

Исследование влияния параметров режима сварки трением с перемешиванием меди на механические свойства и электропроводность сварных соединений

© 2022

Атрощенко Валерий Владимирович^{1,3}, доктор технических наук, заведующий кафедрой современных методов сварки и контроля конструкций
Селиванов Алексей Сергеевич^{*2,4}, кандидат технических наук, начальник научно-технического отдела
Лобачев Владислав Сергеевич^{2,5}, инженер научно-технического отдела
Логачев Юрий Владимирович^{1,6}, магистрант
Садрисламов Артем Радифович^{1,7}, магистрант

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа (Россия)

²ООО «Аттестационный центр СваркаТехСервис», Уфа (Россия)

*E-mail: selivanov@naks-rb.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7145-7532>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9631-2102>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0615-5401>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4575-9670>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9528-3266>

Поступила в редакцию 27.04.2022

Принята к публикации 27.07.2022

Аннотация: Медь находит широкое применение при изготовлении токоведущих деталей, в основном электротехнических шин силового оборудования. Сварка меди традиционными способами осложняется высокой теплопроводностью, жидкотекучестью, значительным окислением при температуре плавления и склонностью к образованию трещин. Одним из путей решения проблем, возникающих при сварке меди, является применение способов сварки в твердой фазе, ярким представителем которых является сварка трением с перемешиванием (СТП). В работе проведены экспериментальные исследования влияния формы рабочей части инструмента и параметров режима сварки: скорости сварки, частоты вращения инструмента и угла наклона инструмента – на возможность возникновения дефектов в сварных соединениях пластин из меди марки М1 толщиной 5 мм, выполненных СТП. Приведены результаты механических испытаний на статическое растяжение и изгиб сварных соединений с туннельным дефектом и без него. Сварные соединения с туннельным дефектом показали снижение уровня механических свойств: величина временного сопротивления при растяжении ниже на 33 %, а относительного удлинения – на 8 %, чем у соединений без дефектов. Указан ряд факторов, влияющих на вероятность возникновения дефектов при СТП: скорость сварки, частота вращения инструмента, конструкция рабочей части инструмента, угол наклона инструмента, сила и глубина погружения, смещение пина, толщина заготовки и условия закрепления. Установлено, что применение инструмента с конической формой заплечика с вогнутой поверхностью позволяет получить сварные соединения без наружных и внутренних дефектов. На основании данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, были определены режимы сварки, позволяющие получать сварные соединения с величиной электрического сопротивления на уровне основного металла: частота вращения инструмента – 1250 об/мин, скорость сварки – 25 мм/мин, глубина погружения инструмента – не менее 0,41 мм.

Ключевые слова: СТП; сварка трением с перемешиванием; сварка меди; сварное соединение; механические свойства; электропроводность.

Для цитирования: Атрощенко В.В., Селиванов А.С., Лобачев В.С., Логачев Ю.В., Садрисламов А.Р. Исследование влияния параметров режима сварки трением с перемешиванием меди на механические свойства и электропроводность сварных соединений // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 3. С. 50–60. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-50-60.

ВВЕДЕНИЕ

Медь, благодаря высокой электро- и теплопроводности, пластичности, а также коррозионной стойкости, находит широкое применение при изготовлении токоведущих деталей, в основном электротехнических шин силового оборудования. Сварка меди традиционными способами осложняется высокой теплопроводностью, жидкотекучестью, значительным окислением при температуре плавления и склонностью к образованию трещин.

Одним из путей решения проблем, возникающих при сварке меди, является применение способов сварки в твердой фазе, ярким представителем которых является сварка трением с перемешиванием (СТП). К преимуществам СТП относят возможность получения сварных соединений с мелкозернистой структурой и малыми остаточными деформациями, сварки неметаллических, полимерных, композитных и разнородных материалов [1–3]. Основной недостаток данного процесса связан с высокой стоимостью оборудования, а также необходимостью обеспечения значительных

усилий для закрепления заготовок и высокоточного контроля и управления режимами сварки [4–6].

Технология СТП основана на возможности формирования сварного соединения за счет тепловой энергии, возникающей в результате сил трения инструмента и соединяемых заготовок [7]. В процессе сварки вращающийся инструмент полностью погружается в заготовку и обеспечивает осевое сжимающее усилие на зону перемешивания. Взаимодействие между инструментом и поверхностями заготовки создает большое количество тепла за счет трения, приводящее материал заготовок в вязко-текучее состояние, что обеспечивает равномерное обтекание пина инструмента. Происходит перемешивание материалов заготовок, и образуется требуемый сварной шов [8–10]. Схема процесса показана на рис. 1.

Параметры режима СТП оказывают существенное влияние на механические свойства сварных соединений меди. Исследование влияния скорости сварки на механические свойства соединений при сварке медных пластин толщиной 3 мм выполнялось при частоте вращения инструмента 600 об/мин на различных скоростях сварки в диапазоне от 25 до 200 мм/мин. С увеличением скорости сварки предел прочности на растяжение и относительное удлинение соединений сначала увеличивались, а затем уменьшались, при этом скорость сварки в диапазоне 25–150 мм/мин практически не влияла на свойства соединений. Разрушение соединений, полученных при указанных скоростях сварки, происходило по зонам термомеханического и термического влияния, а также по основному металлу [11; 12].

На оптимальных режимах сварки предел прочности при растяжении достигает 90 % прочности основного материала [2]. Важным показателем качества процесса СТП является температура в зоне сварки. В ходе экспериментальных исследований распределения температуры при сварке медных заготовок толщиной 3,1 мм установлено, что температура в зоне сварки для качественного формирования сварного соединения должна находиться в диапазоне от 460 до 530 °С. При этом из-

меряемая температура на стороне набегания оказалась несколько выше, чем на стороне отхода. По результатам механических испытаний прочность на растяжение и твердость сварного соединения составили около 60 % от основного металла. При поддержании температуры в указанном диапазоне в процессе сварки величина относительного удлинения сварных образцов может превышать аналогичный параметр основного металла в 3 раза [13].

