению общего динамического сопротивления. Если объем жидкого металла в месте сварного соединения становится настолько велик, что окружающий твердый металл не способен его удержать под действием прижимающего усилия, то происходит вытеснение жидкого металла из зоны сварки. Увеличение прижимающего усилия приводит к уменьшению

электрического сопротивления за счет более плотного контакта между свариваемыми листами и разрушения поверхностных неровностей.

Эффективность поглощения энергии и скорость роста зоны сплавления зависят от геометрических размеров свариваемых деталей [10–15]. Однако классические исследования RSW [1, 2] зачастую не учитывали влияние данного фактора, а большинство систем управления RSW оптимизированы для сварки деталей с одинаковыми размерами. Многие исследователи [1–12] стремятся к оптимизации параметров RSW для достижения стабильного процесса и получения сварных соединений с заданными характеристиками. Подчеркивается значительное влияние сварочного тока и длительности сварки на качество точечных сварных соединений.

Авторы [1–5] выделяют сварочный ток, длительность сварки и прижимающее усилие как основные параметры процесса RSW. Для достижения оптимального диаметра литого ядра сварного соединения рекомендуются повышенные значения сварочного тока и длительности сварки [1–3]. В то же время другие исследования демонстрируют прямую корреляцию диаметра литой зоны со сварочным током и длительностью сварки, а также обратную корреляцию с прижимающим усилием [5–8].

Морфология сварного соединения, полученного методом контактной точечной сварки, для соединений «металл – металл» характеризуется наличием трех характерных зон: зоны сплавления (ЗС), зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ) (рис. 3). Зона сплавления представляет собой литое ядро сварного соединения, формирующееся в результате плавления и последующей кристаллизации свариваемых металлов. Зона термического влияния – это область, которая не подвергается плавлению, но претерпевает изменения микроструктуры под воздействием тепла, поступающего из зоны сплавления. Микроструктурный анализ образцов, полученных в данной работе, также выявил наличие трех характерных зон: зоны сплавления, зоны термического влияния и основного металла (рис. 3). Установлены существенные различия в микроструктуре каждой из этих зон. Зона сплавления и зона термического влияния характеризуются формированием столбчатых дендритов, ориентированных в определенном направлении.

Образование пор в литой структуре связывают с загрязнением поверхности и возможным насыщением металла водородом. Отсутствие пор в литой зоне в данном исследовании свидетельствует о достаточном тепловложении для обеспечения качественного плавления основного металла и формирования прочного соединения.

Сравнение микроструктуры зоны термического влияния и зоны сплавления показывает, что на границе сплавления формируются более крупные зерна столбчатых дендритов. Образование столбчатых дендритов в обеих зонах обусловлено высокой скоростью затвердевания ( $R$ ) и высоким температурным градиентом ( $G$ ) между расплавленным металлом (около 600 °С) и основным металлом (при комнатной температуре). В этих условиях не выполняется условие переохлаждения, необходимое для реализации механизма кристаллизации с плоской границей раздела «твердое тело – жидкость» [1–7], т. е. отношение  $G/R$  оказывается недостаточным для подавления дендритного роста. Меньший размер столбчатых дендритов в зоне сплавления связан с более высокой скоростью охлаждения (т. е. более высокой скоростью затвердевания), обусловленной высокой теплопроводностью алюминиевого сплава (120...180 Вт/мК) [1, 5, 9, 12–15].

Скорость охлаждения уменьшается от зоны сплавления к зоне термического влияния и основному металлу, который действует как теплоотвод. Это связано с тем, что теплопроводность является основным фактором, определяющим скорость охлаждения. Вследствие этого значение  $G \times R$  в ЗТВ ниже по сравнению с ЗС, что приводит к формированию более крупных зерен.

