

УДК 621.658.512(035)

EDN: LFMBNL

*\*Харламов Ю. А., Денисова Н. А., Петров П. А., Орлов А. А.**Донбасский государственный технический университет**\*E-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com*

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТАДИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 4: СВАРИВАЕМОСТЬ МЕДНЫХ, НИКЕЛЕВЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ

*Статья продолжает рассмотрение вопросов технологичности сборных конструкций, получаемых сваркой трением с перемешиванием. В предыдущих частях рассматривалась свариваемость сплавов на основе алюминия, магния и титана, а также конструкционных сталей. Данная часть статьи посвящена рассмотрению свариваемости трением с перемешиванием сплавов на основе меди, никеля и других (специальных). Кратко рассмотрены области и перспективы применения этих сплавов. Показаны преимущества технологии сварки трением с перемешиванием по сравнению с традиционными и специальными методами сварки плавлением. Систематизирована опубликованная информация о толщине свариваемых заготовок, применяемом инструменте и основных параметрах режимов технологических процессов. Из специальных рассмотрены вопросы сварки трением с перемешиванием сплавов: никеля-меди, железа-никеля, меди-серебра-циркония, никеля-титана с памятью формы, высокоэнтропийных сплавов.*

**Ключевые слова:** *бездефектные соединения, дефекты сварки, инструмент для сварки трением с перемешиванием, подача, прочность, свариваемость сплавов, скорость вращения.*

Как уже отмечалось в предыдущих частях данной статьи, применение сварки трением с перемешиванием существенно расширяет технологические возможности получения сварных соединений с улучшенными свойствами, в том числе материалов, трудно поддающихся сварке традиционными способами. В свою очередь, это расширяет возможности создания высокотехнологичных сварных конструкций из более эффективных конструкционных материалов. В предыдущих частях статьи рассматривались вопросы свариваемости легких сплавов на основе алюминия, магния и титана, а также конструкционных сталей. Большой интерес представляют медь и ее сплавы. Технически чистая медь находит широкое применение в электротехнике, химической и других отраслях промышленности благодаря ее высоким электро- и теплопроводности, пластичности и пр. Также обширное значение и применимость имеют сплавы меди — латунь и бронза. Важнейшую роль при создании газотурбинных двигателей и других агрегатов,

работающих при высоких температурах, в атомном машиностроении и других отраслях играют сплавы на основе никеля. Наблюдается тенденция разработки, исследования и применения новых нетрадиционных металлических сплавов. Все эти сплавы уже применяются или имеют перспективы применения в сварных конструкциях, особенно с использованием технологий сварки трением с перемешиванием. Однако в настоящее время отсутствуют рекомендации по рациональному выбору основных материалов конструкций, получаемых сваркой трением с перемешиванием, в том числе таких распространенных сплавов на основе меди, никеля и других нетрадиционных сплавов.

**Цель данной статьи** заключается в обобщении результатов разработки и изучения технологических процессов сварки трением с перемешиванием деталей и заготовок из сплавов меди и никеля, а также специальных сплавов и подготовке рекомендаций для обеспечения технологичности проектируемых сварных конструкций.

### 1. Свариваемость меди и её сплавов.

**Свариваемость чистой меди.** Медь, благодаря высокой электро- и теплопроводности, пластичности, а также коррозионной стойкости, находит широкое применение при изготовлении токоведущих деталей, в основном электротехнических шин силового оборудования. Для меди сварка плавлением осложняется ее высокой теплопроводностью, жидкотекучестью, значительным окислением при температуре плавления и склонностью к образованию трещин. Сварка трением с перемешиванием (СТП) позволяет получать соединения меди с мелкозернистой структурой и малыми остаточными деформациями [1, 2]. Механические свойства соединений меди во многом зависят от параметров режима СТП. При СТП медных пластин толщиной 3 мм при частоте вращения инструмента 600 об/мин и увеличении скорости сварки от 25 до 200 мм/мин 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 [3, 4]. Разрушение соединений, полученных при указанных скоростях сварки, происходило по зонам термомеханического и термического влияния, а также по основному металлу [3, 4].

Температура в зоне сварки для формирования качественного соединения должна находиться в диапазоне 460...530 °С. При этом величина относительного удлинения может превышать аналогичный параметр основного металла в 3 раза [5]. Прочность на растяжение и твердость сварного соединения составили около 60 % от основного металла.

На механические свойства соединений оказывают влияние условия теплоотвода от свариваемых заготовок. При СТП медных пластин толщиной 2 мм с частотой вращения инструмента 1600 об/мин и со скоростями перемещения 50 и 100 мм/мин при более низких частотах вращения и более высоких скоростях перемещения наблюдались туннельные дефекты и пустоты из-за

недостаточных тепловыделений и скорости течения пластифицированного материала. СТП 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 [6].

Надежные бездефектные соединения могут быть получены с использованием различных 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. Соединения, выполненные с использованием квадратного профиля пина инструмента, имели лучшие механические свойства по сравнению с другими формами инструмента [7, 8].

Для СТП меди и её сплавов рекомендуется применять инструменты из стали Н13, жаропрочных никелевых сплавов, вольфрама и поликристаллического нитрида бора [9–11], а также комбинированные инструменты с пином из вольфрама и заплечиком из быстрорежущей стали [12].

При СТП технической чистой меди толщиной 4 мм при частоте вращения инструмента 1250 об/мин, скорости сварки 61 мм/мин, угле наклона инструмента 3° прочность соединений достигала ~87 % от прочности основного металла [13]. В центральной области шва наблюдалась мелкая и равномерная структура, размер зерен зоны перемешивания был ~100 мкм, в зоне термического влияния — 230 мкм при размере зерен основного металла 210 мкм. При твердости основного металла 105–110 HV сварной шов имел значение от 60 до 90 HV [13].

Отсутствие дефектов и мелкозернистая структура сварного соединения обеспечивают высокие значения электропроводности [13].

Получению соединения без наружных и внутренних дефектов способствует применение инструмента с конической формой заплечика с вогнутой поверхностью. В соединениях с туннельным дефектом показатель временного сопротивления при растяжении ниже на 33 %, а относительного удлинения — на 8 %, чем у шва без дефектов. Увеличение электрического сопротивления не превышает 0,3 % относительно основного металла (ОМ).