Кроме режимов сварки на механические свойства соединений оказывают влияние условия теплоотвода от свариваемых заготовок. Для сравнения микроструктуры и механических свойств соединений, полученных с водяным охлаждением и без него, выполнялась сварка медных пластин толщиной 2 мм при частоте вращения инструмента 1600 об/мин и скоростях перемещения 50 и 100 мм/мин. При более низких частотах вращения и более высоких скоростях перемещения наблюдались туннельные дефекты и пустоты из-за недостаточных тепловыделения и скорости течения пластифицированного материала. При этом сварка с водяным охлаждением позволила получить более мелкую микроструктуру с увеличением показателей прочности и относительного удлинения. Механические свойства сварных соединений оказались выше, чем у основного металла, в отличие от соединений, полученных на воздухе при тех же параметрах режима [14].

В таблице 1 приведены рекомендуемые режимы СТП меди для соединений в диапазоне толщин от 2 до 6 мм [15]. При этом в литературных данных отсутствует информация о таких значимых параметрах, как глубина погружения и угол наклона инструмента. Кроме того, геометрические параметры инструмента также влияют на механические свойства сварных соединений меди. Установлено, что форма пина инструмента оказывает наибольшее влияние на течение пластифицированного материала, микроструктуру и механические свойства сварного шва. Результаты экспериментов показали, что надежные бездефектные соединения могут быть получены с использованием восьми различных

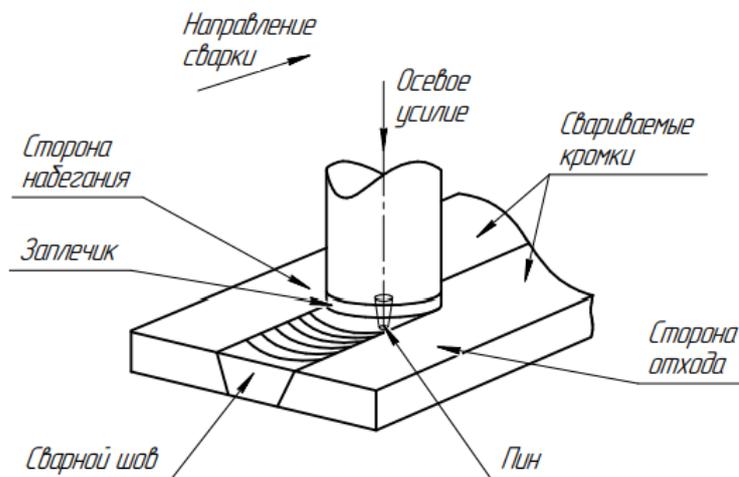


Рис. 1. Схема рабочего процесса сварки трением с перемешиванием
Fig. 1. The scheme of a working process of friction stir welding

Таблица 1. Рекомендуемые режимы сварки трением с перемешиванием меди [15]
 Table 1. Recommended FSW modes for copper [15]

Толщина свариваемых листов	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки, мм/мин
2	1600	50, 100
2	400–1150	200–800
3	900	40
3	400	100
3	600	25–150
3,1	800	30
3,1	900	50
4	1250	61
5	600, 900	25, 75
6	635	19

форм пина: конического, цилиндрического, конического с резьбой, цилиндрического с резьбой, треугольного, квадратного, пятиугольного и шестиугольного. В зависимости от применяемой формы пина инструмента, показатели механических свойств сварных соединений колебались на уровне 65–85 % от показателей основного металла. Было обнаружено, что соединения, выполненные с использованием квадратного профиля пина инструмента, позволили получить лучшие механические свойства по сравнению с другими формами инструмента [16].

При сварке образцов из технической чистой меди толщиной 4 мм использовались следующие режимы: частота вращения инструмента – 1250 об/мин, скорость сварки – 61 мм/мин, угол наклона инструмента составлял 3° [17]. По результатам испытаний прочность соединений составила около 87 % от прочности основного металла. Исследование микроструктуры сварного шва дефектов не выявило, при этом структура сварного шва значительно отличалась от структуры основного металла. В центральной области сварного шва наблюдалась мелкая и равномерная структура. Размер зерен зоны перемешивания составил примерно 100 мкм, в зоне термического влияния – 230 мкм при размере зерен основного металла 210 мкм. В зоне сварного шва образовалась небольшая область разупрочнения из-за меньшей плотности дислокаций по сравнению с основным металлом. Твердость основного металла составила 105–110 HV. Твердость зоны сварного шва имела переменное значение от 60 до 90 HV [17].

Неправильно выбранные параметры инструмента и режимы СТП приводят к различным дефектам сварных соединений: микро- и макротрещинам, порам, туннелям и др. [18].

Цель работы – определение влияния параметров режимов сварки и формы инструмента на механические свойства и электропроводность меди при получении бездефектных сварных соединений.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для практической реализации СТП меди использовался модернизированный консольно-фрезерный станок (рис. 2) с мощностью привода шпинделя 12 кВт. Контроль перемещений свариваемых деталей относительно инструмента осуществлялся с использованием устройства цифровой индикации и цифровых оптических линеек с точностью 0,005 мм.

Образцы для сварки изготавливались из листов меди марки М1 толщиной 5 мм, устанавливались и закреплялись в специализированной сварочной оснастке для сварки стыковых соединений. Глубина погружения инструмента контролировалась по величине погружения заплечика в свариваемые заготовки.

Эксперименты проводились на различных режимах сварки, приведенных в таблице 2. Наряду с изменением частоты вращения инструмента и скорости сварки устанавливались различные значения глубины погружения и угла наклона инструмента.

Образцы контролировались на наличие внутренних дефектов методом цифровой радиографии на программно-аппаратном комплексе «Цифракон».

Определение механических свойств сварных соединений выполнялось на образцах, сваренных с применением вводных и выводных планок. Это позволило исключить влияние краевых эффектов на результаты исследования.

Для испытаний на статическое растяжение использовалась испытательная машина ИР 6055-500-0. Испытания на статический изгиб проводились на прессе для гидравлических испытаний ПИ модификации П-50. Образцы испытывались швом наружу и швом внутрь.