Размер и форма зоны сплавления служат одними из ключевых критериев оценки качества RSW-соединения (рис. 3, а) [1, 2, 5, 16–19]. В данном исследовании диаметр зоны сплавления ( $D_{ЗС}$ ) варьировался от 1,33 до 7,61 мм. Каждое значение представляет собой среднее арифметическое по результатам не менее трех измерений. Диаметр зоны сплавления, превышающий 7 мм, рассматривается рядом авторов [1, 2] как критический с точки зрения влияния на прочностные характеристики соединения. Увеличение размера зоны сплавления обусловлено высоким тепловложением при используемых режимах сварки.

Прочность на сдвиг при растяжении – еще один важный критерий для оценки качества кон-

тактных точечных сварных соединений. В проведенных экспериментах прочность на сдвиг при растяжении девяти сварных образцов варьировалась от 179 до 231 МПа (табл. 1). Максимальное значение прочности на сдвиг при растяжении было достигнуто при диаметре литой зоны 7,91 мм.

Итак, процесс RSW характеризуется сложным взаимодействием множества факторов. Однако основными регулируемыми параметрами являются сварочный ток, прижимающее усилие и длительность сварки, которые оказывают существенное влияние на качество сварного соединения. В табл. 2 представлено обобщение влияния указанных параметров на процесс RSW и качество сварки, а также соответствующие меры оптимизации, основанные на обзоре литературы [1–23].

В заключение следует отметить, что для получения качественных сварных соединений алюминиевых сплавов методом контактной точечной сварки необходимо подбирать оптимальное сочетание параметров циклограммы сварки. В частности, для достижения высоких значений прочности на сдвиг при растяжении и получения

сварных соединений с большим диаметром зоны сплавления необходимо учитывать возможность возникновения таких нежелательных явлений, как эффект выброса металла, разбрызгивание, холодная сварка или формирование зоны сплавления недостаточного размера. Обзор литературы [1–23] показывает, что сварочный ток является ключевым параметром, определяющим тепловложение в процессе сварки, а также наиболее легко регулируемым параметром. Кроме того, применение переменного прижимающего усилия, реализуемое с помощью электрического сервопривода, может улучшить стабильность процесса и повысить качество сварного соединения [14–23].

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию параметров контактной точечной сварки алюминиевых сплавов различной толщины.

## Выводы

1. При контактной точечной сварке (RSW) алюминиевого сплава АМг-5 увеличение сварочного тока и длительности сварки приводит к уве-

Таблица 2

Table 2

### Рекомендации по оптимизации основных параметров контактной точечной сварки Recommendations for optimizing the basic parameters of resistance spot welding

Переменные процесса / Process variables	Влияние на сварочную точку / Effect on the welding point	Меры оптимизации / Optimization measures
Сварочный ток / Welding current	Размер и форма сварного шва, возникновение выброса, прочность на сдвиг и растяжение формируют микроструктуру сварного шва / Size and shape of the weld; Occurrence of expulsion; Shear and tensile strength influences the microstructure of the weld	Использование моделирования процесса и эксперимента для поиска оптимальной комбинации для одного конкретного процесса / Use of process modeling and experimentation to find the optimal combination for a specific process
Время сварки / Welding period	Прочность сварных соединений на растяжение, отслаивание и сдвиг / Tensile strength, peeling, and shear strength of welded joints	Необходимо вносить изменение, а не постоянное значение в ходе процесса / It is necessary to apply variation rather than a constant value during the process
Усилие на электродах / Electrode Force	Энергоэффективность процесса; возникновение выброса расплавленного металла; есть особенности затвердевания ядра при точечной сварке / Energy efficiency of the process; Occurrence of molten metal expulsion; Specific features of weld core solidification during spot welding	Необходимо вносить изменение, а не постоянное значение в ходе процесса / It is necessary to apply variation rather than a constant value during the process

личению тепловложения и, как следствие, к увеличению диаметра зоны сплавления. Прочность сварного соединения на сдвиг при растяжении также увеличивается с ростом сварочного тока и длительности сварки, что обусловлено увеличением диаметра зоны сплавления, который является одним из основных факторов, определяющих прочность соединения.