При СТП медных пластин толщиной 4 мм с помощью стального инструмента размер зерна в зоне перемешивания (ЗП) очень мелкий и равноосный по сравнению с основным металлом. Прочность соединений, полученных СТП, выше, чем при электроннолучевой и аргонодуговой сварке. Размер зерна в соединениях уменьшается с увеличением скорости вращения инструмента или с уменьшением скорости сварки [14].

**Свариваемость латуней.** Латунь (сплав Cu–Zn) обладает более высокими пластичностью, прочностью, твердостью и коррозионной стойкостью, чем чистая медь, поэтому широко применяется в качестве конструкционных материалов в промышленности. Традиционная сварка латуни плавлением имеет очевидные ограничения. Во время сварки плавлением испарение и плавление большого количества элемента Zn приводят к разрушению сварного соединения из-за более низкой температуры пара Zn (907 °C). В [15] успешно применяли СТП для сварки пластин латуни (Cu; 38 % Zn; 0,15 % Fe; 0,08 % Pb; 0,5 % Ni) при постоянной скорости перемещения 100 мм/мин и при скоростях вращения инструмента 400, 600, 800 и 1000 об/мин соответственно. Использовался инструмент с заплечиком диаметром 18 мм и цилиндрическим резьбовым пином диаметром 6 мм и длиной 4,7 мм. Угол наклона для всех сварных швов поддерживался на уровне 2,5°, а глубину погружения контролировали на уровне ~0,2 мм. ЗП состояла из частично и полностью перекристаллизованных областей. С увеличением скорости вращения доля нерекристал-

лизованных зерен уменьшалась, а размер рекристаллизованных зерен увеличивался. Значения твердости в ЗП были выше, чем в исходном материале. Увеличение скорости вращения не оказало заметного влияния на предел прочности и текучести сварных швов, но увеличило удлинение. Предел прочности и текучести сварных швов достигал 99 и 80 % от ОМ соответственно. Разрушение произошло в зоне термического влияния, имеющей наименьшую твердость. В [14] при СТП латуни испарения цинка и меди не обнаружено. Механические свойства соединения достигались аналогичные основному металлу. В микроструктуре в ЗП наблюдается меньшее количество пор по сравнению со сваркой плавлением [16–19].

В [20] СТП использовали для соединения пластин латуни (37 мас. % Zn и 63 мас. % Cu). Перед сваркой пластины были отожжены при температуре 50 °C в течение 1 часа. Для получения двухфазного сплава пластину нагревали при 810 °C в течение 70 минут, а затем закаливали в воде при комнатной температуре. Использовался инструмент с цилиндрическим заплечиком (диаметром 12 мм) и цилиндрическим пином (диаметром 3 мм и длиной 1,7 мм), изготовленным из инструментальной стали Н13. СТП проводили при скорости вращения инструмента 450 об/мин и скорости перемещения 100 мм/мин параллельно начальному направлению прокатки листов при комнатной температуре. Угол наклона инструмента относительно нормального направления поверхностей пластин сохранялся постоянным и составлял 2,5°. Предел прочности на растяжение получаемых соединений был выше по сравнению с основным металлом: для однофазных сплавов 335 МПа и 248 МПа соответственно; для двухфазных сплавов 394 МПа и 285 МПа соответственно. Относительное удлинение соединений было ниже, чем у основного металла: для однофазных сплавов 47 % и 68 % соответственно; для двухфазных сплавов 38 % и 52 % соответственно.

**Свариваемость бронзы.** В [21] при СТП литой никель-алюминиевой бронзы микротвердость зоны перемешивания и зоны термомеханического воздействия была выше, чем у основного металла. Поперечная прочность сварного соединения выше, чем у основного металла. Основным вклад в повышение механических свойств сплава вносят измельченные зерна в зоне сварочного ядра. Сварной шов без дефектов получали при использовании осевой нагрузки 16 кН, скорости сварки 60...80 мм/мин и скорости вращения 1400...1600 об/мин. Разрушение соединений с дефектами и без дефектов происходило в ЗТВ.

Сварка плавлением бериллиевой бронзы (сплавов бериллия и меди) затруднена из-за образования включений, дыр, пористости и растрескивания при затвердевании в ЗТВ. При лазерной сварке необходимо решение проблемы разбрызгивания и высокой пористости соединений. В [22] проводили СТП пластин бериллий-медного сплава «С17200» (1,9 % Be; 0,2 % Si; 0,2 % Al) толщиной 3 мм. Использовали инструмент из карбида вольфрама (WC) длиной 2,7 мм с полусферическим зондом (диаметр 6 мм) и вогнутым заплечиком (диаметр 15 мм). Сварку трением с перемешиванием проводили при скорости вращения инструмента 700 об/мин и скорости перемещения инструмента 60 мм/мин с угловым смещением 2 градуса в качестве стандартных условий. Бездефектные соединения получали при скорости вращения инструмента и скорости перемещения 700 об/мин и 60 мм/мин соответственно. Для получения прочных соединений с приемлемыми механическими свойствами необходима термообработка в течение 3–4 часов при температуре 315 °С.

**Свариваемость разнородных медных сплавов.** Разнородные медные соединения без дефектов могут быть легко получены СТП. Медь успешно соединяется с латуной и бронзами [23]. При СТП медных и латун-

ных сплавов смещение инструмента в сторону меди образует луковичную кольцеобразную зону, а при смещении инструмента в сторону латунного сплава эта зона не наблюдалась [24]. По сравнению с инструментом без смещения прочность на разрыв при смещении инструмента в сторону меди на 1 мм увеличилась на 33,33 %. При смещении инструмента на 1 мм в сторону латунного сплава прочность на разрыв увеличилась на 57,47 %, а прочность на изгиб увеличилась примерно на 5 % по сравнению с образцом без смещения. Наилучшие механические и микроструктурные свойства достигаются при смещении инструмента на 1 мм в сторону латунного сплава.