Испытания на электросопротивление проводились с использованием микрометра МИКО-21 для высокоточных измерений электрического сопротивления постоянному току.



Рис. 2. Модернизированный консольно-фрезерный станок
Fig. 2. Upgraded bracket milling machine

Таблица 2. Режимы сварки трением с перемешиванием меди
Table 2. FSW modes for copper

№ режима сварки	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Глубина погружения, мм	Угол наклона инструмента, град.
1	900	40	0,31	1
2	900	40	0,305	2
3	900	40	0,315	3
4	1120	25	0,49	2
5	1120	25	0,415	2
6	1120	25	0,48	2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 3 и 4 представлены сварные соединения, полученные на различных режимах сварки. При контроле образцов, выполненных на режимах № 1–4 (таблица 2), обнаружен туннельный дефект (рис. 5). Анализ дефектов, выявленных при исследовании макроструктуры сварных соединений, показал, что размер туннельного дефекта зависит от угла наклона инструмента (α). При угле наклона инструмента $\alpha=2^\circ$ наблюдается наименьший по величине туннельный дефект.

На снимке образца, полученного с применением инструмента с плоским заплечиком (рис. 4 с), видно присутствие туннельного дефекта. На образце, полученном с использованием инструмента с конической формой заплечика с вогнутой поверхностью (рис. 4 d), туннельный дефект отсутствует.

На рис. 6 представлены микрошлифы образца без туннельного дефекта. Видно наличие мелкозернистой структуры в зоне перемешивания. Полученные результаты показывают, что применение рекомендуемых в литературных источниках режимов сварки без учета формы применяемого инструмента приводит к образованию туннельного дефекта.

Форма рабочей части инструмента в значительной степени влияет на вероятность появления дефектов в сварном шве. Применение инструмента с плоской формой заплечика приводит к формированию туннельного дефекта во всей области исследуемых режимов сварки. При этом переход от плоского заплечика к заплечику конической формы с вогнутой поверхностью обеспечивает формирование соединения меди без макродефектов.



Рис. 3. Внешний вид образцов, полученных на режимах № 1–3
Fig. 3. Visual appearance of specimens produced at the modes No. 1–3

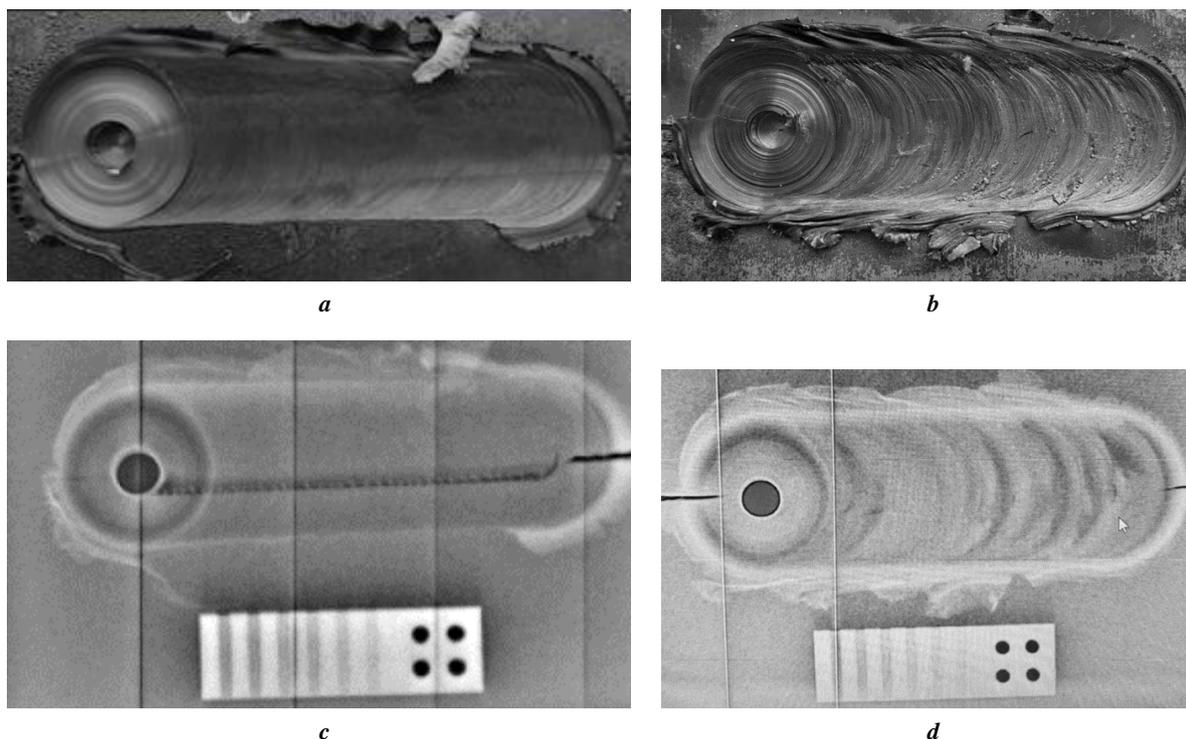


Рис. 4. Образцы, полученные на режимах № 4–5: **a, b** – внешний вид; **c, d** – цифровая радиография
Fig. 4. Specimens produced at the modes No. 4–5: **a, b** – visual appearance; **c, d** – digital radiography

С целью исключения краевых явлений образцы, используемые для проведения механических испытаний, изготавливались с применением вводных и выводных планок (рис. 7).

На рис. 8 показаны образцы после испытаний на статическое растяжение. Сравнение значений механических свойств сварных соединений и основного металла приведено в таблице 3.

На рис. 9 представлены образцы для испытаний на статический изгиб: на рис. 9 а, 9 б – сварной шов с туннельным дефектом, на рис. 9 с, 9 д – сварной шов без туннельного дефекта.

В ходе механических испытаний установлено, что величина временного сопротивления при растяжении образцов с туннельными дефектами ниже, чем у основного металла, на 24 %, а относительного удлинения – на 60 %.

