

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ МЕДИ В ХОДЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЕЕ НА СТАНЕ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ

За последние десятилетия в современном материаловедении все чаще используются методы интенсивной пластической деформации, как одни из наиболее эффективных способов измельчения микроструктуры и изменения механических свойств материалов. Одной из разновидностей интенсивной пластической деформации (ИПД) является радиально-сдвиговая прокатка (РСП) [1].

Также известно, что правильный подбор предварительной термической обработки некоторых черных и цветных металлов и сплавов перед операцией его деформирования зачастую позволяет дополнительно измельчить исходный размер зерна [2, 3]. Если говорить о медном сплаве М1, то ранее авторами данной работы уже были проведены исследования влияния процесса радиально-сдвиговой прокатки на эволюцию микроструктуры данного сплава [4]. Но исходные заготовки из медного сплава М1 перед деформированием никакой предварительной термической обработке не подвергались.

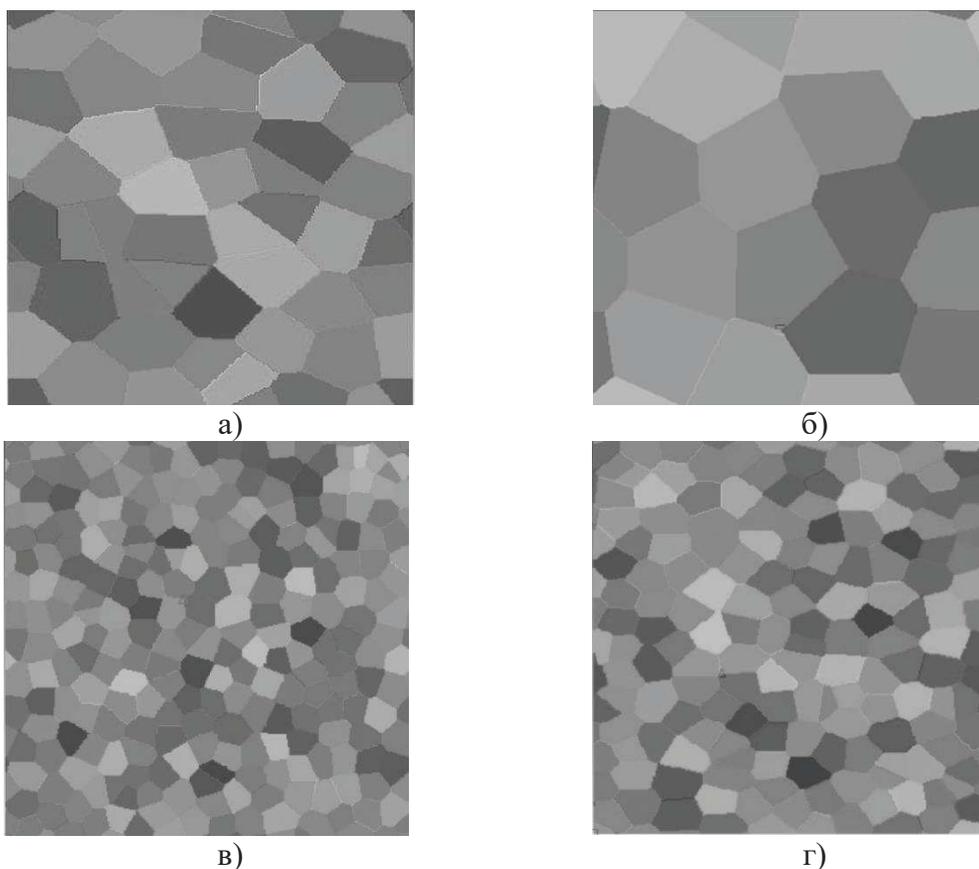
Поэтому целью данной работы является исследование влияния предварительной термической обработки на эволюцию микроструктуры медного сплава М1 при деформировании его на стане радиально-сдвиговой прокатки.