При СТП меди и латуни внахлест медь была выбрана в качестве выступающей стороны, а латунь — в качестве отступающей стороны [25]. В ЗП формировались слоистые луковичные кольца, постепенно исчезающие при увеличении сварочного теплового вложения. Механические свойства, в том числе прочность на растяжение-сдвиг и микротвердость, повышались при снижении погонной энергии при сварке. Максимальные предел прочности и микротвердость наблюдались при частоте вращения инструмента 450 об/мин и скорости 16 мм/мин<sup>-1</sup>. Имела место тенденция к хрупкому разрушению при больших сварочных тепловложениях.

**2. Свариваемость никелевых сплавов.** Суперсплавы на основе никеля отличаются высокой стойкостью к окислению и коррозии и применяются в экстремальных условиях высокого давления и температуры. Применение процессов сварки плавлением для этих сплавов затруднено большой зоной термического влияния (ЗТВ), снижением коррозионной стойкости соединений и ухудшением химических и механических свойств и пр. Это обусловило широкое развитие работ по сварке никелевых сплавов в твердой фазе. Состав основных видов никелевых сплавов приведен в таблице 1.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

Таблица 1

Никелевые сплавы

Марка сплава	Состав	Аналоги
201	Технически чистый никель (99,6 % Ni)	
600	>72,0 % Ni; 14–17 % Cr; 6–10 % Fe; Cu; Mn; ...	ХН60ВТ; ХН78Т
625	>58 % Ni; 20–30 % Cr; 8–10 % Mo; 3,15–4,15 % Nb; ...	ХН75МБТЮ
718	50–55 % Ni; 17–21 % Cr; 4,75–5,5 % Nb; 2,8–3,0 % Mo; Al; Cu; Ti; Co; Mn; Fe; ...	ХН45МВТЮБР
825	38–46 % Ni; 19,5–23,5 % Cr; 2,5–3,5 % Mo; 1,5–3,0 % Cu; 0,6–1,2 % Ti; >22 % Fe; ...	

Пластины сплава 201 (технически чистый никель) толщиной 3,2 мм были соединены встык с использованием инструмента заплечиком диаметром 16 мм [26]. Соединение представляло собой сварной шов с частичным проплавлением, чтобы избежать осложнений, связанных с приближением пина к опорной пластине. Предел текучести и предел прочности металла сварного шва составили 193 и 448 МПа соответственно по сравнению с 103 и 406 МПа для основного материала. Удлинение поперечного образца составило 34 % по сравнению с 50 % для основного материала.

Пластины из сплава 600 толщиной 6 мм сваривались встык с использованием инструмента из ПКНБ [26]. Скорость шпинделя составляла 450 об/мин, а скорость перемещения — 56 мм/мин. В зоне перемешивания наблюдалось существенное измельчение зерна. Механические свойства были превосходными. Предел текучести и предел прочности составили 370 и 720 МПа соответственно по сравнению с 265 и 630 МПа для основного металла. Удлинение сократилось с 50 % в основном металле до 27 % в поперечном сварном шве.

Пластины из сплава 718 толщиной 3,2 мм сваривались встык инструментом с диаметром заплечика 16 мм [26]. Скорость шпинделя составляла 500 об/мин, а скорость перемещения — 50 мм/мин. Получали прочные сварные швы при существенном измельчении зерна по сравнению с основным материалом. Предел текучести и предел прочности образцов поперечного сварного шва составили 670 и 985 МПа со-

ответственно. Значения текучести и прочности на разрыв составляют 460 и 895 МПа для сплава 718 в отожженном состоянии.

Соединения сплавов никеля, полученные СТП, не имеют дефектов по сравнению с соединениями, получаемыми при сварке плавлением [14]. Размеры зерен сварных швов при СТП уменьшаются до 85 % значений размеров зерен при сварке плавлением. Однако прочность на разрыв несколько ниже, чем у основного металла. Для СТП сплавов на основе никеля применяют инструменты, оснащенные ПКНБ, твердыми сплавами системы «карбид вольфрама — кобальт и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>» [27]. Результаты исследования СТП сплавов Инконель 600, 625 и 718 представлены в таблице 2. В большинстве получаемых СТП соединений достигнуто измельчение зерен, что обусловило улучшение их механических свойств [28–37]. По сравнению с СТП алюминиевых сплавов осевое усилие и скорость сварки сплавов на основе никеля были очень высокими, но скорость вращения была меньше. В большинстве исследований в качестве инструментального материала использовались WC-Co или ПКНБ.

Термическая обработка значительно повышает механические свойства никелевых сплавов, сваренных трением с перемешиванием. В таблице 3 представлены некоторые механические свойства соединений различных сплавов на основе никеля при сварке трением с перемешиванием.

Микротвердость в зоне перемешивания значительно выше по сравнению с микротвердостью основного металла.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

Таблица 2

Параметры, используемые при СТП сплавов на основе никеля

Сплав	Материал инструмента	Длина пина, мм	Диаметр заплечика, мм	Толщина пластины, мм	Осевая сила, кН	Скорость сварки, мм/мин	Скорость вращения, об/мин	Источник
600	pcBN	3	25	4,8	-	60	600	[28]
600	WC-Co	1,8	-	2	-	100	400	[29]
600	WC-Co	1,8	15	2	22,5	150-250	400	[30]
600	WC-Co	1	15	1	22,5	100	200	[31]
625	WC-Co	1,8	15	2	42,1	100	200	[32]
625	WC-Co	1,8	15	2	-	100	200	[33]
625	pcBN	3	25	3,2	50	100	200	[34]
625	pcBN	3	25	3,2	50	100	200	[35]
718	Si3N4	3,6	20	4	-	30-80	400	[36]
825	pcBN	2	14,3	2	-	75	2000	[37]

Таблица 3

Механические свойства никелевых сплавов при СТП

Марка сплава	Материал инструмента	Микротвердость		Предел прочности на растяжение		Источник
		Сварное соединение, (HV)	OM (HV)	Зона перемешивания (МПа)	OM (МПа)	
600	pcBN	-	-	620	600	[28]
600	WC-Co	180	170	740	690	[29]
600	WC-Co	185	165	680	640	[30]
600	WC-Co	235	190	-	-	[31]
600	WC-Co	200	185	718	698	[38]
625	WC-Co	360	245	1152	943	[33]
625	pcBN	302	270	-	-	[34]
625	pcBN	305	243	-	-	[35]
718	Si3N4	260	230	823	-	[36]
825	pcBN	320	165	-	708	[37]

Это происходит главным образом за счет измельчения зерен в зоне сварки трением с перемешиванием. Выделение наноразмерных частиц в зоне сварки также приводит к значительному улучшению механических свойств [37]. Большая часть изменений микроструктуры происходит в основном за счет рекристаллизации, образовавшейся в результате деформации. При испытаниях на растяжение соединений предварительно пластически деформированных сплавов разрушение происходит в основном металле, поскольку сварные швы, полученные СТП, имеют более высокие значения предела прочности.

