

УДК 539.388.2

Изменение структуры и механических свойств при многопроходной фрикционной перемешивающей обработке медного сплава БрАМц9-2*

А.М. Черемнов, А.В. Чумаевский, Е.О. Княжев, Т.А. Калашишникова, Е.А. Колубаев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

Effect of Multipass Friction Stir Processing on Structure and Mechanical Properties of CuAl9Mn2 Copper Alloy

A.M. Cheremnov, A.V. Chumaevskii, E.O. Knyazhev, T.A. Kalashnikova, E.A. Kolubaev

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (Tomsk, Russia)

Проведены исследования структуры и механических свойств медного сплава БрАМц9-2 после фрикционной перемешивающей обработки. В качестве заготовок использовались пластины толщиной 2 мм, которые были подвергнуты фрикционной перемешивающей обработке от одного до четырех проходов при одинаковых режимах. Зона перемешивания демонстрирует структуру, образованную потоком материала по контуру инструмента. Размер зерна основного металла до обработки составлял 80–140 мкм. После первичной обработки структура зоны перемешивания неоднородна, зерна изменяются от равноосных до вытянутых в направлении движения материала, размер зерна уменьшается до 3–8 мкм относительно основного металла. После четвертого прохода зона перемешивания становится более однородной, зерна имеют форму, близкую к равноосной, а их размер уменьшается до 2–6 мкм. Температура процесса, механическое перемешивание и измельчение зерен приводит к повышению микротвердости и прочностных свойств материала. Предел прочности увеличивается на 13 % относительно основного металла как для одного прохода, так и для четырех. Микротвердость в зоне перемешивания также возрастает, что соответствует результатам механических испытаний на растяжение.

Ключевые слова: структура, прочность, медные сплавы, сварка трением с перемешиванием.

DOI: 10.14258/izvasu(2023)1-10

Введение

Медь является одним из наиболее широко используемых конструкционных материалов, обладающих отличной электропроводностью, теплопровод-

This study examines the structure and mechanical properties of CuAl9Mn2 copper alloy processed via friction stir processing. Workpieces, 2 mm thick, were processed using four tool passes. After the initial FSP pass, the stir zone structure was found to be non-homogeneous, with grains changing from equiaxed to elongated in the material flow direction. Grain sizes decreased from 80–140 μm to 3–8 μm . However, after the fourth pass, the stir zone became more homogeneous with equiaxed grains and sizes ranging from 2–6 μm .

The increase in microhardness and tensile properties of the material is attributed to the processing temperature, mechanical mixing, and grain refinement. The ultimate tensile strength of the FSP material increased by 13% relative to the metal prior to processing, whether one or four passes were used. Additionally, microhardness in the stir zone increased, which is consistent with the results of mechanical tensile tests.

Key words: structure, strength, copper alloys, friction stir welding.

ностью, пластичностью и обрабатываемостью, а медные сплавы, в частности бронзы, интересны за счет своей устойчивости к агрессивным средам (а именно высокой и низкой температуре, коррозирующим ве-

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0012.

ществам), относительной легкости и пластичности [1, 2]. Эти свойства медных сплавов позволяют изготавливать такие компоненты, как теплообменники (камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей), подвижные узлы машин и приборов (зубчатые колеса, шестерни, пружины, подшипники), регулирующие арматуры трубопроводов и отопительных систем, составляющие химических приборов, электронные разъемы, детали для компьютерной и мобильной техники [3, 4, 5].

Однако в медных сплавах в процессе производства чаще всего образуются такие дефекты, как поры, несплошности и расслоения. Дефекты, образующиеся в структуре, могут быть различного происхождения, размера и формы, и их наличие приводит к ухудшению механических или эксплуатационных свойств материалов. Кроме того, при добавлении в них большего количества легирующих элементов они становятся более хрупкими [6, 7]. Одним из возможных способов устранения дефектов в структуре материалов является фрикционная перемешивающая обработка (ФПО) — процесс, схожий со сваркой трением с перемешиванием (СТП), который обеспечивает формирование ультрамелкозернистой структуры с высокими механическими свойствами в структуре приповерхностного слоя [8] ввиду температуры процесса ниже температуры плавления сплавов [9]. Сильная пластическая деформация и тепловое воздействие при ФПО вызывают измельчение зерна в матрице, устранение пористости, а также формирование однородной мелкозернистой структуры [10, 11].