Для достижения поставленной цели было проведено компьютерное моделирование совмещенного режима обработки меди марки М1, включающего в себя предварительную термическую обработку (отжиг, закалка) и последующую радиально-сдвиговую прокатку, что позволит определить влияние данного термомеханического воздействия на эволюцию микроструктуры данного сплава. Для этого были построены 2 модели в программном комплексе Deform. В первой модели заготовка диаметром 38 мм и длиной 80 мм подвергалась нагреву до 700°C при скорости нагрева 80°C/час, затем выдерживалась при заданной температуре 50 минут для равномерного прогрева по сечению, после чего резко охлаждалась со скоростью 500°C/сек до комнатной температуры, т.е. моделировался процесс закалки. Во второй модели режим нагрева и выдержки были аналогичными, скорость охлаждения

до комнатной температуры составляла $80^{\circ}\text{C}/\text{час}$, т.е. моделировался процесс отжига. После чего обе заготовки подвергались трем циклам радиально-сдвиговой прокатки с обжатиями по 3 мм в каждом проходе.

В качестве исходного размера зерна было принято значение в 100 мкм. Поскольку из ряда работ [1, 3] известно, что основное измельчение структуры при радиально-сдвиговой прокатке происходит преимущественно в поверхностных слоях заготовки, то для анализа была выбрана зона на глубине 1 мм от поверхности.

На рисунке 1 представлены результаты моделирования структуры.



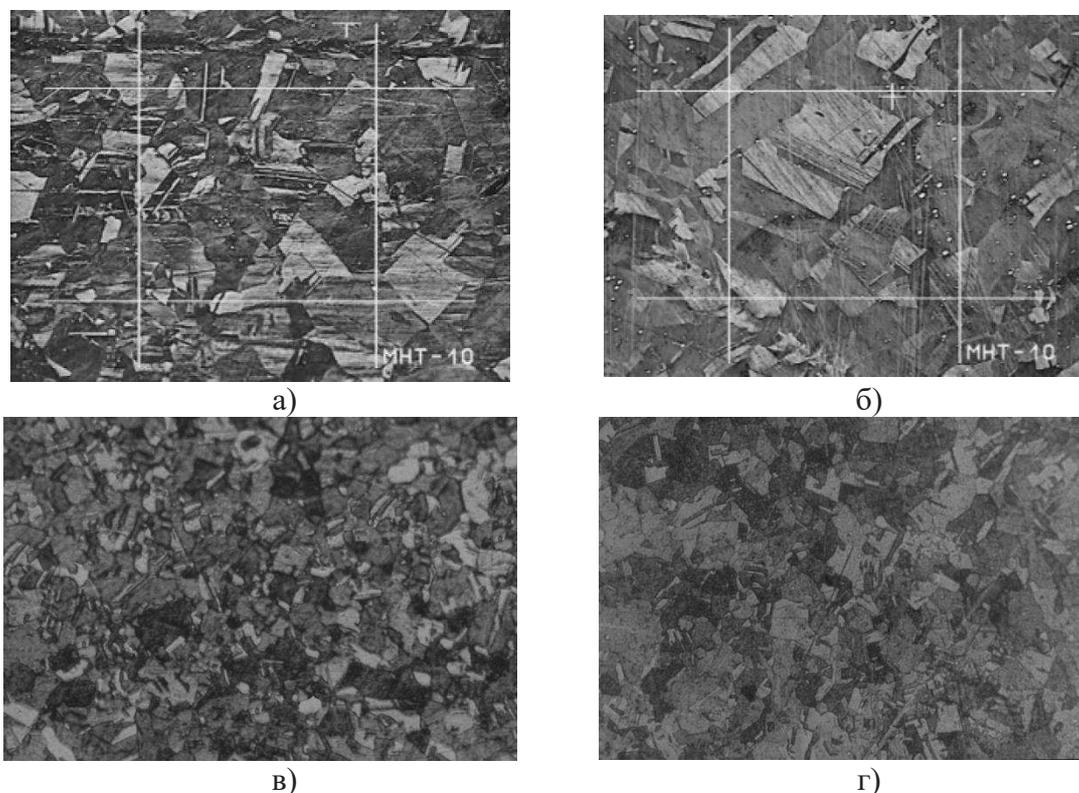
**Рисунок 1 – Результаты моделирования микроструктуры:
а) после закалки; б) после отжига; в) после закалки+3 цикла РСП;
г) после отжига+3 цикла РСП**