В работе [39] показано, что СТП уменьшила склонность к межкристаллитной коррозии сплава 625 марки I, подвергнутого мягкому отжигу.

**3. Свариваемость специальных сплавов. Монель** — конструкционный сплав, основными составляющими которого являются никель (не менее 63 %) и медь (28...34 %). Обладает особыми характеристиками, такими как высокая прочность и хорошая ударная вязкость в широком диапазоне температур, высокая коррозионная стойкость в различных кислых и щелочных

средах. Монель привлекает большое внимание в морской и нефтехимической промышленности, поэтому спрос на сварку деталей из монеля растет. Сварка плавлением приводит к появлению таких дефектов соединений, как сегрегация, газовая и усадочная пористость, остаточные напряжения и т. д., что снижает конечные механические свойства.

В работе [40] методом СТП получены качественные соединения пластин сплава Монель 400 (около 67 % Ni–23 % Cu) толщиной 2 мм. Инструмент FSW был изготовлен из твердого сплава WC-Co и имел пин диаметром ~1,75 мм и заплечик диаметром 12 мм. Значения скорости вращения инструмента и скорости сварки составляли 900 об/мин и 25 мм/мин соответственно. Механические свойства в различных зонах сварных соединений представлены в таблице 4. Более высокими механическими свойствами соединений обладают сплавы в состоянии после прокатки.

Для соединения сплава Invar 36 разработан новый подход, названный сваркой трением с перемешиванием при большой нагрузке и низкой скорости [42]. Зона перемешивания характеризовалась средним размером зерен 0,7 мкм и большеугловыми

границами. В зернах также образовалось большое количество двойниковых границ. Механизм измельчения зерна объясняется сочетанием прерывистой динамической рекристаллизации и динамической рекристаллизации с помощью полос микросдвига. Было достигнуто хорошее сочетание прочности и пластичности Invar 36.

Два высокотемпературных штифтовых инструмента — один из ПКНБ, а другой из W–25 % Re — использовались для сварки трением с перемешиванием пластины из инвара (Fe–36 % Ni) толщиной 12,7 мм [43]. Качественные сварные швы были получены при скорости вращения 600 об/мин и скоростях перемещения 76, 102 и 127 мм/мин. Коэффициент теплового расширения, предел прочности и микротвердость сварных швов оказались практически неизменными по сравнению с основным материалом. Остаточное удлинение составило 52 % для основного материала и 30 и 37 % для сварных швов, выполненных с помощью обоих инструментов. Оба штифтовых инструмента давали сопоставимые сварные швы, но инструмент W-Re демонстрировал больший износ и оставлял небольшие остатки износа в сварном шве, особенно в месте погружения.

Таблица 4

Механические свойства сплава Монель 400 и его соединений при СТП

Состояние исходного материала	Механические свойства				
	Показатели	ОМ	ЗТВ	ЗТМВ	ЗП
После отжига	HV	172±5	162±4	194±4	177±5
	σ, МПа	194±7,5	171,5±8,1	253,4±6,3	215,9±4,2
После прокатки	HV	216±5	204±3	198±4	192±4
	σ, МПа	308,4±11,2	279,2±10,1	261,3±7,8	238,8±7,5

*Примечание.* Сплав Invar 36. Сплав Fe–36 % Ni (Invar 36) имеет аустенитную однофазную структуру и отличается уникальным низким значением коэффициента теплового расширения (КТР) при температуре Кюри. Применение способов сварки плавлением приводит к растрескиванию соединений, а при легировании присадочных материалов Ti, Mn и Mo увеличивает КТР сварных швов. При СТП пластин толщиной 3 мм получены бездефектные сварные швы [41]. Применяли опорные пластины из нержавеющей стали и инструмент из ПКНБ с выпуклым заплечиком с диаметром 15,3 мм и коническим пином; скорость сварки 2 мм/с, скорость вращения инструмента 600, 800 и 1000 об/мин. Сварные швы имели структуру однородного крупного аустенита. Сохранялось значение КТР, а механические свойства были немного ниже по сравнению с основным материалом.

**Сплав NARloy-Z** (Cu–3 wt. % Ag–0.5 wt. % Zr) обладает очень высокой теплопроводностью, но недостаточно высокими механическими свойствами при повышенных температурах. Пластины Narloy-Z (толщиной ~6 мм) были сварены с использованием установки ESAB SuperStir. Сварной шов выполнялся при 450 об/мин и скорости 100 мм/мин (4,0 дюйма/мин). Чистота поверхности полученного сварного шва оказалась превосходной. Видимого износа инструмента не было.

**Сплавы с памятью формы.** СТП может быть успешно использована для соединения эквивалентных никель-титановых (NiTi) сплавов с памятью формы толщиной 2 мм [44]. Сочетание вращения инструмента со скоростью 400 об/мин и скоростью перемещения 75 мм/мин позволило получить бездефектный сварной шов с максимальной эффективностью соединения 93 % при температуре окружающей среды и 84 % при повышенной температуре (125 °C). Микроструктура сварного шва представляла собой типичную зону перемешивания с мелкими зернами, сравнительно небольшую зону термомеханического воздействия и зону термического влияния. Однородная твердость по всей зоне сварного шва указывает на отсутствие в шве вредных выделений. Зона сварного шва показала сравнительно меньшую коррозионную стойкость, чем основной материал, из-за формирования менее плотного пассивного слоя TiO<sub>2</sub>.

ЗП имела значительную степень измельчения зерна со средним размером зерен 20,4±1,8 мкм, что намного меньше, чем зерна длиной 1 мм в основном металле. ЗТМВ в основном состояла из деформированных зерен, близких по размеру и напоминающих основной металл.