Однако в литературе имеется большой разброс экспериментальных результатов по свойствам металлических материалов, подвергнутых ФПО, что указывает на необходимость дальнейших исследований. Причиной большого разброса данных может быть физическая природа процесса фрикционного перемешивания, основанная на крайне неоднородном течении материала в процессе обработки [12, 13].

Таким образом, целью данной работы является исследование изменения механических свойств и структуры в поверхностном слое заготовок из медного сплава БрАМц9-2 после одного и четырех проходов фрикционной перемешивающей обработкой.

Материал и методы исследования

В данной работе в качестве заготовок использовались пластины листового проката сплава БрАМц9-2 толщиной 2 мм. На станке для экспериментальных исследований технологических режимов сварки трением с перемешиванием на заготовках была проведена фрикционная перемешивающая обработка в один проход и в четыре прохода для сравнения структурных и механических характеристик, полученных упрочненных поверхностей. Схема процесса ФПО показана на рисунке 1а. Параметры ФПО представлены в таблице. Скорость вращения (ω , об/мин) и перемещения инструмента (V , мм/мин), усилие прижима инструмента (P , кг) на внедрение и при обработке подбирались опытным путем.

Параметры фрикционной перемешивающей обработки для 1 и 4 проходов

V , мм/мин	ω , об/мин	$P_{вн}$, кг	$P_{об}$, кг
150	500	1000	900

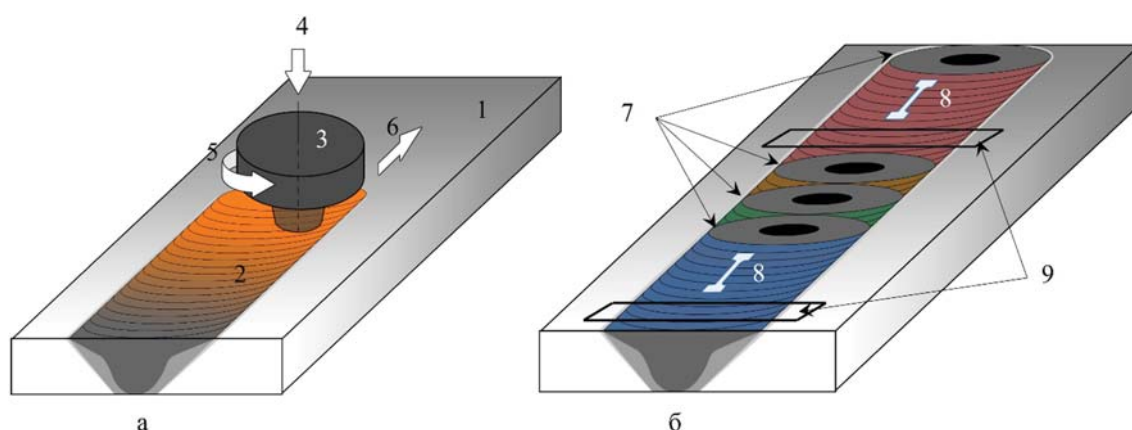


Рис. 1. Схема процесса ФПО (а) и вырезки образцов для исследования (б) 1–4 проходов: 1 — заготовка из медного сплава БрАМц9-2; 2 — зона перемешивания; 3 — инструмент для ФПО; 4 — нагрузка на инструмент; 5 — направление вращения инструмента; 6 — направление ФПО; 7 — отверстие от выхода инструмента; 8 — схема вырезки образцов для испытаний на растяжение; 9 — схема вырезки образцов для металлографического исследования

После процесса ФПО из заготовок на электроэрозионном станке вырезались образцы для исследования, как показано на рисунке 16. Для исследования макро- и микроструктуры поверхность образцов подвергалась шлифовке на абразивной бумаге различной зернистости, полировке на алмазной пасте с последующим травлением в растворе 10 мл HCl+1 г FeCl₃+20 мл H₂O. Для оценки макро- и микроструктуры использовался оптический микроскоп Altami MET1-C. Для оценки механических свойств образцов использовалась универсальная испытательная машина «UTS 110M-100», измерение значений микротвердости проводилось на микротвердомере AFFRI 8.