При этом соединения без дефектов показали величину относительного удлинения выше, чем у основного металла, на 20 %, а величину временного сопротивления ниже на 17 %. Механические свойства сварного шва с туннельным дефектом значительно отличаются от свойств бездефектного сварного шва. Значение временного сопротивления при растяжении ниже на 33 %, а относительного удлинения – на 8 %, чем у шва без дефектов.

По результатам измерения электрического сопротивления сварного шва и зоны термического влияния среднее значение сопротивления составило 5,205 мкОм, а основного металла – 5,188 мкОм. Электрическое сопротивление не превышает 0,3 % сопротивления основного металла, что говорит о соответствии значений электропроводности основного металла и сварного соединения, полученного методом СТП.

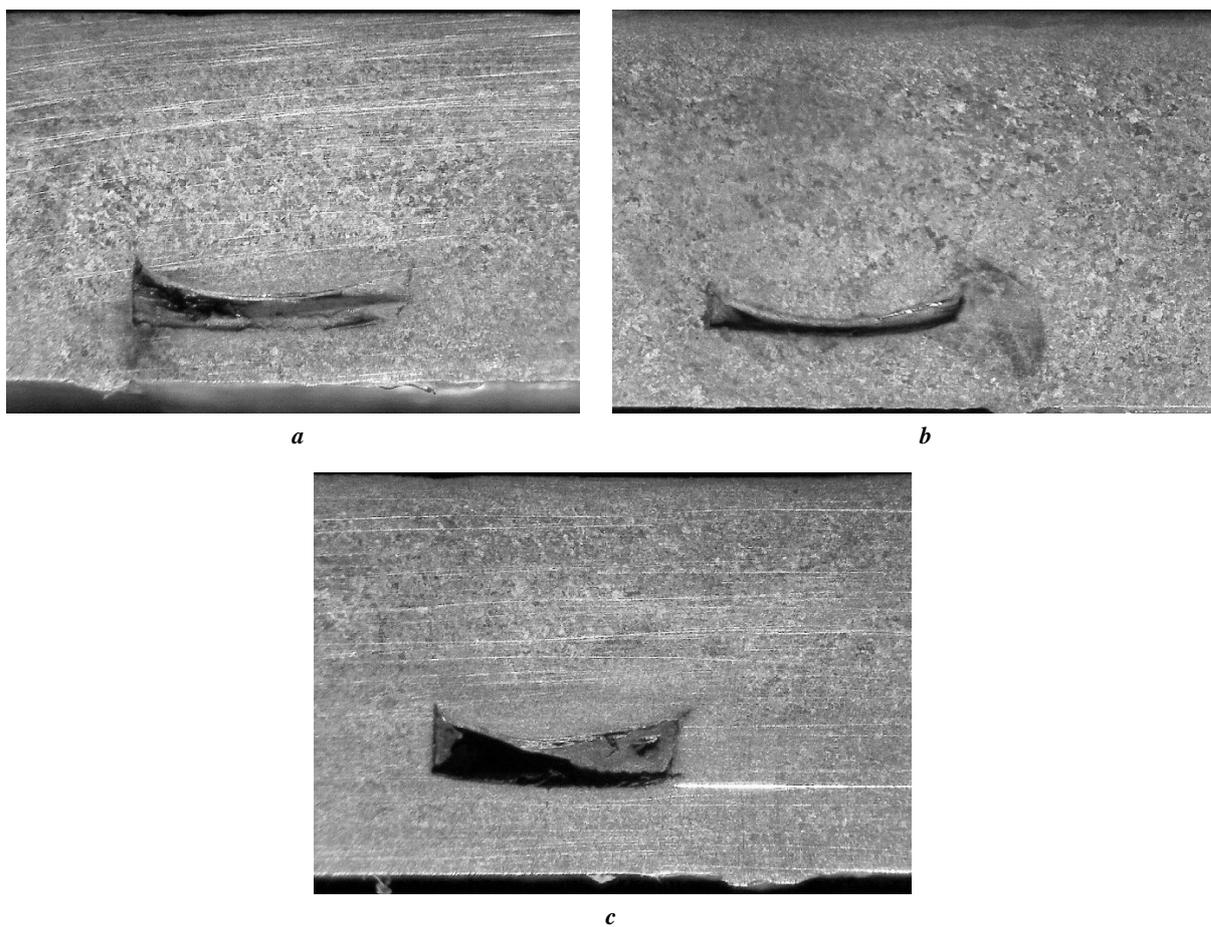


Рис. 5. Макрошлифы соединений при различных углах наклона инструмента:
a – $\alpha=1^\circ$; *b* – $\alpha=2^\circ$; *c* – $\alpha=3^\circ$
Fig. 5. Macrosections of joints at different dip angles of a tool:
a – $\alpha=1^\circ$; *b* – $\alpha=2^\circ$; *c* – $\alpha=3^\circ$