2. Для контактной точечной сварки внахлест алюминиевого сплава АМг-5 толщиной 2,5 мм оптимальными параметрами, обеспечивающими прочность соединения на сдвиг при растяжении 238 МПа, являются прижимное усилие 3000 Н, сварочный ток 12 кА и длительность сварки 25 мс.

### Список литературы

1. *Кочергин К.А.* Контактная сварка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.

2. *Орлов Б.Д.* Технология и оборудование контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

3. *Zhou K., Yao P.* Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – Vol. 124. – P. 170–198. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.01.041.

4. Developments in characterization of resistance spot welding of aluminum / M. Hao, K.A. Osman, D.R. Boomer, C.J. Newton // *Welding Journal – Including Welding Research Supplement*. – 1996. – Vol. 75 (1). – P. 1–4. – URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0029777851&origin=inward&txGid=43eb57982320fc23bd6ff9a0a6c0a142> (accessed: 07.08.2025).

5. A review on resistance spot welding of aluminum alloys / S.M. Manladan, F. Yusof, S. Ramesh, M. Fadzil, Z. Luo, S. Ao // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 90. – P. 605–634. – DOI: 10.1007/s00170-016-9225-9.

6. Feasibility study of dissimilar joining of aluminum alloy 5052 to pure copper via thermo-compensated resistance spot welding / Y. Zhang, Y. Li, Z. Luo, T. Yuan, J. Bi, Z.M. Wang, Z.P. Wang, Y.J. Chao // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 106. – P. 235–246. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.05.117.

7. *Zhang W., Xu J.* Advanced lightweight materials for automobiles: A review // *Materials & Design*. – 2022. – Vol. 221. – P. 110994. – DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110994.

8. Achieving safety and weight reduction in automobiles with the application of composite material / N. Sateesh, R. Subbiah, B.Ch Nookaraju, D. Siva Naga-

raju // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 62. – P. 4469–4472. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.936.

9. Materials for automotive lightweighting / A. Taub, E. De Moor, A. Luo, D.K. Matlock, J.G. Speer, U. Vaidya // *Annual Review of Materials Research*. – 2019. – Vol. 49 (1). – P. 327–359. – DOI: 10.1146/annurev-matsci-070218-010134.

10. Joining aluminum alloy 5052 sheets via novel hybrid resistance spot clinching process / Y. Zhang, H. Shan, Y. Li, J. Guo, Z. Luo, C. Yong Ma // *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 118. – P. 36–43. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.01.017.

11. *Ambroziak A., Korzeniowski M.* Using resistance spot welding for joining aluminium elements in automotive industry // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2010. – Vol. 10 (1). – P. 5–13. – DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60126-5.

12. Influence of welding parameters on the tensile shear strength of aluminum alloy joint welded by resistance spot welding / R. Qiu, Z. Zhang, K. Zhang, H. Shi, G. Ding // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2011. – Vol. 20. – P. 355–358. – DOI: 10.1007/s11665-010-9703-4.

13. Effects of sheet surface conditions on electrode life in resistance welding aluminum / Z. Li, C. Hao, J. Zhang, H. Zhang // *Welding Journal*. – 2007. – Vol. 86 (4).

14. Characterization of resistance spot welded joints between aluminum alloy and mild steel with composite electrodes / R. Qiu, J. Li, H. Shi, H. Yu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 24. – P. 1190–1202.

15. Corrosion behavior in aluminum/galvanized steel resistance spot welds and self-piercing riveting joints in salt spray environment / B. Pan, H. Sun, S.-L. Shang, W. Wen, M. Banu, J.C. Simmer, B.E. Carlson, N. Chen, Z.-K. Liu, Z. Zheng, P. Wang, J. Li // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 70. – P. 608–620. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.08.052.

16. Microstructural and interface geometrical influence on the mechanical fatigue property of aluminum/high-strength steel lap joints using resistance element welding for lightweight vehicles: experimental and computational investigation / S. Baek, G.Y. Go, J.-W. Park, J. Song, H.-c. Lee, S.-J. Lee, S. Lee, C. Chen, M.-S. Kim, D. Kim // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 17. – P. 658–678. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.01.041.