Результаты и их обсуждение

Оптическая металлография исследуемых образцов после одного прохода ФПО демонстрирует характер-

ную для данного вида обработки структуру, которая представлена зоной перемешивания (ЗП), зоной термомеханического воздействия (ЗТМВ), зоной термического влияния (ЗТВ) и основным металлом (ОМ). Выявлена бездефектная структура, которая часто характерна для ФПО. Макроизображение демонстрирует в ЗП структуру, образованную потоком материала по контуру инструмента, которая выделена на рисунке 2 черной пунктирной линией. С наступающей стороны (НС) от ЗП к ЗТМВ отчетливо видна граница, где немного вытянутые зерна резко переходят в мелкозернистое состояние. Однако граница ЗП с ЗТМВ, как и структура с отступающей стороны (ОС), не имеет четкого контура, зерна вытянуты в направлении движения инструмента. Средний размер зерна в ЗП варьируется от 3 мкм до 8 мкм, в ЗТМВ — от 20 мкм до 45 мкм.

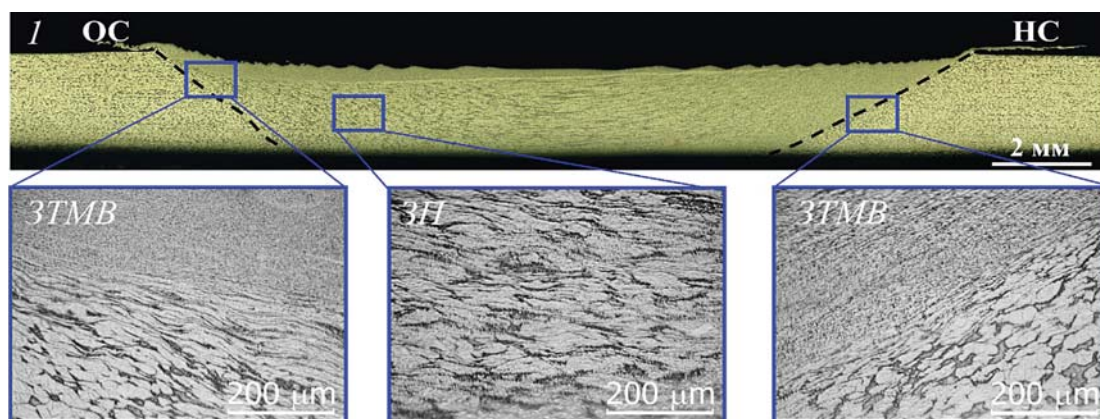


Рис. 2. Оптические изображения микроструктур, сформированных в металле сплава БрАМц9-2 после 1 прохода ФПО

На рисунке 3 видно аналогичное формирование ЗП при четвертом проходе, однако в данном случае структура более однородна, преобладают зерна формой, близкой к равноосной. Средний размер зерна

составляет от 2 мкм до 6 мкм. В ЗТМВ также наблюдаются зерна, вытянутые в направлении движения инструмента при обработке, однако размер зерна уменьшился до 17–40 мкм.