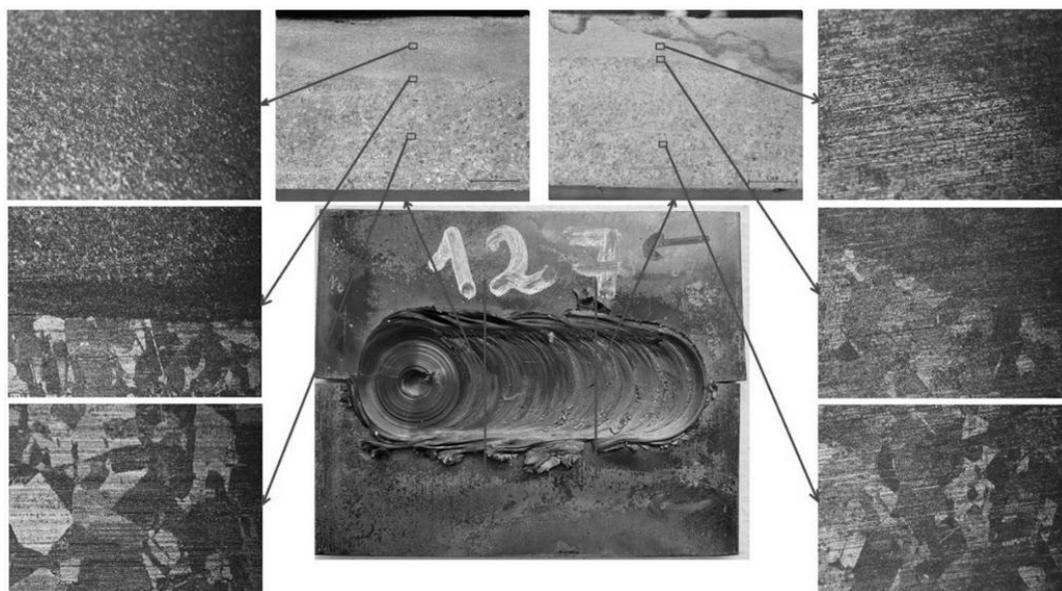


Рис. 6. Микрошлифы образца без туннельного дефекта
Fig. 6. Microslices of a specimen without a tunnel defect

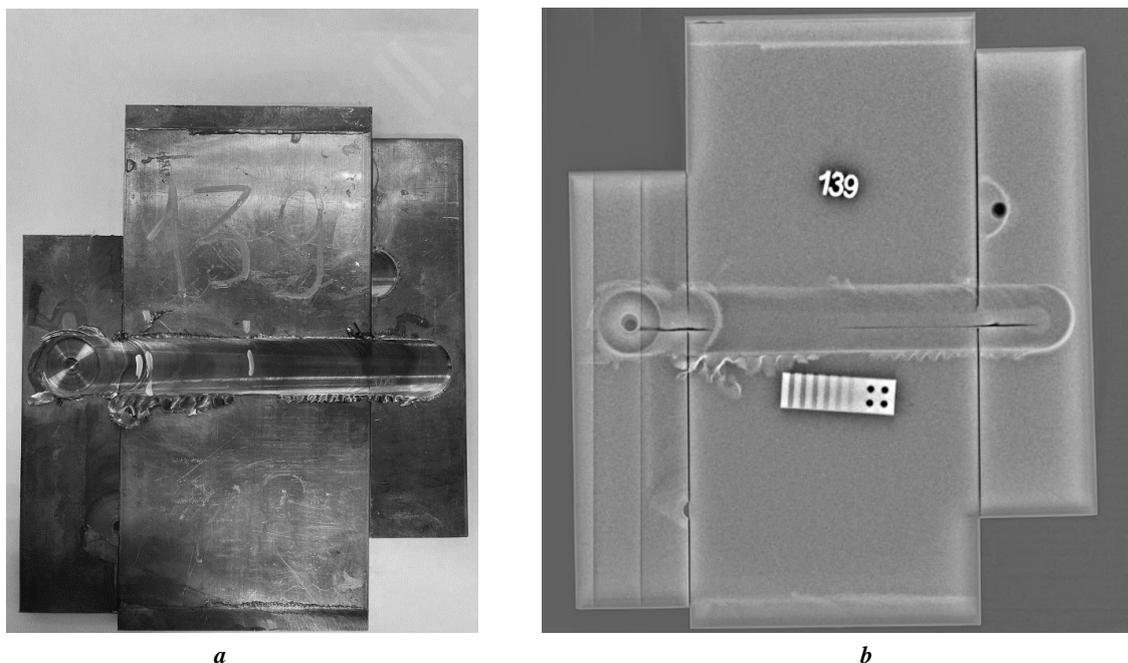


Рис. 7. Сварное соединение для механических испытаний: **a** – внешний вид; **b** – радиографический снимок
 Fig. 7. Welded joint for mechanical tests: **a** – visual appearance; **b** – radiograph

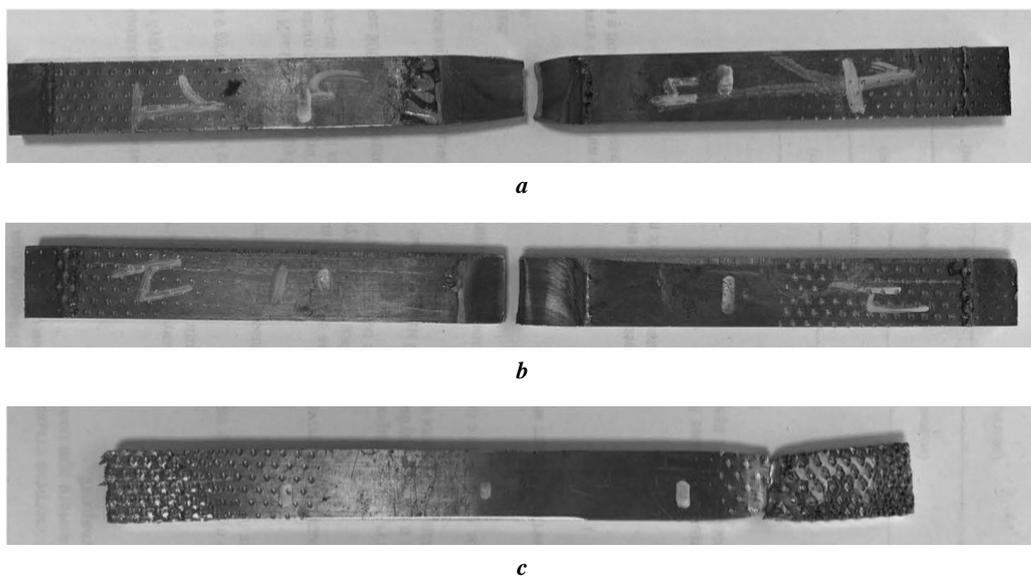


Рис. 8. Образцы после испытаний на статическое растяжение:
a – сварной шов без дефекта; **b** – сварной шов с дефектом; **c** – основной металл
 Fig. 8. Specimens after static tension tests:
a – welded joint without a defect; **b** – welded joint with a defect; **c** – parent metal

Таблица 3. Результаты механических испытаний
 Table 3. The results of mechanical tests

	σ_B , МПа	δ_{10} , %	Угол изгиба α
Сварной шов с дефектом	239,8	2,5	–
Сварной шов без дефекта	260	7,5	123°
Основной металл	313	6,25	–