17. *Arumugam A., Pramanik A.* A review on the recent trends in forming composite joints using spot welding variants // *Journal of Composites Science*. – 2024. – Vol. 8 (4). – P. 155. – DOI: 10.3390/jcs8040155.

18. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding / S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, E. Ilhan // *Materials*



& Design. – 2008. – Vol. 29 (7). – P. 1427–1431. – DOI: 10.1016/j.matdes.2007.09.004.

19. *Matsushita M., Ikeda R., Oi K.* Development of a new program control setting of welding current and electrode force for single-side resistance spot welding // *Welding in the World*. – 2015. – Vol. 59. – P. 533–543. – DOI: 10.1007/s40194-015-0228-1.

20. *Chang B.H., Zhou Y.* Numerical study on the effect of electrode force in small-scale resistance spot welding // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 139 (1–3). – P. 635–641. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00613-7.

21. *Podrżaj P., Jerman B., Simončič S.* Poor fit-up condition in resistance spot welding // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – Vol. 230. – P. 21–25. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.009.

22. *Yu J.* New methods of resistance spot welding using reference waveforms of welding power // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2016. – Vol. 17. – P. 1313–1321. – DOI: 10.1007/s12541-016-0156-z.

23. Interfacial microstructure and mechanical property of resistance spot welded joint of high strength steel and aluminium alloy with 4047 AlSi12 interlayer / *W. Zhang, D. Sun, L. Han, D. Liu* // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 57. – P. 186–194. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.045.

24. *Pouranvari M., Marashi S.P.H.* Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2013. – Vol. 18 (5). – P. 361–403. – DOI: 10.1179/1362171813Y.0000000120.

25. Production of new nanostructures for modification of steels and cast irons / *A.I. Karlina, V.V. Kondrat'ev, A.D. Kolosov, A.E. Balanovskiy, N.A. Ivanov* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012183. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012183.

26. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium / *A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, V.V. Kondrat'ev, V. Van Huy, A.I. Karlina* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012013. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.

27. Application of plasma surface quenching to reduce rail side wear / *M.V. Konstantinova, A.E. Balanovskiy, V.E. Gozbenko, S.K. Kargapol'tsev, A.I. Karlina, M.G. Shtayger, E.A. Guseva, B.O. Kuznetsov* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012146. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012146.

28. Capability enhancement of production of activating fluxes for arc welding using ultradispersed products of silicon waste processing / *N.N. Ivanchik, A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, I.A. Sysoev, A.I. Karlina* // *IOP*

*Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012035. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012035.

29. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / *K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Y. Skeebe, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina* // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.

30. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening / *A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, M.V. Grechneva, V.V. Kondrat'ev, A.I. Karlina* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012012. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012012.

31. Complex metallographic researches of 110G13L steel after heat treatment / *A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, V.V. Kondrat'ev, S.A. Nebogin, A.I. Karlina* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012014.

32. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening / *A.D. Kolosov, V.E. Gozbenko, M.G. Shtayger, S.K. Kargapol'tsev, A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.V. Sivtsov, S.A. Nebogin* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 560. – P. 012185. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.

33. An investigation into the behavior of cathode and anode spots in a welding discharge / *A.I. Karlina, A.E. Balanovskiy, V.V. Kondrat'ev, V.V. Romanova, A.G. Batukhtin, Y.I. Karlina* // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14 (21). – P. 9774. – DOI: 10.3390/app14219774.

34. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / *V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 126 (1). – P. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.

35. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage / *E.A. Efremenkov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebe, M.V. Grechneva, A.V. Olisov, A.D. Ens* // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (1). – Vol. 5. – DOI: 10.3390/app12010005.

36. *Martyushev N.V., Skeebe V.Yu.* The method of quantitative automatic metallographic analysis // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 803 (1). – P. 012094. – DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.

37. *Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V.* Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // *IOP*

Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194 (2). – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

38. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings / E.A. Zverev, V.Y. Skeebe, P.Y. Skeebe, I.V. Khlebova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – 87(8). – 082061. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.