Разрушение произошло в ЗП как при температуре окружающей среды, так и при повышенной температуре. При температуре окружающей среды наблюдались микротрещины, перпендикулярные направлению растягивающей нагрузки, а при повы-

шенной температуре, при ступенчатом растягивающем нагружении, наблюдались микротрещины, перпендикулярные направлению нагрузки, и слияние трещин. Пластичность и эффективность соединения сопоставимы с наиболее широко используемым методом лазерной сварки.

При дополнительном воздействии лазером мощностью 50 Вт достигнута максимальная скорость СТП NiTi-сплавов 342 мм/мин [45].

**Высокоэнтропийные сплавы (ВЭА)** представляют собой новый класс конструкционных материалов [23, 46]. Они содержат минимум пять основных легирующих элементов. Элементы почти эквимольного состава, но кристаллизуются в виде одной фазы. Микроструктурная эволюция в результате СТП изучалась в сплавах CoFeNiCrMn, CoFeNiCrMo, AlCoCrFeNi, а также в сплавах FeMnCoCrSi на основе железа. В большинстве случаев в окончательной микроструктуре ЗП доминирует фаза ГЦК. Однако в сплавах на основе железа конечная микроструктура дополнительно включала незначительную часть фазы ГПУ. Обычно СТП приводит к резкому измельчению зерна, и это часто объясняется с точки зрения динамической рекристаллизации. Существует конкуренция между непрерывной и дискретной динамической рекристаллизацией. На эти процессы также может влиять износ инструмента для СТП. В сплавах FeMnCoCrSi на основе железа эволюция микроструктуры дополнительно осложняется обширными фазовыми превращениями.

Высокоэнтропийные сплавы открывают огромный потенциал для замены традиционных сплавов благодаря превосходному сочетанию свойств, например, для преодоления традиционного компромисса между прочностью и пластичностью или для достижения высокой прочности в сочетании с превосходной коррозионной стойкостью, даже превосходя Ni-сплавы в высокотемпературном применении [47]. Для обеспече-



ния возможности использования ВЭА в качестве функциональных или конструкционных материалов в реальных компонентах очень важно развивать работы по более детальным исследованиям их свариваемости.

#### Выводы:

1. Применение сварки трением с перемешиванием существенно расширяет возможности создания сварных конструкций из сплавов на основе меди и никеля, а также специальных сплавов, трудно свариваемых методами сварки плавлением. Более высокие механические свойства получаемых соединений позволяют снизить материалоемкость выпускаемых изделий из этих сплавов за счет уменьшения массы расчетных сечений.

2. Сварка сплавов на основе меди, никеля и специальных сплавов между собой в значительной мере может облегчить решение конструкторских задач при создании сложных изделий различного назначения.

3. Использование сварки трением с перемешиванием позволяет упростить конструкции изделий и узлов из сплавов меди и никеля, а также из специальных сплавов путем замены механических неразъемных соединений на сварные.

4. Разработка и освоение технологий сварки трением с перемешиванием деталей из сплавов меди и никеля и других металлов требует создания инструментов из материалов с более высокой теплостойкостью, прочностью и износостойкостью, обладающих достаточной стойкостью при сварке протяженных швов.

5. Из-за отсутствия доступной информации в литературе требуется дальнейшая работа по обобщению разработок и исследований сварки трением с перемешиванием сплавов меди и никеля и других специальных сплавов для создания общетехнических рекомендаций по выбору этих сплавов с учетом их свариваемости.

#### Список источников

1. Исследование влияния параметров режима сварки трением с перемешиванием меди на механические свойства и электропроводность сварных соединений / В. В. Апрощенко [и др.] // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 3. С. 50–60. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-50-60
2. Friction stir welding of copper: numerical modeling and validation / P. Sahlot, A. K. Singh, V. Badheka, A. Arora // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. № 5. P. 1339–1347. DOI: 10.1007/s12666-019-01629-9
3. Friction stir welding of copper: Processing and multi-objective optimization / G. Singh, A. Thakur, S. Singh, N. Sharma // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2020. Vol. 27. № 3. P. 709–716.
4. 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
5. 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
6. 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
7. Современное состояние и перспективы развития сварки изделий из меди трением с перемешиванием / В. В. Апрощенко [и др.] // *Сварка и диагностика*. 2021. № 2. С. 39–42. DOI: 10.52177/2071-5234\_2021\_02\_39
8. 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
9. Особенности формирования соединений при сварке трением с перемешиванием меди / А. С. Селиванов [и др.] // *Инновационное и цифровое машиностроение : материалы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства*

России» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа : УГАТУ, 2021. URL: [https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El\\_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf](https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf).

10. Nakata K. Friction stir welding of copper and copper alloys // *Welding International*. 2005. № 19 (12). P. 929–933.

11. Разработка сварочного инструмента и режимов сварки электротехнических шин из меди М1 способом сварки трением с перемешиванием / А. Л. Сотников [и др.] // *Сварочное производство*. 2023. № 6. С. 40–45. DOI: 10.34641/SP.2023.1063.6.051

12. Pashazadeh H., Teimournezhad J., Masoumi A. Numerical investigation on the mechanical, thermal, metallurgical and material flow characteristics in friction stir welding of copper sheets with experimental verification // *Materials and Design*. 2014. № 55. P. 619–632.

13. 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

14. Verma S. M., Misra J. P. A Critical Review of Friction Stir Welding Process // *DAAAM International Scientific Book*. Vienna, Austria : DAAAM International, 2015. Chapter 22. P. 249–266. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2015.22

15. Xie G. M., Ma Z. Y., Geng L. Effects of Friction Stir Welding Parameters on Microstructures and Mechanical Properties of Brass Joints // *The Japan Institute of Metals : Materials Transaction*. 2008. Vol. 49. № 7. P. 1698–1701.

16. Lee W., Jung, S. B. The joint properties of copper by friction stir welding // *Materials Letters*. 2004. № 58. P. 1041–1046.

17. Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behaviour of pure copper joints / H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, A. Heidarzadeh, E. Nazari // *Materials and Design*. 2012. № 35. P. 330–334.

18. Lin W. J., Chang H. C., Wu M. H. Comparison of mechanical properties of pure copper welded using friction stir welding and tungsten inert gas welding // *J. of Manufacturing Processes*. 2014. № 16. P. 296–304.

