

**Иван Сергеевич Никитин<sup>1\*</sup>, Сергей Сергеевич Малофеев<sup>1</sup>, Александр Андреевич Калинин<sup>1</sup>, Сергей Юрьевич Миронов<sup>1</sup>, Анна Игоревна Бодякова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ»), г. Белгород, Россия

\*nikitin\_i@bsu.edu.ru

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМОГО МЕДНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CU-CR-ZR-Y

В работе рассматриваются особенности обработки трением с перемешиванием (ОТП) медного сплава Cu-0,9Cr-0,17Zr-0,05Y в условиях частоты вращения инструмента 1000 об/мин и скоростей подачи 25, 75, 100, 150 и 375 мм/мин. Обнаружено, что ОТП без дефектов получается в случае 1000 об/мин и 150 мм/мин. Показано, что при наличии дефектов они располагаются либо со стороны набегания (СН) материала, либо в нижней области зоны перемешивания (ЗП). Формирование дефекта приводит к асимметричному распределению микротвердости в ЗП с наличием областей с увеличенной до 40% твердостью вблизи СН в сравнение со стороной отвода (СО). Установлено, что ОТП при 1000 об/мин и 150 мм/мин приводит к формированию мелких зерен со средним размером  $\approx 0,45$  мкм и растворению крупных частиц, оставшихся после закалки, что сопровождается увеличением электропроводности.

*Ключевые слова:* медный сплав, обработка трением с перемешиванием, закалка, измельчение зерен, микроструктура.

***Ivan S. Nikitin, Sergey S. Malopheyev, Aleksandr A. Kalinenko, Sergey Yu. Mironov, Anna I. Bodyakova***

## FEATURES OF FRICTION STIR PROCESSING OF HEAT-TREATABLE COPPER ALLOY OF THE CU-CR-ZR-Y SYSTEM

The work considers the features of friction stir processing (FSP) of copper alloy Cu-0.9Cr-0.17Zr-0.05Y under conditions of tool rotation speed of 1000 rpm and feed rates of 25, 75, 100, 150 and 375 mm/min. It was found that FSP without defects is achieved in the case of 1000 rpm and 150 mm/min. It was shown that, if any defects are present, they are located either on the advancing side (AS) of the material or in the lower region of the stir zone (SZ). The formation of a defect leads to an asymmetric microhardness distribution in the stir zone (SZ) with the presence of areas with hardness increased by up to 40% near the AS in comparison with the retreating side (RS). It was found that FSP at 1000 rpm and 150 mm/min leads to the formation of fine grains with average size of  $\approx 0.45$   $\mu\text{m}$  and the dissolution of large particles remaining after quenching, which is accompanied by an increase in electrical conductivity.

*Keywords:* copper alloy, friction stir processing, quenching, grain refinement, microstructure.

Обработка трением с перемешиванием (ОТП) является инновационной технологией, позволяющей модифицировать поверхностный слой при больших деформациях и относительно высоких температурах. Одной из особенностей ОТП является формирование достаточно мелких зерен в зоне перемешивания, что позволяет получать интересные сочетания прочностных и пластических характеристик в зависимости от примененного режима ОТП.

Особый интерес для ОТП представляют термически упрочняемые сплавы, в которых в зависимости от режима ОТП могут происходить разнообразные сочетания процессов растворения, выделения и огрубления частиц вторых фаз. В литературе [1-2] имеются примеры использования ОТП с высоким тепловложением, в процессе которой наблюдается растворение имеющихся частиц и переводом легирующих элементов в твердый раствор. В теории, можно добиться выделения частиц (как при старении, но в присутствии значительной деформации) в условиях низкого тепловложения процесса ОТП, используя закаленные сплавы, тем самым получая мелкое зерно и дополнительное дисперсионное упрочнение. В рамках данной работы наш интерес направлен на термически упрочняемый медный сплав системы Cu-Cr-Zr-Y.

Цель работы – выявить основные особенности формирования макроструктуры и микроструктуры Cu-Cr-Zr-Y сплава при различных режимах процесса обработки трением с перемешиванием.

Низколегированный сплав Cu(осн.)-0,9Cr-0,17Zr-0,05Y (вес. %) был предварительно закален в воде с 920°C (выдержка 1 час), после чего была проведена обработка трением с перемешиванием с частотой вращения инструмента 1000 об/мин и скоростями подачи 25, 75, 100, 150 и 375 мм/мин. ОТП осуществлялась на машине AccuStir 1004. Обработка проводилась с использованием инструмента из твердого сплава WC+Co. Измерение электропроводности производилось с помощью прибора Константа К-6. Оценка микротвердости проводилась при нагрузке 100 гр и времени 10 сек с использованием микротвердомера Wolpert 402MVD. Исследование макроструктуры проводилось с помощью оптического микроскопа Olympus GX71 после виброполировки на установке VibroMet™ 2 в суспензии OP-S. Микроструктура исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа Quanta Q600.