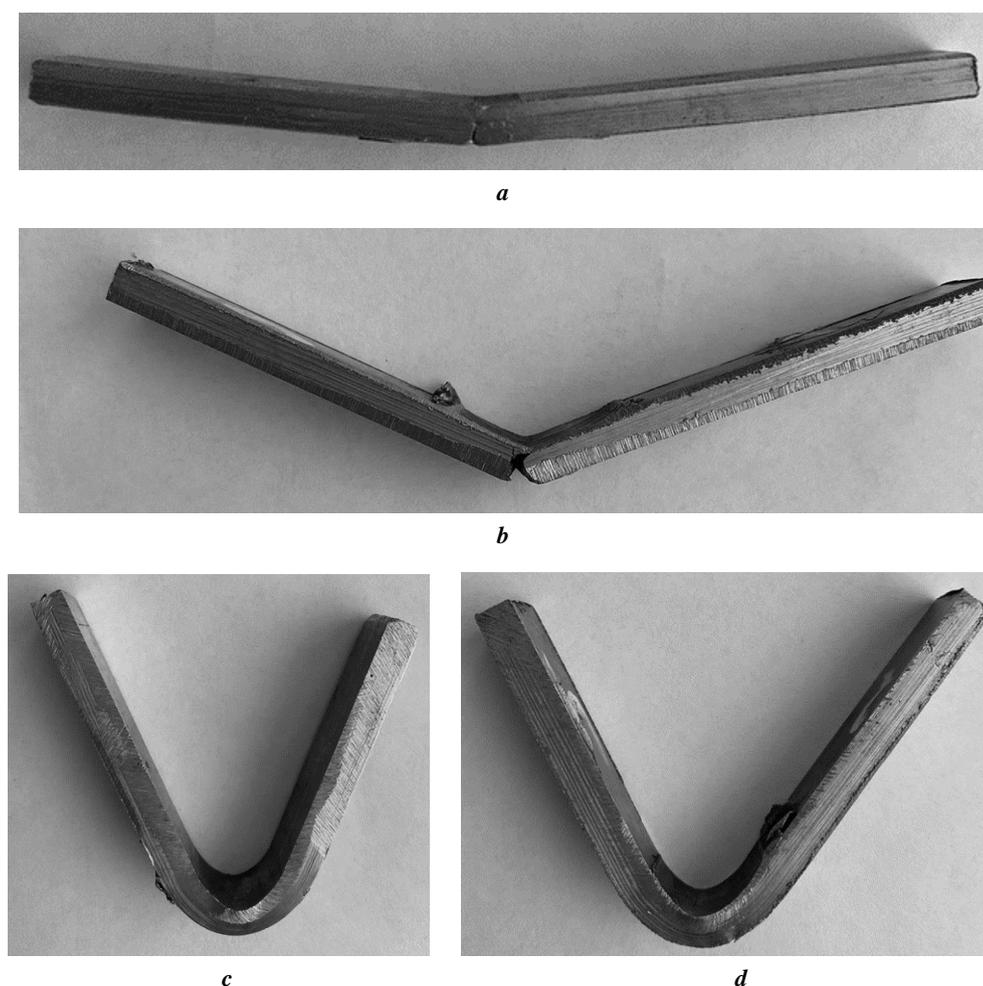


Рис. 9. Образцы после проведения испытаний на статический изгиб: *a, c* – швом наружу; *b, d* – швом внутрь
 Fig. 9. Specimens after static bending tests: *a, c* – seam out; *b, d* – seam in

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Образованию дефектов сварных соединений при СТП могут способствовать ряд важных факторов. К таким факторам относятся ошибочно выбранные параметры сварки: скорость сварки, частота вращения инструмента, конструкция рабочей части инструмента, угол наклона инструмента, сила и глубина погружения, смещение пина, толщина заготовки и условия закрепления. Таким образом, несоответствующие параметры сварки приводят к образованию пустот, туннелей и соединений с более низкой пластичностью, в то время как оптимальная скорость сварки, скорость движения инструмента и правильная конструкция инструмента обеспечивают более высокую прочность сварного соединения без дефектов. Более того, если в зоне перемешивания не выделяется достаточное количество тепла, это приводит к образованию таких дефектов, как туннель или полость [1; 3; 19; 20].

Образование туннельного дефекта на вводной и выводной планках, а также на начальном участке шва связано с недостаточной температурой свариваемых участков соединения [13], что обусловлено высокими теплопроводностью и теплоемкостью меди, а также значительными размерами свариваемых образцов для меха-

нических испытаний, по сравнению с образцами, свариваемыми ранее для поиска режимов сварки.

Результаты измерения электросопротивления показали, что отсутствие дефектов и мелкозернистая структура сварного соединения обеспечивают высокие значения электропроводности. Данный результат открывает широкие перспективы применения метода СТП для сварки электротехнических медных шин вместо широко используемых в настоящее время высокотратных болтовых соединений. Это обеспечит повышение надежности и снижение массогабаритных показателей выпускаемого силового оборудования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что применение инструмента с конической формой заплечика с вогнутой поверхностью для СТП меди позволяет получить сварные соединения без наружных и внутренних дефектов.

2. Механические свойства сварного соединения с туннельным дефектом значительно отличаются от бездефектного соединения. Значение временного сопротивления при растяжении ниже на 33 %, а относительного удлинения – на 8 %, чем у шва без дефектов.