39. Скиба В.Ю. Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

40. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки коррозионностойких сталей / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, А.С. Яньюшкин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.

41. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions / R.A. Mamadaliev, P.V. Bakhmatov, N.V. Martyushev, V.Y. Skeebe, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Determination of the main parameters of resistance spot welding of Al-5 Mg aluminum alloy

Viktor Kondratiev<sup>1, 2, a</sup>, Valeriy Gozbenko<sup>3, 4, b, \*</sup>, Roman Kononenko<sup>5, c</sup>,  
Marina Konstantinova<sup>5, d</sup>, Elena Guseva<sup>5, e</sup>

<sup>1</sup> A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1A Favorsky str., Irkutsk, 664033, Russian Federation

<sup>2</sup> Cherepovets State University, 5 Lunacharsky pr., Cherepovets, 162600, Russian Federation

<sup>3</sup> Irkutsk State Transport University, 15 Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

<sup>4</sup> Angarsk State Technical University, 60 Tchaikovskogo str., Angarsk, 665835, Russian Federation

<sup>5</sup> Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7437-2291>,  [imz@mail.ru](mailto:imz@mail.ru); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8394-0054>,  [vgozbenko@inbox.ru](mailto:vgozbenko@inbox.ru);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0009-0001-5900-065X>,  [istu\\_politech@mail.ru](mailto:istu_politech@mail.ru); <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8533-0214>,  [mavikonst@mail.ru](mailto:mavikonst@mail.ru);

<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8719-7728>,  [el.guseva@rambler.ru](mailto:el.guseva@rambler.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 06 March 2025

Revised: 07 April 2025

Accepted: 14 May 2025

Available online: 15 September 2025

#### Keywords:

Welding

Resistance Spot Welding (RSW)

Nugget

Heat-Affected Zone (HAZ)

Aluminum

Hardness

### ABSTRACT

**Introduction.** The resistance spot welding (*RSW*) process has proven to be widely applicable across various industrial sectors, especially for mass production. Typical fields of application include aerospace, automotive, furniture manufacturing, and other industries. However, the *RSW* process presents certain challenges when welding aluminum and its alloys. Generally, aluminum alloys produce poor welds due to their physical and metallurgical properties such as oxide formation, thermal expansion and contraction, lower weldability, and the formation of intermetallic compounds. This study aims to evaluate the feasibility and mechanical characteristics of *RSW* joints in *Al-5 Mg* aluminum alloys. **The purpose** is to assess the potential of resistance spot welding for aluminum alloys and to determine the influence of key *RSW* parameters on the microstructure and properties of the weld. **Research methods.** *Al-5 Mg* aluminum alloy sheets in as-received condition were used. Spot welding was performed using a stationary resistance spot welding machine *MT-4240*. Samples for analysis were cut, polished, and subsequently examined under an optical microscope. Hardness measurements were carried out using a microhardness tester along two directions: radially across the nugget and through the sheet thickness, employing a 100 g load. An *Instron* electromechanical testing machine was utilized for shear testing at a constant traverse speed of 1 mm/min until complete joint failure at room temperature. The nugget diameter was measured on the fracture surface after shear tensile testing. **Results and Discussion.** Optimal input parameters for welding 2.5 mm thick aluminum sheets were identified, and three output variables were analyzed: tensile strength, joint hardness, and nugget diameter. It was observed that joint strength improved significantly with increased process parameters (welding current and welding period). Nugget diameter showed a clear correlation with input parameters related to current and welding period. An increase in process parameters, i.e., weld cycle time, electrode force, and welding current, led to an increase in nugget size. The ratio of weld strength to base metal strength reached approximately 0.9. It is demonstrated that resistance spot welding of 2.5 mm thick *Al-5 Mg* aluminum sheets is feasible and can be employed in various industrial applications.

**For citation:** Kondratiev V.V., Gozbenko V.E., Kononenko R.V., Konstantinova M.V., Guseva E.A. Determination of the main parameters of resistance spot welding of Al-5 Mg aluminum alloy. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 6–22. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-6-22. (In Russian).