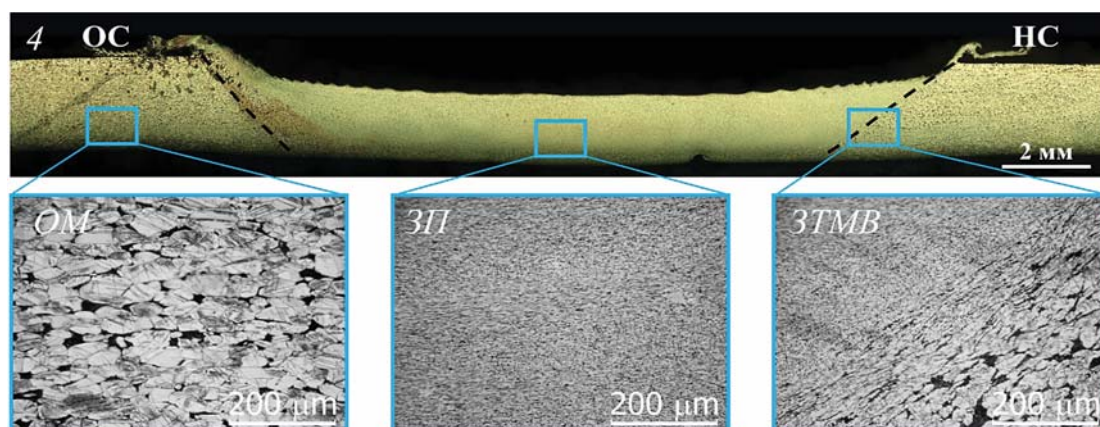


Рис. 3. Оптические изображения микроструктур, сформированных в металле сплава БрАМц9-2 после 4-х проходов ФПО

Граница между ОМ и ЗТВ не выявлена для обоих случаев. Основной металл сплава БрАМц9-2 представлен крупными зёрнами, средний размер которых варьируется от 80 мкм до 140 мкм.

Для сплава БрАМц9-2 в исходном состоянии значение предела прочности составляет 640 МПа, при обработке поверхности методом ФПО данные значительно изменяются. На рисунке 4 представлены усредненные значения предела прочности (а) и пластичности (б) в зависимости от количества проходов.

Максимальные значения наблюдаются при первом и четвертом проходе и составляют 740 МПа. Это на 13 % превышает прочность основного металла, в связи с чем в данной работе исследуются именно эти образцы. При этом пластичность у первого и четвертого проходов также совпадает, однако уменьшается относительно основного металла на 11 %. Данные результаты хорошо взаимодействуют с результатами измерения микротвердости.

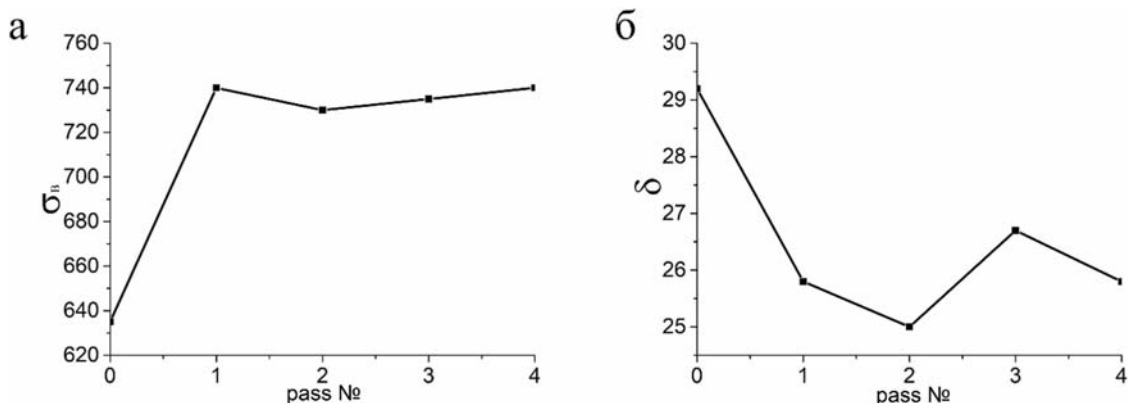


Рис. 4. Значения предела прочности (а) и пластичности (б) в зависимости от количества проходов при ФПО

Профили микротвердости были получены поперек зоны перемешивания по линии, равноудаленной от корня шва и лицевой стороны. По графику хорошо определяются характерные для ФПО и СТП зоны, так как распределение значений микротвердости показывает резкие изменения в разных частях: снижение значений в ЗТМВ и затем резкий скачок в ЗП. В основном

металле значения микротвердости в среднем составляют 152 HV, в ЗТМВ как с НС, так и с ОС значения микротвердости резко снижаются и повышаются вновь, пока не возрастают примерно до 163 HV. 190 HV в ЗП (рис. 5а). В четвертом проходе значения микротвердости для ЗП увеличиваются относительно первого прохода и составляют в среднем 177 HV (рис. 5б).