3. Электропроводность сварного шва и околошов-ной зоны и основного металла отличаются незначи-тельно, увеличение электрического сопротивления не превышает 0,3 % относительно основного металла для образцов без туннельного дефекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Albannai A.I. Review the common defects in friction stir welding // *International journal of scientific and technology research*. 2020. Vol. 9. № 11. P. 318–329.
- Sahlot P., Singh A.K., Badheka V., Arora A. Friction stir welding of copper: numerical modeling and validation // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. № 5. P. 1339–1347. DOI: [10.1007/s12666-019-01629-9](https://doi.org/10.1007/s12666-019-01629-9).
- Singh V.P., Patel S.K., Ranjan A., Kuriachen B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium-magnesium alloys: a critical review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. № 3. P. 6217–6256. DOI: [10.1016/j.jmrt.2020.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.008).
- Heidarzadeh A., Paidar M., Güleriyüz G., Vatankhah Barenji R. Application of nanoindentation to evaluate the hardness and yield strength of brass joints produced by FSW: microstructural and strengthening mechanisms // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 20. № 2. Article number 41. DOI: [10.1007/s43452-020-00046-w](https://doi.org/10.1007/s43452-020-00046-w).
- Zhang H., Wang M., Zhu Z., Zhang X., Yu T., Yang G.X. Improving the structure-property of aluminum alloy friction stir weld by using a non-shoulderplunge welding tool // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87. № 1-4. P. 1095–1104. DOI: [10.1007/s00170-016-8599-z](https://doi.org/10.1007/s00170-016-8599-z).
- Akinlabi E.T., Mahamood R.M. Introduction to Friction Welding, Friction Stir Welding and Friction Stir Processing // *Solid-State Welding: Friction and Friction Stir Welding Processes*. Springer, 2020. P. 1–12. DOI: [10.1007/978-3-030-37015-2_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37015-2_1).
- Zhang Y., Cao X., Larose S., Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and processing // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2012. Vol. 51. № 3. P. 250–261. DOI: [10.1179/1879139512Y.0000000015](https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015).
- Rai R., De A., Bhadeshia H.K.D.H., DebRoy T. Review: Friction stir welding tools // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2011. Vol. 16. № 4. P. 325–342. DOI: [10.1179/1362171811Y.0000000023](https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023).
- Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // *Materials science and engineering*. 2005. Vol. 50. № 1-2. P. 1–78. DOI: [10.1016/j.mser.2005.07.001](https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001).
- Li X., Zhang Z., Peng Y., Yan D., Tan Z., Zhou Q., Wang K., Zhou M. Microstructure and mechanical properties of underwater friction stir welding of CNT/Al-Cu-Mg composites // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 18. P. 405–415. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.02.089](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.089).
- Singh G., Thakur A., Singh S., Sharma N. Friction stir welding of copper: Processing and multi-objective optimization // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2020. Vol. 27. № 3. P. 709–716.
- Shen J.J., Liu H.J., Cui F. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper // *Materials and Design*. 2010. Vol. 31. № 8. P. 3937–3942. DOI: [10.1016/j.matdes.2010.03.027](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.027).
- Hwang Y.M., Fan P.L., Lin C.H. Experimental study on Friction Stir Welding of copper metals // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. № 12. P. 1667–1672. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019).
- Farrokhi H., Heidarzadeh A., Saeid T. Frictions stir welding of copper under different welding parameters and media // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013. Vol. 18. № 8. P. 697–702. DOI: [10.1179/1362171813Y.0000000148](https://doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000148).
- Атрошенко В.В., Селиванов А.С., Логачёв Ю.В., Кагарманов Э.И., Сафиуллин П.Ш. Современное состояние и перспективы развития сварки изделий из меди трением с перемешиванием // *Сварка и диагностика*. 2021. № 2. С. 39–42. DOI: [10.52177/2071-5234_2021_02_39](https://doi.org/10.52177/2071-5234_2021_02_39).
- Kumar A., Raju L.S. Influence of tool pin profiles on friction stir welding of copper // *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. Vol. 27. № 12. P. 1414–1418. DOI: [10.1080/10426914.2012.689455](https://doi.org/10.1080/10426914.2012.689455).
- Lee W.-B., Jung S.-B. The joint properties of copper by friction stir welding // *Materials Letters*. 2004. Vol. 58. № 6. P. 1041–1046. DOI: [10.1016/j.matlet.2003.08.014](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.08.014).
- Asadi P., Mirzaei M., Akbari M. Modeling of pin shape effects in bobbin tool FSW // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2022. Vol. 5. № 2. P. 162–177. DOI: [10.1016/j.ijlmm.2021.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.12.001).
- Mehta K.P., Badheka V.J. A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants // *Materials and Manufacturing Processes*. 2016. Vol. 31. № 3. P. 233–254. DOI: [10.1080/10426914.2015.1025971](https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025971).
- Liua X.C., Sun Y.F., Nagira T., Ushioda K., Fujii H. Evaluation of dynamic development of grain structure during friction stir welding of pure copper using a quasi in situ method // *Journal of Materials Science and Technology*. 2019. Vol. 35. № 7. P. 1412–1421. DOI: [10.1016/j.jmst.2019.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.01.018).

REFERENCES

- Albannai A.I. Review the common defects in friction stir welding. *International journal of scientific and technology research*, 2020, vol. 9, no. 11, pp. 318–329.
- Sahlot P., Singh A.K., Badheka V., Arora A. Friction stir welding of copper: numerical modeling and validation. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2019, vol. 72, no. 5, pp. 1339–1347. DOI: [10.1007/s12666-019-01629-9](https://doi.org/10.1007/s12666-019-01629-9).
- Singh V.P., Patel S.K., Ranjan A., Kuriachen B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium-magnesium alloys: a critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 6217–6256. DOI: [10.1016/j.jmrt.2020.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.008).
- Heidarzadeh A., Paidar M., Güleriyüz G., Vatankhah Barenji R. Application of nanoindentation to evaluate the hardness and yield strength of brass joints produced by FSW: microstructural and strengthening mechanisms. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, article number 41. DOI: [10.1007/s43452-020-00046-w](https://doi.org/10.1007/s43452-020-00046-w).

