

УДК 621.771.6

А.Б. Найзабеков, д-р техн. наук, проф. (РИИ, г. Рудный);
Е.А. Панин, PhD, доц. (КарИУ, г. Темиртау);
И.Е. Волокитина, PhD, доц.;
С.Н. Лежнев, канд. техн. наук, проф. (РИИ, г. Рудный);
А.О. Толкушкин, асп. (УрФУ, г. Екатеринбург);
Д.В. Куис, канд. техн. наук, доц. (БГТУ, г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭВОЛЮЦИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДНОГО СПЛАВА, ПОДВЕРГНУТОГО РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКЕ

Компьютерное моделирование процессов пластической деформации уже давно зарекомендовало себя, как надежный способ определения рациональных геометрических и технологических параметров различных способов деформирования, как черных, так и цветных металлов, и сплавов. Это позволяет без существенных трудозатрат и материальных затрат, как оптимизировать действующие технологические процессы различных способов деформирования, так и разрабатывать новые способы деформирования и всесторонне их изучать. Так как при таком подходе возникает возможность изучения интересующих параметров процесса деформирования в любой точке заготовки и инструмента на любой стадии процесса [1-3]. При этом модели процессов обработки давлением зачастую позволяют проанализировать формоизменение заготовки, параметры напряженно-деформированного состояния, изменение размера зерна металла и энергосиловые условия деформирования. Также в последнее время стали использовать программные комплексы и для моделирования различных процессов термической обработки черных и цветных металлов и сплавов. Чаще всего в данных программных комплексах используют модели недеформационного типа, т.е. модели, в которых стадия пластического деформирования отсутствует.

Для моделирования процессов термической обработки используется специальный модуль Deform-НТЗ, который также позволяет моделировать эволюцию структуры в традиционном виде, т.е. в виде градиентной заливки всей заготовки. В этом случае у пользователя имеется возможность оценки лишь среднего размера зерен. Другим вариантом является использование модуля Microstructure 3D, принцип работы которого основан на механизме клеточных автоматов (Cellular Automata). Основное отличие данного модуля заключается в возмож-

ности оценки не только размера зерен, но и их формы, поскольку эволюция структуры отображается в окне, аналогичном линзе микроскопа. Недостатком данного алгоритма является его локальность, т.е. исследование микроструктуры осуществляется не для всей заготовки, а лишь для определенных точек.

Целью данной работы является исследование влияния предварительной термической обработки на эволюцию микроструктуры медного сплава М1 при деформировании его на стане радиально-сдвиговой прокатки. Так 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. Если говорить о медном сплаве М1, то ранее авторами данной работы уже были проведены исследования влияния процесса радиально-сдвиговой прокатки (рисунок 1) на эволюцию микроструктуры данного сплава [4]. Но исходные заготовки из медного сплава М1 перед деформированием никакой предварительной термической обработке не подвергались.

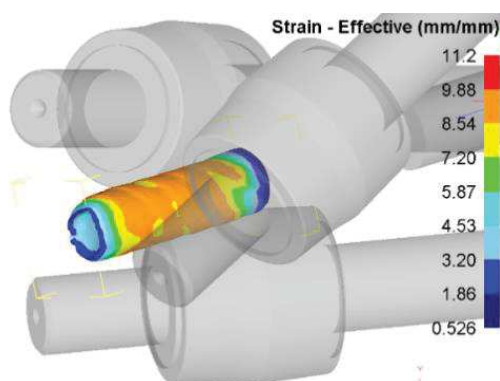


Рисунок 1 – Заготовка после окончания деформирования

Для достижения поставленной цели было принято решение провести компьютерное моделирование совмещенного режима обработки сплава М1, включающего в себя различные режимы предварительной термической обработки 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 при комнатной температуре. Геометрия валков стана и их конфигурация соответствовала данным стана СВП-08 Рудненского индустриального института. Коэффициент трения на контакте заготовки и валков был принят равным 0,4, что, согласно рекомендациям системы Deform, соответствует среднему уровню шероховатости поверхности деформирующего инструмента без наличия смазочного материала. Для анализа структуры использовался алгоритм клеточных автоматов программы Deform. Для расчета изменения размера и формы зерен используется алгоритм Yada [5], который учитывает влияние различных типов рекристаллизации.

В качестве исходного размера зерна было принято значение в 100 мкм. Поскольку из ряда работ [6-7] 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.