Исходная структура сплава представлена зернами среднего размера  $\approx 54$  мкм с двойниками отжига и Cr-обогащенными частицами черного цвета внутри (Рис. 1.). Между зернами наблюдались прослойки (Y, Zr)-обогащенной фазы (Рис. 1.) светло-серого цвета. Несмотря на наличие нерастворенных частиц матрица после закалки содержит достаточное количество хрома (0,35-0,44 вес. %).

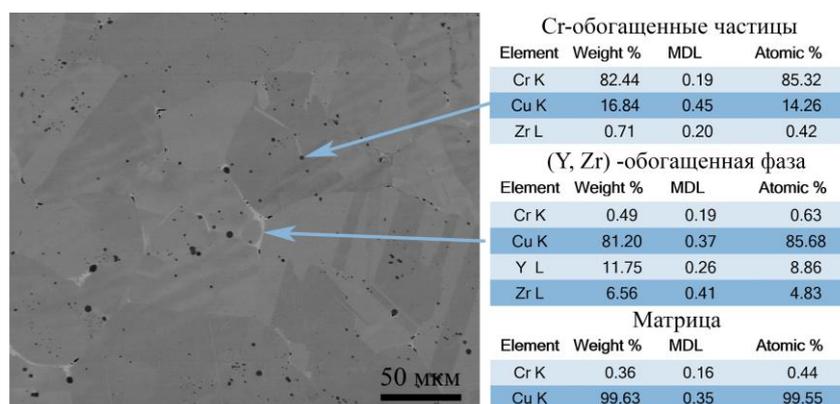


Рис. 1. Микроструктура сплава Cu-Cr-Zr-Y в режиме Z-контраста и химические составы обнаруженных фаз после закалки в воду с 920°C

Макроструктура областей ОТП (Рис. 2) представлена наличием явно выраженной зоны перемешивания, в особенности со стороны набегания материала (СН). В случаях ОТП при скоростях подачи инструмента 25, 75, 100 и 375 мм/мин (Рис. 2. и Таблица 1) наблюдается наличие объемных дефектов либо со СН, либо в нижней области зоны перемешивания (ЗП). Наличие дефектов также сопровождается значительной асимметрией распределения микротвердости: в ЗП могут наблюдаться зоны различной твердости (Таблица 1) с превышением твердости со СН до 40% в сравнении со СО. Электропроводность пластин после ОТП находится на близком уровне 72-76%, за исключением режима 1000 об/мин 375 мм/мин, в котором наблюдается дефект на всю зону ОТП, что ограничивает возможность оценки реальной электропроводности. Подобный уровень электропроводности соответствует значениям состаренного состояния сплава, что может косвенно указывать на то, что при ОТП или в момент остывания обработанных пластин сплава происходит выделению хрома из твердого раствора в виде частиц.

Таблица 1

Характеристики взаимосвязи режимов ОТП Cu-Cr-Zr-Y с наличием дефектов, величиной микротвердости и электропроводности

Режим ОТП	Качество	Твердость HV <sub>0.1</sub> в ЗП	IACS, %
1000/25	дефект под ЗП	≈160(СО) и ≈220 (СН)	≈76
1000/75	дефект со СН и под ЗП	≈155(СО) и ≈220 (СН)	≈72
1000/100	дефект со СН и под ЗП	≈140(СО) и ≈160 (СН)	≈75
1000/150	без дефекта	≈140(СО) и ≈148 (СН)	≈73
1000/375	дефект со СН и под ЗП	≈158(СО) и ≈160 (СН)	≈57

На примере режима ОТП без дефектов (1000 об/мин и 150 мм/мин) на Рис. 3. хорошо видно, что процесс ОТП приводит к растворению большинства Cr-обогащенных частиц и прослоек (Y, Zr)-обогащенной фазы в ЗП, наблюдавшихся в закаленном сплаве (Рис. 1.).

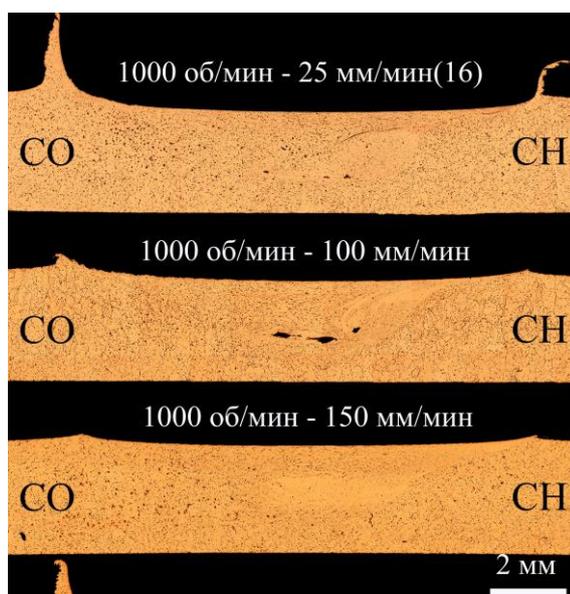


Рис. 2. Макроструктура листов сплава Cu-Cr-Zr-Y после ОТП

Пиковую температуру процесса ОТП можно оценить согласно формуле [3]:

$$T = T_{\text{пл}} K \left( \frac{\omega^2}{v \times 10^4} \right)^\alpha$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления ( $1083^\circ\text{C}$ ),  $\omega$  – частота вращения рабочего инструмента,  $v$  – скорость подачи инструмента, а  $0,65 < K < 0,75$  и  $0,04 < \alpha < 0,06$  постоянные.

Представленное выражение предсказывает температуру в ЗП для режима ОТП (1000 об/мин и 150 мм/мин) порядка  $\approx 687^\circ\text{C}$ , что значительно ниже температуры закалки сплава. Что позволяет предположить, что сочетание интенсивной деформации при воздействии относительно высокой температуры при ОТП позволяет сделать твердый раствор еще более перенасыщенным по содержанию хрома по сравнению с закаленным состоянием, что может положительно сказаться на последующем дисперсионном твердении или же выделении частиц в процессе ОТП.

В то же время при больших увеличениях (Рис. 3.) видно, что часть Cr-обогащенных частиц все же остается в структуре, но они имеют более дисперсный размер в сравнении с исходным состоянием (Рис. 1.), что указывает на то, что некоторая доля частиц не растворяется, а вероятно разбивается на более мелкие фрагменты.

Другим важным процессом при ОТП является динамическая рекристаллизация с формированием мелких зерен средним размером  $\approx 0,45$  мкм преимущественно большеугловой разориентировки долей 78%. Что соответствует снижению среднего размера зерна в 120 раз.

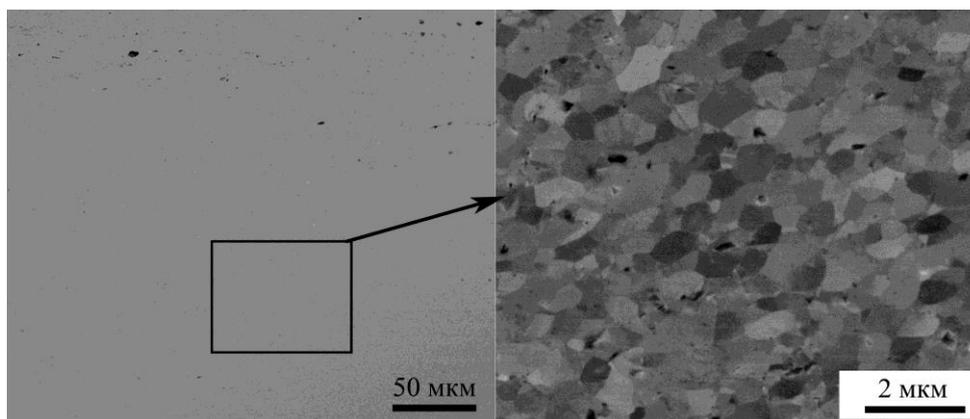


Рис. 3. Микроструктура сплава Cu-Cr-Zr-Y после ОТП по режиму 1000 об/мин 150 мм/мин

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом были выявлены основные особенности ОТП термически упрочняемого сплава Cu-Cr-Zr-Y:

- 1) Бездефектная ОТП реализуется при скорости вращения инструмента 1000 об/мин и скорости подачи инструмента 150 мм/мин.
- 2) При наличии дефектов при ОТП они располагаются со стороны СН либо в нижней области ЗП.
- 3) ОТП приводит к формированию мелких зерен и растворению нерастворённых при закалке Cr-обогащенных частиц и прослоек (Y, Zr) – обогащенной фазы.

*«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00628, <https://rscf.ru/project/24-29-00628/>», с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".*

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ/REFERENCES

1. He D. Q. Microstructure and mechanical properties of Cu-Cr-Zr alloy by friction stir welding / D. Q. He [et al.] // *Advanced Materials Research*. 2013. № 602. P. 608-611.
2. Bodyakova A. Effect of friction-stir processing and subsequent aging treatment on microstructure and service properties of Cu-Cr-Zr alloy / A. Bodyakova [et al.] // *Materials Characterization*. 2024. № 216. P. 114225.
3. Mishra R. S. Friction stir welding and processing / R. S. Mishra, Z. Y. Ma // *Materials science and engineering: R: reports*. 2005. V. 50. № 1-2. P. 1-78.