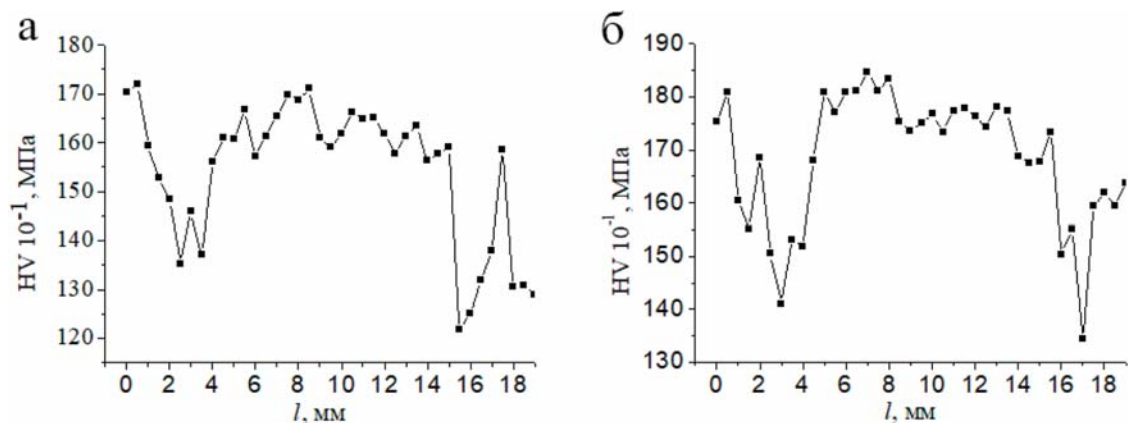


Рис. 5. Распределение значений микротвердости на образцах после первого (а) и четвертого (б) проходов ФПО

Полученные результаты хорошо коррелируют с литературными данными. Так, например, в работе [14] авторы после обработки медной пластины (один проход, скорость перемещения — постоянная, 60 мм/мин, скорость вращения изменялась от 600 до 1000 об/мин)

зафиксировали присутствие равноосных зёрен в зоне перемешивания (ЗП) размером от 3 до 32 мкм. Микротвердость в зоне перемешивания увеличилась до 76–103 HV, что на 19–61 % больше по сравнению с твердостью в основном металле (64 HV).

Из этого авторы делают вывод, что на различие свойств обработанных заготовок влияют тепловой эффект и время его воздействия на металл. Похожие результаты показаны в работе [15], где при постоянной скорости хода инструмента — 100 мм/мин — рассматривались высокий и низкий подводы тепла при разных скоростях вращения — 300 и 900 об/мин соответственно. Меньший размер зерна при низком подводе тепла авторы объясняли меньшим ростом зерен при динамической кристаллизации из-за меньшей пиковой температуры, а также ограничением роста из-за прижатия к границам зерен. В работе [16] рассматривалось влияние скорости перемещения инструмента — от 50 до 200 мм/мин при постоянной скорости вращения в 600 об/мин — на свойства материала. Так, средний размер зерна в ЗП менялся с увеличением скорости хода от 9,7 до 4,6 мкм, а средняя микротвердость увеличивалась на 24 %. В представленной работе, как в литературных данных, мы наблюдаем повышение значений микротвердости в ЗП относительно основного металла. Однако для первого прохода повышение значений составляет 7 %, а для четвертого 16,5 %, т.е. увеличивается более чем в 2 раза.