#### \* Corresponding author

Gozbenko Valeriy E., D.Sc. (Engineering), Professor

Irkutsk State Transport University,

15 Chernyshevskogo str.,

664074, Irkutsk, Russian Federation

Tel: +7 914 951-60-21, e-mail: [vgozbenko@inbox.ru](mailto:vgozbenko@inbox.ru)

## References

1. Kochergin K.A. *Kontaknaya svarka* [Contact welding]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 240 p.
2. Orlov B.D. *Tekhnologiya i oborudovanie kontaktnoi svarki* [Technology and equipment of contact welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 352 p.
3. Zhou K., Yao P. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 124, pp. 170–198, DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.01.041.
4. Hao M., Osman K.A., Boomer D.R., Newton C.J. Developments in characterization of resistance spot welding of aluminum. *Welding Journal – Including Welding Research Supplement*, 1996, vol. 75 (1), pp. 1–4. Available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0029777851&origin=inward&txGid=43eb57982320fc23bd6ff9a0a6c0a142> (accessed 07.08.2025).
5. Manladan S.M., Yusof F., Ramesh S., Fadzil M., Luo Z., Ao S. A review on resistance spot welding of aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 90, pp. 605–634. DOI: 10.1007/s00170-016-9225-9.
6. Zhang Y., Li Y., Luo Z., Yuan T., Bi J., Wang Z.M., Wang Z.P., Chao Y.J. Feasibility study of dissimilar joining of aluminum alloy 5052 to pure copper via thermo-compensated resistance spot welding. *Materials & Design*, 2016, vol. 106, pp. 235–246. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.05.117.
7. Zhang W., Xu J. Advanced lightweight materials for automobiles: A review. *Materials & Design*, 2022, vol. 221, p. 110994. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110994.
8. Sateesh N., Subbiah R., Nookaraju B.Ch, Nagaraju D. Siva. Achieving safety and weight reduction in automobiles with the application of composite material. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 62, pp. 4469–4472. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.936.
9. Taub A., Moor E. De, Luo A., Matlock D.K., Speer J.G., Vaidya U. Materials for automotive lightweighting. *Annual Review of Materials Research*, 2019, vol. 49 (1), pp. 327–359. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070218-010134.
10. Zhang Y., Shan H., Li Y., Guo J., Luo Z., Ma C. Yong. Joining aluminum alloy 5052 sheets via novel hybrid resistance spot clinching process. *Materials & Design*, 2017, vol. 118, pp. 36–43. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.01.017.
11. Ambroziak A., Korzeniowski M. Using resistance spot welding for joining aluminium elements in automotive industry. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2010, vol. 10 (1), pp. 5–13. DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60126-5.
12. Qiu R., Zhang Z., Zhang K., Shi H., Ding G. Influence of welding parameters on the tensile shear strength of aluminum alloy joint welded by resistance spot welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20, pp. 355–358. DOI: 10.1007/s11665-010-9703-4.
13. Li Z., Hao C., Zhang J., Zhang H. Effects of sheet surface conditions on electrode life in resistance welding aluminum. *Welding Journal*, 2007, vol. 86 (4).
14. Qiu R., Li J., Shi H., Yu H. Characterization of resistance spot welded joints between aluminum alloy and mild steel with composite electrodes. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 24, pp. 1190–1202. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.03.069.
15. Pan B., Sun H., Shang S.-L., Wen W., Banu M., Simmer J.C., Carlson B.E., Chen N., Liu Z.-K., Zheng Z., Wang P., Li J. Corrosion behavior in aluminum/galvanized steel resistance spot welds and self-piercing riveting joints in salt spray environment. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 70, pp. 608–620. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.08.052.
16. Baek S., Go G.Y., Park J.-W., Song J., Lee H.-c., Lee S.-J., Lee S., Chen C., Kim M.-S., Kim D. Microstructural and interface geometrical influence on the mechanical fatigue property of aluminum/high-strength steel lap joints using resistance element welding for lightweight vehicles: experimental and computational investigation. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 17, pp. 658–678. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.01.041.
17. Arumugam A., Pramanik A. A review on the recent trends in forming composite joints using spot welding variants. *Journal of Composites Science*, 2024, vol. 8 (4), p. 155. DOI: 10.3390/jcs8040155.
18. Aslanlar S., Ogur A., Ozsarac U., Ilhan E. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. *Materials & Design*, 2008, vol. 29 (7), pp. 1427–1431. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.09.004.
19. Matsushita M., Ikeda R., Oi K. Development of a new program control setting of welding current and electrode force for single-side resistance spot welding. *Welding in the World*, 2015, vol. 59, pp. 533–543. DOI: 10.1007/s40194-015-0228-1.
20. Chang B.H., Zhou Y. Numerical study on the effect of electrode force in small-scale resistance spot welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 139 (1–3), pp. 635–641. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00613-7.