19. Meran C. The Joint Properties of Brass Plates by Friction Stir Welding // *Materials & Design*. 2006. № 27. P. 719–726.

20. Akbar Heidarzadeh, Tohid Saeid. On the effect of  $\beta$  phase on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded commercial brass alloys // *Data in Brief*. 2015. P. 1022–1025.

21. Effect of Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Cast Nickel Aluminum Bronze Alloy (C95800) / S. Siva, S. Sampathkumar, J. Sudha, R. M. Anirudh // *Materials Research*. 2018. № 21 (3) : e20170603. 13 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0603>

22. Lim Y., Lee K., Moon S. Effects of a Post-Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of a Friction-Stir-Welded Beryllium-Copper Alloy // *Metals*. 2019. № 9 (461). 14 p. DOI: 10.3390/met9040461

23. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution / A. Heidarzadeh [et al.] // *Progress in Materials Science*. 2021. № 117. 100752. 68 p.

24. Hamid Reza Sadeghi, Kamran Amini, Farhad Gharavi. Effect of tool offset on microstructure and mechanical properties of dissimilar copper-brass friction stir welding // *Metall. Res. Technol*. 2021. № 118. 307. 9 p.

25. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of friction stir-welded copper/brass dissimilar joints / Farhad Gharavi, Iman Ebrahimzadeh, Kamran Amini, Pourya Darya // *Materials Research Express*. 2018. № 5 (7). 076517. 19 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aacf20

26. Sorensen C. D., Nelson T. W. Friction Stir Welding of Ferrous and Nickel Alloys // *Friction Stir Welding and Processing*. 2007. 05112G. P.111–121.

27. Hari Venkit, Senthil Kumaran S. A review on friction stir welding of inconel alloys // *Journal of Critical Reviews*. 2020. Vol. 7. Iss. 19. P. 4361–4371.

28. Optimizational study of friction welding of steel tube to aluminum tube plate using an external tool process / C. V. Kumar, S. Muthukumaran, A. Pradeep, K. S.Senthil // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2011. Vol. 6–2. P. 300–306.

29. Ye F., Fujii H., Tsumura T. Friction stir welding of Inconel alloy 600 // *J. Mater. Sci.* 2006. Vol. 41 (16). P. 5376–5379.
30. Song K. H., Nakata K. Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of friction stir welded Inconel 600 // *Mater. Design.* 2009. Vol. 30 (10). P. 3972–3978.
31. Song K., Chung Y., Nakata K. Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Jointed Inconel 600/SS 400 // *Metals and Materials International.* 2012. Vol. 35. P. 126–132.
32. Song K. H., Nakata K. Effect of precipitation on post heat-treated Inconel 625 alloy after friction stir welding // *Mater. Design.* 2010. Vol. 31 (6). P. 2942–2947.
33. Song K. H., Nakata K. Mechanical properties of friction stir welded Inconel 625 alloy // *Mater. Trans.* 2009. Vol. 50 (10). P. 2498–2501.
34. Senthil Kumaran S., Muthukumaran S., Chandrasekhar R. C. Suitability of friction welding of tube to tube plate using an external tool process for different tube diameters // *A study. Experimental Techniques.* 2013. Vol. 37 (6). P. 8–14.
35. Lemos G. V. B., Farina A. B., Martinazzi D. O efeito da velocidade de rotação da ferramenta na soldagem por fricção e mistura mecânica da liga inconel 625 // *ABM Week : 71º Congresso Anual ABM, Rio de Janeiro.* 2016. DOI: 10.5151/1516-392X-28078
36. Ahmed M. M. Z., Wynne B. P., Martin J. P. Effect of friction stir welding speed on mechanical properties and microstructure of nickel based super alloy Inconel 718 // *Sci. Technol. Weld. Join.* 2013. Vol. 18 (8). P. 680–687.
37. Das H., Mondal M., Hong S. T., Lee J. W., Cho H. H. Texture and precipitation behavior of friction stir welded Inconel 825 alloy // *Materials Today Communications.* 2020. № 25 (5) :101295.
38. Song K. H., Tsumura T., Nakata K. Development of microstructure and mechanical properties in laser-FSW hybrid welded Inconel 600 // *Mater. Trans.* 2009. Vol. 50 (7). P. 1832–1837.
39. Mitigating the susceptibility to intergranular corrosion of alloy 625 by friction-stir welding / Guilherme Vieira Braga Lemos [et al.] // *Scientific Reports.* 2022. № 12 : 3482. 10 p.
40. High-resolution EBSD characterisation of friction stir welded nickel-copper alloy: effect of the initial microstructure on microstructural evolution and mechanical properties / Heidarzadeh A., Ali Chabok, Reza Taherzadeh Mousavian, Yutao Pei // *Philosophical Magazine.* 2020. № 100 : 3. P. 337–352. DOI: 10.1080/14786435.2019.1680889
41. Microstructure and properties of friction stir welded high strength Fe–36 wt%Ni Alloy / Yue Zh., Yutaka S. S., Kokawa H., Wu A. // *Materials Science and Engineering A.* 2011. № 528. P. 7768–7773.
42. Nan Xu, Qining Song, Ye-feng Bao. Microstructure and mechanical properties' modification of friction stir welded Invar 36 alloy joint // *Science and Technology of Welding and Joining.* 2019. № 24 : 1. P. 79–82. DOI: 10.1080/13621718.2018.1490104
43. Jasthi B. K., Arbegast W. J., Howard S. M. Thermal Expansion Coefficient and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Invar (Fe-36%Ni) // *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2009. № 18. P. 925–934. DOI: 10.1007/s11665-008-9320-7
44. Part I: Friction stir welding of equiatomic nickel titanium shape memory alloy — microstructure, mechanical and corrosion behavior / Parker W. [et al.] // *Journal of Advanced Joining Processes.* 2021. № 4. 100071. 18 p. DOI: 10.1016/j.jajp.2021.100071
45. Mani Prabu S. S., Palani I. A. Investigations on the actuation behaviour of friction stir-welded nickel titanium shape memory alloy using continuous fibre laser // *Journal of Micromanufacturing.* 2022. № 5 (2). P. 137–143. DOI: 10.1177/25165984211015409
46. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / З. Б. Батаева [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* 2021. Т. 23. № 2. С. 116–146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146
47. Richter T., Schroepfer D., Rhode M. Residual Stresses in a High- and a Medium-Entropy Alloy due to TIG and Friction Stir Welding // *J. Manuf. Mater. Process.* 2022. № 6. 147. 11 p. DOI: 10.3390/jmmp6060147