Заключение

В результате обработки поверхности медного сплава БрАМц9-2 методом ФПО было выявлено, что увеличение количества проходов до четырех приводит к уменьшению размера зерна в зоне перемешивания в среднем на 30 % относительно первого прохода. Структура более однородна, зерна приобретают форму, близкую к равноосной. Уменьшение размера зерна относительно основного металла составляет более 90 %, что приводит к повышению микротвердости и прочностных свойств материала. Относительно основного металла предел прочности в зоне перемешивания как для первого, так и для четвертого прохода увеличивается на 13 %. Микротвердость для первого прохода в зоне перемешивания увеличивается на 7 %, в то время как при четвертом проходе на 16,5 %.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что ФПО положительно влияет на качество поверхности и подходит для упрочнения медного сплава БрАМц9-2. Количество проходов заметно влияет на структуру зоны перемешивания, увеличение значений микротвердости, при этом оставляя прочность и пластичность на одном уровне.

Библиографический список

1. Achiței D.C., Vizureanu P., Minea A.A., Abdullah M.M.B., Minciună M.G., Sandu A.V. Improvement of Properties of Aluminum Bronze CuAl₇Mn₃ by Heat Treatments // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 657.
2. Wan S., Cui X., Jin Q., Ma J., Wen X., Su W., Zhang X., Jin G., Tian H. Microstructure and properties of cold sprayed aluminum bronze coating on MBLS10A-200 magnesium-lithium alloy // *Materials Chemistry and Physics*. 2020. – Vol. 281.
3. Osipovich K., Vorontsov A., Chumaevskii A., Moskvichev E., Zakharevich I., Dobrovolsky A., Sudarikov A., Zykova A., Rubtsov V., Kolubaev E. Features of Microstructure and Texture Formation of Large-Sized Blocks of C11000 Copper Produced by Electron Beam Wire-Feed Additive Technology // *Materials*. 2022. Vol. 15 (3).
4. Tian F., Wu Ch., Zhu B., Wang L., Liu Y., Zhang Y. Research of Microstructure, Friction and Wear on Siliconized Aluminum-Bronze With Different Silicon Powder Ratio // *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 7.
5. Ferreira L.F.P., Bayraktar E., Miskioglu I., Katundi D. Design of Hybrid Composites from Scrap Aluminum Bronze Chips // *Mechanics of Composite and Multi-functional Materials*. 2017. Vol. 7.
6. Dinaharan I., Kalaiselvan K., Akinlabi E.T., Paulo Davim J. Microstructure and wear characterization of rice husk ash reinforced copper matrix composites prepared using friction stir processing // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 178.
7. Mazaheri H., Aval H. J., Jamaati R. Pre-strain assisted low heat-input friction stir processing to achieve ultrafine-grained copper // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. Vol. 826.
8. Mironov S., Sato Yu. S., Kokawa H. Friction-stir processing // *Nanocrystalline Titanium*. 2019.
9. Upadhyay V., Sharma Ch. Fabrication of Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing // *Futuristic Composites*. 2018.
10. Zykova A., Tarasov S. A Review of Friction Stir Processing of Structural Metallic Materials: Process, Properties, and Methods // *Metals*. 2020. Vol. 10 (6).
11. Jordon J. B., Rao H., Amaro R., Allison P. Beyond Friction Stir Welding: Friction Stir Processing and Additive Manufacturing // *Fatigue in Friction Stir Welding*. 2019.
12. Bauri R., Yadav D. Introduction to Friction Stir Processing (FSP) // *Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing*. 2018.
13. Kumar H., Prasad R., Kumar P. Effect of tool pin eccentricity on microstructural and mechanical properties of friction stir processed copper // *Vacuum*. 2021. Vol. 185.
14. Iwazsko J., Kudla K. Friction stir processing of copper // *28th International Conference on Metallurgy and Materials*. 2019.
15. Rahimzadeh A., Heidarzadeh A., Mohammadzadeh A., Moeini G. Effect of friction stir welding heat input on the microstructure and tensile properties of Cu-Zn alloy containing disordered β phase // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9 (5).
16. Bheekya Naik R., Venkateswara Reddy K., Madhusudhan Reddy G., Arockia Kumar R. Development of High-Strength and High-Electrical Conductivity Cu-Zr Alloy Through Friction Stir Processing // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72.