После проведения закалки исходное зерно измельчается со 100 мкм в исходном состоянии до 60 мкм. При отжиге размер зерен практически не изменяется и остается на уровне 100 мкм. Реализация интенсивной пластической деформации в виде трех циклов радиально-сдвиговой прокатки приводит к существенному измельчению зерен в обеих моделях. Однако за счет различной предварительной термической обработки конечные размеры зерен отличаются. После закалки и

трех циклов РСП средний размер зерен равен 13-15 мкм, тогда как после отжига и трех циклов РСП средний размер зерен равен 20-22 мкм.

При лабораторном эксперименте материалом исследования являлась техническая медь марки М1 (Cu 99,99%) в состоянии поставки. До радиально-сдвиговой прокатки медные прутки диаметром 38 мм подвергали отжигу и закалке при температуре 700°C в течение 50 минут и охлаждении соответственно на воздухе или в воде. Деформацию осуществляли на стане радиально-сдвиговой прокатки «СПВ-08» с исходного диаметра прутка 38 мм до диаметра 29 мм за 3 перехода при комнатной температуре.

На рисунке 2 показаны оптические фотографии микроструктуры меди после предварительной термической обработки: отжиг и закалка.



**Рисунок 2 – Микроструктура меди, x100: а) после закалки;
б) после отжига; в) после закалки+3 цикла РСП;
г) после отжига+3 цикла РСП**

Микроструктура отожженной меди имеет равноосные полиэдрические зерна с наличием двойников, средний размер зерен составляет 100мкм (рисунок 2б). После закалки медь теряет свою полиэдрическую структуру и становится более дисперсной, зерна становятся более вытянутыми в направлении градиента охлаждения, средний размер зерен 65 мкм (рисунок 2а).

Фотографии микроструктуры, полученные при изучении меди марки М1 после РСП представлены на рисунках 2в-г. В результате 3 циклов деформирования методом радиально-сдвиговой прокатки в медном прутке произошло измельчение структуры в независимости от вида предварительной термической обработки. Но как видно из анализа микроструктуры средний размер зерен после деформирования закаленной структуры более диспергирован. Так с применением предварительной термической обработки закалка микроструктура измельчилась с 65 до 18 мкм за 3 цикла деформирования. А с применением отжига зерно измельчилось со 100 до 25 мкм. Суммарное снижение размера зерна при применении закалки составляет 73%, а при применении отжига – 75%.

Заключение

Применение предварительной термической обработки влияет на конечный размер зерна после деформирования методом радиально-сдвиговой прокатки. А принимая во внимание, что охлаждение меди в воде позволяет делать этот металл более пластичным, можно судить о снижении усилия в процессе деформирования.

*Данное исследование финансировалось Комитетом науки
Министерства образования и науки Республики Казахстан
(Грант № AP14869128).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Galkin, S.P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production // Steel in Translation. - 2014. - №44 (1). - P. 61-64.
2. Богатов, А.А. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учеб. пособие / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Д.Ш. Нухов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 164 с.
3. Лопатин, Н.В. Математическое моделирование радиально-сдвиговой прокатки титанового сплава ВТ6 в условиях формирования глобулярной структуры / Н.В. Лопатин, Г.А. Салищев, С.П. Галкин // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2011 – №5. – С. 44-49.
4. Naizabekov, A. Combined process "helical rolling-pressing" and its effect on the microstructure of ferrous and non-ferrous materials / A. Naizabekov, S. Lezhnev, A. Arbuz, E. Panin // Metallurgical Research and Technology. – 2018. - Vol. 115. 213.