21. Podržaj P., Jerman B., Simončič S. Poor fit-up condition in resistance spot welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 230, pp. 21–25. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.009.
22. Yu J. New methods of resistance spot welding using reference waveforms of welding power. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, vol. 17, pp. 1313–1321. DOI: 10.1007/s12541-016-0156-z.
23. Zhang W., Sun D., Han L., Liu D. Interfacial microstructure and mechanical property of resistance spot welded joint of high strength steel and aluminium alloy with 4047 AlSi12 interlayer. *Materials & Design*, 2014, vol. 57, pp. 186–194. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.045.
24. Pouranvari M., Marashi S.P.H. Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, vol. 18 (5), pp. 361–403. DOI: 10.1179/1362171813Y.0000000120.
25. Karlina A.I., Kondrat'ev V.V., Kolosov A.D., Balanovskiy A.E., Ivanov N.A. Production of new nanostructures for modification of steels and cast irons. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012183. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012183.
26. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Kondrat'ev V.V., Van Huy V., Karlina A.I. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.
27. Konstantinova M.V., Balanovskiy A.E., Gozbenko V.E., Kargapoltsev S.K., Karlina A.I., Shtayger M.G., Guseva E.A., Kuznetsov B.O. Application of plasma surface quenching to reduce rail side wear. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012146. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012146.
28. Ivanchik N.N., Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Sysoev I.A., Karlina A.I. Capability enhancement of production of activating fluxes for arc welding using ultradispersed products of silicon waste processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012035.
29. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1043. DOI: 10.3390/met13061043.
30. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Grechneva M.V., Kondrat'ev V.V., Karlina A.I. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012012.
31. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Kondrat'ev V.V., Nebogin S.A., Karlina A.I. Complex metallographic researches of 110G13L steel after heat treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012014.
32. Kolosov A.D., Gozbenko V.E., Shtayger M.G., Kargapoltsev S.K., Balanovskiy A.E., Karlina A.I., Sivtsov A.V., Nebogin S.A. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, p. 012185. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.
33. Karlina A.I., Balanovskiy A.E., Kondratiev V.V., Romanova V.V., Batukhtin A.G., Karlina Y.I. An investigation into the behavior of cathode and anode spots in a welding discharge. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14 (21), p. 9774. DOI: 10.3390/app14219774.
34. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshkin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126 (1), p. 012016. DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.
35. Efremenkov E.A., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Grechneva M.V., Olisov A.V., Ens A.D. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (1), vol. 5. DOI: 10.3390/app12010005.
36. Martyushev N.V., Skeebe V.Yu. The method of quantitative automatic metallographic analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803 (1), p. 012094. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.
37. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194 (2), p. 022037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.
38. Zverev E.A., Skeebe V.Y., Skeebe P.Y., Khlebova I.V. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 87(8), 082061, DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.

39. Skeebe V.Yu. Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83. (In Russian).

40. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. Investigation of the process of automatic control of current polarity reversal in the conditions of hybrid technology of electrochemical processing of corrosion-resistant steels. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15. (In Russian).

41. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Karlina A.I. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1255–1264. DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 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>).