*Рекомендована к печати к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М., д.т.н., проф., каф. МОЗЧМ им. профессора В. Я. Седуша ДонНТУ Сотниковым А. Л.*

Статья поступила в редакцию 20.03.2024.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Харламов Юрий Александрович**, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

**Денисова Наталья Анатольевна**, канд. техн. наук, заведующий каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: Natdeny@yandex.ru

**Петров Павел Александрович**, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: ravelpetrov@list.ru

**Орлов Андрей Андреевич**, ассистент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru

**\*Kharlamov Yu. A., Denisova N. A., Petrov P. A., Orlov A. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, \*e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com)

#### **ENSURING MANUFACTURABILITY OF STRUCTURES DURING FRICTION STIR WELDING AT THE MATERIALS SELECTION STAGE. PART 4: WELDABILITY OF COPPER, NICKEL AND SUPERALLOYS**

*This article continuously discussing the manufacturability of composite structures produced by friction stir welding. Previous parts covered the weldability of aluminium, magnesium, titanium-based alloys, and structural steels. This part of the article focuses on the friction stir weldability of copper, nickel, and other (special) alloys. There have been briefly reviewed the areas and potential applications of this alloys. The advantages of friction stir welding technology are compared to traditional and special fusion welding methods. The published information on the thickness of welded workpieces, applied tools, and basic parameters of technological process regimes is systematized. The issues of friction stir welding with alloys: nickel-copper, iron-nickel, copper-silver-zirconium, nickel-titanium with shape memory, high-entropy alloys are considered among the special ones.*

**Key words:** proper joints, welding defects, tool for friction stir welding, feeding, durability, weldability of alloys, rate of rotation.

#### References

1. Antroshchenko V. V. [et al.]. Investigation of the influence of friction stir welding parameters on the mechanical properties and electrical conductivity of welded joints [Issledovanie vliyaniya parametrov rezhima svarki treniem s peremeshivaniem medi na mekhanicheskie svoystva i elektroprovodnost' svarnykh soedinenij]. *Frontier Materials & Technologies*. 2022. No. 3. Pp. 50–60. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-50-60 (rus)

2. 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
3. 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.
4. 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
5. 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
6. 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
7. Antroshchenko V. V. [et al.]. Current state and prospects of development of friction stir welding of copper products [Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya svarki izdelij iz medi treniem s peremeshivaniem]. *Welding and Diagnostics*. 2021. No. 2. Pp. 39-42. DOI: 10.52177/2071-5234\_2021\_02\_39
8. 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
9. Selivanov A. S. [et al.]. Peculiarities of joint formation at friction stir welding of copper [Osobennosti formirovaniya soedinenii pri svarke treniem s peremeshivaniem medi]. *Innovacionnoe i cifrovoe mashinostroenie: materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Stankostroenie i cifrovoe mashinostroenie», Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya svarochnogo proizvodstva Rossii»*. Ufa : USATU. 2021. URL: [https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El\\_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf](https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf).
10. Nakata K. Friction stir welding of copper and copper alloys. *Welding International*. 2005. No. 19 (12). Pp. 929–933.
11. Sotnikov A. L. [et al.]. Development of welding tools and welding modes for M1 copper electrical busbars by friction stir welding method [Razrabotka svarochnogo instrumenta i rezhimov svarki elektrotehnicheskikh shin iz medi M1 sposobom svarki treniem s peremeshivaniem]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2023. No. 6. Pp. 40–45. DOI: 10.34641/SP.2023.1063.6.051
12. Pashazadeh H., Teimournezhad J., Masoumi A. Numerical investigation on the mechanical, thermal, metallurgical and material flow characteristics in friction stir welding of copper sheets with experimental verification. *Materials and Design*. 2014. No. 55. Pp. 619–632.
13. 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
14. Verma S. M., Misra J. P. A Critical Review of Friction Stir Welding Process. *DAAAM International Scientific Book*. Vienna, Austria : DAAAM International. 2015. Chapter 22. Pp. 249–266. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2015.22
15. Xie G. M., Ma Z. Y., Geng L. Effects of Friction Stir Welding Parameters on Microstructures and Mechanical Properties of Brass Joints. *The Japan Institute of Metals : Materials Transaction*. 2008. Vol. 49. No.7. Pp. 1698–1701.
16. Lee W., Jung S. B. The joint properties of copper by friction stir welding. *Materials Letters*. 2004. No. 58. Pp. 1041–1046.
17. Khodaverdizadeh H., Mahmoudi A., Heidarzadeh A., Nazari E. Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behaviour of pure copper joints. *Materials and Design*. 2012. No. 35. Pp. 330–334.
18. Lin W. J., Chang H. C., Wu M. H. Comparison of mechanical properties of pure copper welded using friction stir welding and tungsten inert gas welding. *J. of Manufacturing Processes*. 2014. No. 16. Pp. 296–304.