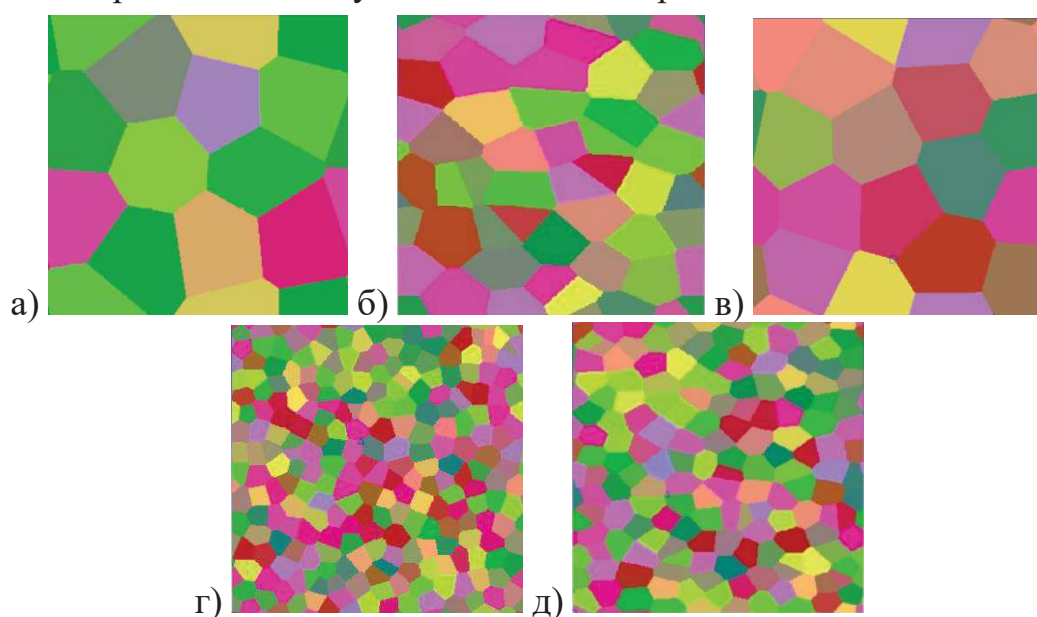


Рисунок 2 – Результаты моделирования микроструктуры:
а – исходная структура, б – после закалки, в - после отжига,
г - после закалки + 3 цикла РСП, д - после отжига + 3 цикла РСП

На рисунке 2 представлены результаты моделирования структуры. Для более удобного сравнения результатов на обеих моделях было выставлено одинаковое разрешение (размер квадратного окна) 300 x 300 мкм. После проведения закалки исходное зерно измельчается со 100 мкм до 60 мкм. При отжиге размер зерен практически не изменя-

ется и остается на уровне 95-100 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.

Таким образом, в ходе компьютерного моделирования было выявлено, что наиболее оптимальным режимом предварительной термической обработки медного сплава М1 с точки зрения интенсивности измельчения зерна является закалка, поскольку ее реализация позволяет получить более мелкий размер зерен как после стадии предварительной термической обработки, так и после проведения радиально-сдвиговой прокатки. Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP14869128).

ЛИТЕРАТУРА

1. Hu J., Kulagin R., Ivanisenko Y., Baretzky B., Zhang H. Finite element modeling of Conform-HPTE process for a continuous severe plastic deformation path. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 55. P. 373-380.
2. Latypov M. I., Alexandrov I. V., Beygelzimer Y. E., Lee S., Kim H. S. Finite element analysis of plastic deformation in twist extrusion. *Computational Materials Science*. 2012. Vol. 60. P. 194-200.
3. Septimio R. D. S., Button S. T. Numerical simulation of multi-directional hot forging for the reduction of forging defects. *Proceedings of the 8th International Conference on Computational Plasticity - Fundamentals and Applications*. Barcelona, 2015. P. 227-237.
4. Naizabekov A., Lezhnev S., Arbuz A., Panin E. Combined process "helical rolling-pressing" and its effect on the microstructure of ferrous and non-ferrous materials. *Metallurgical Research and Technology*. 2018. Vol. 115. Iss. 2. № 213.
5. Lenard J. G., Pietrzyk M., Cser L. *Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products*. Amsterdam: Elsevier, 2005. 376 p.
6. Galkin S. P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production. *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. P. 61-64.
7. Naizabekov A., Volokitina I., Lezhnev S., Arbuz A., Panin E., Volokitin A. Structure and Mechanical Properties of AISI1045 in the Helical Rolling-Pressing Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 315-329.