5. Zhang H., Wang M., Zhu Z., Zhang X., Yu T., Yang G.X. Improving the structure-property of aluminum alloy friction stir weld by using a non-shoulderplunge welding tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 87, no. 1-4, pp. 1095–1104. DOI: [10.1007/s00170-016-8599-z](https://doi.org/10.1007/s00170-016-8599-z).
6. Akinlabi E.T., Mahamood R.M. Introduction to Friction Welding, Friction Stir Welding and Friction Stir Processing. *Solid-State Welding: Friction and Friction Stir Welding Processes*. Springer, 2020, pp. 1–12. DOI: [10.1007/978-3-030-37015-2_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37015-2_1).
7. Zhang Y., Cao X., Larose S., Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2012, vol. 51, no. 3, pp. 250–261. DOI: [10.1179/1879139512Y.0000000015](https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015).
8. Rai R., De A., Bhadeshia H.K.D.H., DebRoy T. Review: Friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, vol. 16, no. 4, pp. 325–342. DOI: [10.1179/1362171811Y.0000000023](https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023).
9. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials science and engineering*, 2005, vol. 50, no. 1-2, pp. 1–78. DOI: [10.1016/j.mser.2005.07.001](https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001).
10. Li X., Zhang Z., Peng Y., Yan D., Tan Z., Zhou Q., Wang K., Zhou M. Microstructure and mechanical properties of underwater friction stir welding of CNT/Al-Cu-Mg composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 18, pp. 405–415. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.02.089](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.089).
11. Singh G., Thakur A., Singh S., Sharma N. Friction stir welding of copper: Processing and multi-objective optimization. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 709–716.
12. Shen J.J., Liu H.J., Cui F. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, no. 8, pp. 3937–3942. DOI: [10.1016/j.matdes.2010.03.027](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.027).
13. Hwang Y.M., Fan P.L., Lin C.H. Experimental study on Friction Stir Welding of copper metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, no. 12, pp. 1667–1672. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019).
14. Farrokhi H., Heidarzadeh A., Saeid T. Frictions stir welding of copper under different welding parameters and media. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, vol. 18, no. 8, pp. 697–702. DOI: [10.1179/1362171813Y.0000000148](https://doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000148).
15. Atroshchenko V.V., Selivanov A.S., Logachev Yu.V., Kagarmenov E.I., Safiullin R.Sh. Current state and prospects for the development of friction stir welding of copper products. *Svarka i diagnostika*, 2021, no. 2, pp. 39–42. DOI: [10.52177/2071-5234_2021_02_39](https://doi.org/10.52177/2071-5234_2021_02_39).
16. Kumar A., Raju L.S. Influence of tool pin profiles on friction stir welding of copper. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, vol. 27, no. 12, pp. 1414–1418. DOI: [10.1080/10426914.2012.689455](https://doi.org/10.1080/10426914.2012.689455).
17. Lee W.-B., Jung S.-B. The joint properties of copper by friction stir welding. *Materials Letters*, 2004, vol. 58, no. 6, pp. 1041–1046. DOI: [10.1016/j.matlet.2003.08.014](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.08.014).
18. Asadi P., Mirzaei M., Akbari M. Modeling of pin shape effects in bobbin tool FSW. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 162–177. DOI: [10.1016/j.ijlmm.2021.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.12.001).
19. Mehta K.P., Badheka V.J. A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, vol. 31, no. 3, pp. 233–254. DOI: [10.1080/10426914.2015.1025971](https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025971).
20. Liua X.C., Sun Y.F., Nagira T., Ushioda K., Fujii H. Evaluation of dynamic development of grain structure during friction stir welding of pure copper using a quasi in situ method. *Journal of Materials Science and Technology*, 2019, vol. 35, no. 7, pp. 1412–1421. DOI: [10.1016/j.jmst.2019.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.01.018).

The study of the effect of parameters of the mode of copper friction stir welding on the mechanical properties and electrical conductivity of welded joints

© 2022

Valery V. Atroshchenko^{1,3}, Doctor of Sciences (Engineering),
Head of Chair of Modern Methods of Welding and Structural Control
Aleksey S. Selivanov^{*2,4}, PhD (Engineering), Head of Scientific and Technical Department
Vladislav S. Lobachev^{2,5}, engineer of Scientific and Technical Department
Yury V. Logachev^{1,6}, graduate student
Artyom R. Sadrislamov^{1,7}, graduate student

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa (Russia)

²Limited Liability Company “Attestation Center SvarkaTechService”, Ufa (Russia)

*E-mail: selivanov@naks-rb.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7145-7532>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9631-2102>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0615-5401>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4575-9670>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9528-3266>

Received 27.04.2022

Accepted 27.07.2022

Abstract: Copper is widely used when producing current-conducting parts, basically the electrotechnical power equipment buses. Traditional ways of welding copper become complicated because of high thermal conductivity, fluidity, significant oxidation at fusing temperature, and susceptibility. The application of the solid-phase welding methods, a prominent representative of which is friction stir welding (FSW), is one of the ways to solve problems when welding copper. The paper presents the experimental study of the influence of a tool working part shape and the welding mode parameters:

welding rate, tool rotation frequency, and tool dip angle – on the possibility of the appearance of defects in welded joints of M1 copper plates of 5 mm in thickness produced by FSW. The paper contains the results of mechanical tests on static tension and bending of welded joints with a tunnel defect and without it. Welded joints with a tunnel defect showed a decrease in mechanical properties level: the value of ultimate tensile strength at stretching is lower by 33 %, and the specific elongation is lower by 8 % than ones of a joint without defects. The authors specify some factors influencing the appearance of defects at FSW: the welding rate, tool rotation frequency, tool working part construction, tool dip angle, strength and depth of immersion, pin displacement, blank thickness, and grip conditions. The study identified that the application of a tool with a concave surface taper shoulder allows producing welded joints without external and internal defects. Based on data obtained during the experimental research, the authors determined the welding modes, which makes it possible to produce welded joints with the electrical resistance value at the level of a parent metal: tool rotation frequency is 1250 rpm, welding rate is 25 mm/min, and tool immersion depth is no less than 0.41 mm.

Keywords: FSW; friction stir welding; copper welding; welded joint; mechanical properties; electrical conductivity.

For citation: Atroshchenko V.V., Selivanov A.S., Lobachev V.S., Logachev Yu.V., Sadrislamov A.R. The study of the effect of parameters of the mode of copper friction stir welding on the mechanical properties and electrical conductivity of welded joints. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 3, pp. 50–60. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-50-60.