19. Meran C. *The Joint Properties of Brass Plates by Friction Stir Welding*. *Materials & Design*. 2006. No. 27. Pp. 719–726.
20. Akbar Heidarzadeh, Tohid Saeid. *On the effect of  $\beta$  phase on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded commercial brass alloys*. *Data in Brief*. 2015. Pp. 1022–1025.
21. Siva S., Sampathkumar S., Sudha J., Anirudh R. M. *Effect of Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Cast Nickel Aluminum Bronze Alloy (C95800)*. *Materials Research*. 2018. No. 21 (3) : e20170603. 13 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0603>
22. Lim Y., Lee K., Moon S. *Effects of a Post-Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of a Friction-Stir-Welded Beryllium-Copper Alloy*. *Metals*. 2019. No. 9 (461). 14 p. DOI: 10.3390/met9040461
23. Heidarzadeh A. [et al.] *Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution*. *Progress in Materials Science*. 2021. No. 117. 100752. 68 p.
24. Hamid Reza Sadeghi, Kamran Amini, Farhad Gharavi. *Effect of tool offset on microstructure and mechanical properties of dissimilar copper-brass friction stir welding*. *Metall. Res. Technol*. 2021. No. 118. 307. 9 p.
25. Farhad Gharavi, Iman Ebrahimzadeh, Kamran Amini, Pourya Darya. *Evaluation of the microstructure and mechanical properties of friction stir-welded copper/brass dissimilar joints*. *Materials Research Express*. 2018. No. 5 (7). 076517. 19 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aacf20
26. Sorensen C. D., Nelson T. W. *Friction Stir Welding of Ferrous and Nickel Alloys*. *Friction Stir Welding and Processing*. 2007. 05112G. Pp. 111–121.
27. Hari Venkit, Senthil Kumaran S. *A review on friction stir welding of inconel alloys*. *Journal of Critical Reviews*. 2020. Vol. 7. Iss. 19. Pp. 4361–4371.
28. Kumar C. V., Muthukumaran S., Pradeep A., Senthil K. S. *Optimization study of friction welding of steel tube to aluminum tube plate using an external tool process*. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2011. Vol. 6–2. Pp. 300–306.
29. Ye F., Fujii H., Tsumura T. *Friction stir welding of Inconel alloy 600*. *J. Mater. Sci*. 2006. Vol. 41 (16). Pp. 5376–5379.
30. Song K. H., Nakata K. *Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of friction stir welded Inconel 600*. *Mater. Design*. 2009. Vol. 30 (10). Pp. 3972–3978.
31. Song K., Chung Y., Nakata K. *Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Jointed Inconel 600/SS 400*. *Metals and Materials International*. 2012. Vol. 35. Pp. 126–132.
32. Song K. H., Nakata K. *Effect of precipitation on post heat-treated Inconel 625 alloy after friction stir welding*. *Mater. Design*. 2010. Vol. 31 (6). Pp. 2942–2947.
33. Song K. H., Nakata K. *Mechanical properties of friction stir welded Inconel 625 alloy*. *Mater. Trans*. 2009. Vol. 50 (10). Pp. 2498–2501.
34. Senthil Kumaran S., Muthukumaran S., Chandrasekhar R. C. *Suitability of friction welding of tube to tube plate using an external tool process for different tube diameters. A study*. *Experimental Techniques*. 2013. Vol. 37 (6). Pp. 8–14.
35. Lemos G. V. B., Farina A. B., Martinazzi D. *O efeito da velocidade de rotação da ferramenta na soldagem por fricção e mistura mecânica da liga inconel 625*. *ABM Week : 71º Congresso Anual ABM*. Rio de Janeiro. 2016. DOI: 10.5151/1516-392X-28078
36. Ahmed M. M. Z., Wynne B. P., Martin J. P. *Effect of friction stir welding speed on mechanical properties and microstructure of nickel based super alloy Inconel 718*. *Sci Technol Weld Join*. 2013. Vol. 18 (8). Pp. 680–687.
37. Das H., Mondal M., Hong S. T., Lee J. W., Cho H. H. *Texture and precipitation behavior of friction stir welded Inconel 825 alloy*. *Materials Today Communications*. 2020. No. 25 (5) :101295.
38. Song K. H., Tsumura T., Nakata K. *Development of microstructure and mechanical properties in laser-FSW hybrid welded Inconel 600*. *Mater. Trans*. 2009. Vol. 50 (7). Pp. 1832–1837.
39. Guilherme Vieira Braga Lemos [et al.]. *Mitigating the susceptibility to intergranular corrosion of alloy 625 by friction-stir welding*. *Scientific Reports*. 2022. No. 12 : 3482. 10 p.

40. Heidarzadeh A., Ali Chabok, Reza Taherzadeh Mousavian, Yutao Pei. High-resolution EBSD characterisation of friction stir welded nickel-copper alloy: effect of the initial microstructure on microstructural evolution and mechanical properties. *Philosophical Magazine*. 2020. No. 100 : 3. Pp. 337–352. DOI: 10.1080/14786435.2019.1680889
41. Yue Zh., Yutaka S. S., Kokawa H., Wu A. Microstructure and properties of friction stir welded high strength Fe–36 wt%Ni Alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2011. No. 528. Pp. 7768–7773.
42. Nan Xu, Qining Song, Ye-feng Bao. Microstructure and mechanical properties' modification of friction stir welded Invar 36 alloy joint. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2019. No. 24 : 1. Pp. 79–82. DOI: 10.1080/13621718.2018.1490104
43. Jasthi B. K., Arbegast W. J., Howard S. M. Thermal Expansion Coefficient and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Invar (Fe-36%Ni). *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009. No. 18. Pp. 925–934. DOI: 10.1007/s11665-008-9320-7
44. Parker W. [et al.]. Part I: Friction stir welding of equiatomic nickel titanium shape memory alloy — microstructure, mechanical and corrosion behavior. *Journal of Advanced Joining Processes*. 2021. No. 4. 100071. 18 p. DOI: 10.1016/j.jajp.2021.100071
45. Mani Prabu S. S., Palani I. A. Investigations on the actuation behaviour of friction stir-welded nickel titanium shape memory alloy using continuous fibre laser. *Journal of Micromanufacturing*. 2022. No. 5 (2). Pp. 137–143. DOI: 10.1177/25165984211015409
46. Bataeva Z. B. Review of research on alloys developed using the entropy approach [Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода] *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2021. Vol. 23. No. 2. Pp. 116–146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146
47. Richter T., Schroepfer D., Rhode M. Residual Stresses in a High- and a Medium-Entropy Alloy due to TIG and Friction Stir Welding. *J. Manuf. Mater. Process*. 2022. No. 6. 147. 11 p. DOI: 10.3390/jmmp6060147

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Kharlamov Yuri Aleksandrovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines  
Donbass State Technical University  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,  
e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

**Denisova Natalia Anatolievna**, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Metallurgical Complex Machines  
Donbass State Technical University  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

**Petrov Pavel Aleksandrovich**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines  
Donbass State Technical University  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,  
e-mail: pavelpetrov@list.ru

**Orlov Andrei Andreievich**, Assistant Lecturer of the Department of Metallurgical Complex Machines  
Donbass State Technical University  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,  
e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru