УДК: 669-135, 669.36

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-1-36-48

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ШИН В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ПРЕССОВАНИИ

© 2021 г. А.Н. Кошмин, А.В. Зиновьев, А.Я. Часников, Г.Н. Грачев

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва, Россия

ООО «Свелен», г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 29.07.20 г., доработана 24.09.20 г., подписана в печать 27.09.20 г.

Аннотация: Выполнено комплексное исследование особенностей протекания физико-механических процессов в металле в очаге деформации при непрерывном прессовании прямоугольных шин размером 10×60 мм из меди М16. С применением компьютерного моделирования по методу конечных элементов получены значения энергосиловых параметров процесса экструдирования. Отмечено, что рост значений момента и усилия происходит вплоть до заполнения металлом пространства пресс-камеры, достигая максимумов 12,26 кН·м и 1,54 МН соответственно. В результате анализа напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации получены поля распределений накопленной степени деформации, интенсивности скоростей деформации и средних напряжений, а также построен график изменения температуры металла во времени в процессе экструдирования. Наибольший уровень накопленной степени деформации и сжимающих напряжений наблюдается в зоне контакта заготовки с упором пресс-контейнера. Там же отмечается наиболее интенсивный деформационный разогрев металла. Сопоставление результатов моделирования и микроструктурного исследования свидетельствует о том, что значительная часть работы по измельчению литой структуры происходит на входе в очаг деформации и в области упора, где действует наивысший уровень напряжений сжатия. Деформация металла при прохождении матрицы приводит к формированию ориентированной кристаллической структуры с размером зерен 25-30 мкм. Результаты измерения твердости образцов хорошо согласуются с результатами анализа структуры в исследованных областях очага деформации. При прохождении заготовки участка упора пресс-контейнера происходит деформационный разогрев, что приводит к снижению твердости с 93 до 67 HV. После прохождения металла через матрицу в нем продолжаются процессы рекристаллизации, приводящие к незначительному росту размеров зерен и, соответственно, снижению твердости с 79 до 74 HV, продолжающемуся до момента контакта шины с охлаждающей средой.

Ключевые слова: медь, непрерывная экструзия, Конформ, конечно-элементное моделирование, очаг деформации, напряженно-деформированное состояние, микроструктура.

Кошмин А.Н. – аспирант, инженер кафедры обработки металлов давлением НИТУ «МИСиС»

(119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: koshmin.an@misis.ru.

Зиновьев А.В. – докт. техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением НИТУ «МИСиС». E-mail: zinovyew@gmail.com.

Часников А.Я. – докт. техн. наук, проф., советник ген. директора ООО «Свелен» (196655, г. Санкт-Петербург, г. Колпино). E-mail: ac1945@yandex.ru.

Грачев Г.Н. – ген. директор ООО «Свелен». E-mail: glebgrachev@svelen.com.

Для цитирования: Кошмин А.Н., Зиновьев А.В., Часников А.Я., Грачев Г.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния и трансформации микроструктуры медных электротехнических шин в очаге деформации при непрерывном прессовании. Известия вузов. Цветная металлургия. 2021. Т. 27. No. 1. С. 36–48. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-1-36-48.

Investigation of the stress-strain state and microstructure transformation of copper busbars in the deformation zone during continuous extrusion

A.N. Koshmin, A.V. Zinoviev, A.Ya. Chasnikov, G.N. Grachev

National University of Science and Technology (NUST) «MISIS», Moscow, Russia

«Svelen» Ltd., St. Petersburg, Russia

Received 29.07.2020, revised 24.09.2020, accepted for publication 27.09.2020

Abstract: The paper describes an extensive study of features peculiar to physical and mechanical processes occurring in metal in the deformation zone during the continuous extrusion of Cu-ETP rectangular busbars 10×60 mm in size. Finite element computer simulation was used to obtain

the values of extrusion power parameters. It was noted that moment and force values increase to the point of filling the press chamber free space with metal reaching a maximum of 12.26 kN·m and 1.54 MN, respectively. The stress-strain state analysis of metal in the deformation zone made it possible to obtain distribution fields of accumulated plastic strain, strain rate intensity and average stresses, and to build the graph of metal temperature variation over time during extrusion. Maximum levels of accumulated plastic strain and compressive stresses are observed in the contact zone of the workpiece with the press container abutment. The most intense metal deformation heating also occurs there. The comparison of modeling and microstructural study results indicate that a significant portion of the cast structure grinding work occurs at the entrance to the deformation zone and at the abutment zone subjected to the highest level of compression stresses. Metal deformation during the die passage leads to an oriented crystal structure formed with a grain size of $25-30 \,\mu$ m. Sample hardness measurement results are consistent with the results of structure analysis in the studied areas of the deformation zone. When the workpiece passes through the compression container abutment section, deformation heating occurs, which leads to a decrease in hardness from 93 to 67 HV. After the metal passes through the die, recrystallization processes continue in it leading to a slight increase in grain size and, accordingly, a decrease in hardness from 79 to 74 HV, which continues until the busbar contacts a cooling medium.

Keywords: copper, continuous extrusion, CONFORM, finite element modelling, deformation zone, stress-strain state, microstructure. Koshmin A.N. – postgraduate student, engineer of the Department of metal forming, National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: koshmin.an@misis.ru.

Zinoviev A.V. – Dr. Sci. (Eng.), prof. of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: zinovyew@gmail.com. Chasnikov A.Ya. – Dr. Sci. (Eng.), prof., advisor to general director «Svelen» Ltd. (196655, Russia, St. Petersburg, Kolpino). E-mail: ac1945@yandex.ru.

Grachev G.N. - general director «Svelen» Ltd. E-mail: glebgrachev@svelen.com.

For citation: Koshmin A.N., Zinoviev A.V., Chasnikov A.Ya., Grachev G.N. Investigation of the stress-strain state and microstructure transformation of copper busbars in the deformation zone during continuous extrusion. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy).* 2021. Vol. 27. No. 1. P. 36–48 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-1-36-48.

Введение

Медь и сплавы на ее основе являются наиболее распространенным материалом для изготовления токопроводящих деталей, что обусловлено малым удельным электрическим сопротивлением (0,0172 мкОм·мм²/м у чистой меди) относительно других металлов [1—3]. Именно по этой причине из меди и ее сплавов производят шины и прутки различного профиля, проволоку, контактные провода, широко их использование в обмотках трансформаторов и двигателях. Однако, обладая одними из лучших показателей электро- и теплопроводности, а также пластичности, чистая медь не наделена высокими прочностными характеристиками, требуемыми во многих сферах применения проводников.

Для производства изделий из медных сплавов используют многочисленные виды обработки давлением (ОМД). На современных предприятиях по причине простоты и высокой производительности наиболее распространенными методами ОМД являются прокатка (горячая и холодная) [4—6], прессование и волочение [7]. Также известны методы интенсивной пластической деформации (ИПД), направленные на измельчение структуры металла, что позволяет управлять его физико-механическими свойствами, достигая высоких прочностных или пластических показателей. К подобным способам обработки сплавов на медной основе относятся равноканальное угловое прессование (РКУП) [8, 9], радиально-сдвиговая прокатка (РСП) [10—12], винтовая экструзия [13, 14] и др. Тем не менее вышеприведенные методы обработки не лишены недостатков: существенные капитальные вложения и низкий процент выхода годного металла, характерные для традиционных технологий, низкая производительность и невозможность производства длинномерных изделий при применении прогрессивных способов ИПД ограничивают их развитие на существующих предприятиях и распространение на создаваемых.

В последние десятилетия прошедшего века огромный толчок к развитию получила концепция создания металлургических мини-предприятий [15] как в области черной, так и цветной металлургии. Такие мини-заводы обычно специализируются на выпуске продукции узкого марочного и размерного сортамента и основываются на использовании компактных совмещенных процессов пластической деформации. Примером такого процесса служит технология CONFORM™ (Конформ) [16], совмещающая принципы прокатки и прессования с содействием сил трения. Данный процесс позволяет реализовать непрерывное производство длинномерных изделий из легкодеформируемых металлов — таких, как медь и алюминий, а также некоторых сплавов на их основе. В зависимости от конфигурации оборудования, на линии Конформ возможно производство сплошных и полых изделий сечением до 3200 мм² [17]. Основа процесса действие сил трения на поверхности ручья рабочего колеса, за счет которых происходит непрерывная подача заготовки в очаг деформации, ее деформационный разогрев до температур горячей обработки и истечение через отверстие матрицы заданного сечения [18].

Непрерывная экструзия Конформ в последние годы получила достаточно широкое освещение в научной литературе. Ряд работ российских авторов [19-21] посвящен исследованию с помощью различных методик характера течения металла и его реологических свойств в очаге деформации. Зарубежными авторами представлены результаты изучения формирования микроструктуры и свойств в процессе непрерывной экструзии магниевых и хромистых бронз [22, 23]. В работах [24, 25] отмечаются измельчение зерен и динамическая рекристаллизация сплава латуни Л62 после обработки на установке Конформ. Особенности конфигурации инструмента и его модернизация подробно рассмотрены в работах [26-28]. Однако, несмотря на широкое распространение в промышленности и освещение результатов научных исследований в публикациях, процесс непрерывной экструзии Конформ и, в частности, такие его аспекты, как эволюция микроструктуры и свойств, физико-механические процессы, проходящие в очаге деформации, остаются недостаточно изученными, что является причиной низкой контролируемости этих процессов и не позволяет в достаточной степени разработать механизм влияния на свойства прессуемых изделий.

Особенности процесса непрерывной экструзии Конформ характеризуются многообразием физических процессов и деформационных параметров, развивающихся в очаге деформации, которые не могут быть проанализированы в лабораторных и производственных условиях. Современное программное обеспечение для моделирования методом конечных элементов (МКЭ) позволяет подробно и достаточно точно оценить такие параметры обработки давлением, как напряженно-деформированное состояние, изменение температуры, характер формоизменения и течения металла и др. Ряд работ, посвященных исследованиям особенностей непрерывной экструзии [29-32], свидетельствуют о перспективности применения МКЭ-моделирования для получения теоретических знаний о технологическом процессе.

Цель данной работы состояла в изучении физико-механических процессов и исследовании структурной эволюции в процессе экструзии прямоугольных шин размером 10×60 мм из бескислородной меди М1б. Был использован комплексный подход к решению поставленных задач, который включает МКЭ-моделирование и лабораторное исследование, позволяющие в достаточной мере проанализировать характер протекания физических процессов и формирования структуры материала в очаге деформации.

Материалы и методы исследования

Методы компьютерного моделирования

Изучение напряженно-деформированного состояния в очаге деформации процесса непрерывного прессования выполняли в программе конечно-элементного моделирования QForm. По чертежам установки TLJ400 (DKTC Ltd., Китай) создали объемную модель инструмента (рис. 1), состоящую из рабочего колеса 1, прижимного ролика 2, башмачной клети 3 и сборного пресс-контейнера, включающего пресс-камеру 4 с матрицей 5 и упором 6. Скорость вращения рабочего колеса (скорость прессования) установили равной 4 об/мин (4 м/мин соответственно). В качестве материала матрицы, из стандартной библиотеки програм-



Рис. 1. 3D-модель рабочего узла установки непрерывного прессования Fig. 1. 3D model of the continuous pressing machine working unit

мы [33], выбрана сталь 4Х5МФ1С, а для всех остальных деталей рабочего узла — сталь 40Х.

Материалом объекта моделирования (заготовки) служила медь Cu-ETP (ISO 197-1:1983) — наиболее близкий аналог М1б (ГОСТ 859-2014), имеющийся в библиотеке деформируемых материалов [33]. Физические свойства и функции, описывающие сопротивление деформации сплава М1б, представлены для диапазона температур 20— 650 °С и скоростей деформации 1,0—10—50 с⁻¹ [34]. Размеры использованной для моделирования заготовки составили Ø 20×1000 мм.

В разрабатываемой модели было принято условие простого теплообмена между инструментом, заготовкой и окружающей средой, которое может быть описано уравнением

$$q_{\Pi} = b\alpha(T_1 - T_2), \tag{1}$$

где q_{Π} — плотность теплового потока, Вт/м²; b — коэффициент паузы, применяемый при отсутствии деформации заготовки; α — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·K); T_1 — температура заготовки, K; T_2 — температура инструмента, K.

При таком условии теплообмена температура по объему инструмента не изменяется, за исключением небольшого поверхностного слоя малой толщины, что позволяет многократно ускорить процесс расчета. Температура инструмента в модели рабочего узла Конформ принята комнатной (20 °C), а температура заготовки, непосредственно перед подачей в очаг деформации, составляет 150 °C, что обусловлено распространенной производственной практикой подогрева переднего конца заготовки для увеличения пластичности материала на начальной стадии экструдирования.

Для описания трибологических характеристик материала заготовки использовали закон Зибеля, согласно которому удельная сила трения пропорциональна произведению максимального касательного напряжения при сдвиге и коэффициента пропорциональности, называемого также фактором трения. Для пары «заготовка—рабочее колесо» принимали фактор трения, равный 1 (медь по меди), что объясняется омеднением поверхности канавки рабочего колеса для увеличения содействующих прессованию активных сил трения. Для остальных пар «заготовка—инструмент» устанавливали фактор трения, равный 0,4 (медь—сталь).

В результате моделирования реализовано экструдирование прутковой заготовки в прямоугольную шину 10×60 мм длиной 100 мм, при этом достигнуто состояние установившегося процесса прессования, так как материалом заготовки заполнено все пространство пресс-камеры и отсутствуют резкие перепады ее температуры [35]. По результатам моделирования изучали поля распределения температуры и интенсивности скоростей деформации в заготовке, а также анализировали накопленную степень деформации и средние нормальные напряжения, возникающие в ней в процессе экструдирования.

Методы и оборудование эксперимента

Материалом для проведения производственнолабораторных исследований выбрана бескислородная медь марки М1б, полученная на предприятии ООО «Свелен» (г. Санкт-Петербург) огневым переплавом катодного лома под слоем древесного угля. Химический состав материала представлен в таблице.

На установке SL10-QL-S-B-8/20 (SDMMCo Ltd., Китай) методом непрерывного литья вверх (UPCAST[®]) со скоростью 300 мм/мин была получена прутковая заготовка диаметром 20 мм. Далее литой пруток экструдировали на установке TLJ 400 (DKTC Ltd., Китай) в шину размером 10×60 мм при скорости подачи заготовки в очаг деформации 4 м/мин. Данная установка оборудована рабочим колесом диаметром 400 мм (диаметр по поверхности ручья 353 мм), приводимым во вращение главным двигателем мощностью 160 кВт. Температура металла в очаге деформации в процессе прессования составляла 460 °C.

Для исследования процессов эволюции структуры и формирования свойств медных прямоугольных шин, происходящих непосредственно в

Химический состав меди марки М1б, мас.%

Chemical composition of M1b grade copper, wt.%

Си, не менее	Содержание примесей, не более										
	Bi	Fe	Ni	Zn	Sn	Sb	As	Pb	S	0	Р
99,95	0,001	0,004	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,004	0,004	0,003	0,002

очаге деформации, останавливали процесс экструзии и извлекали пресс-остаток из рабочего узла инструмента. Полученный таким образом темплет резали вдоль центрального вертикального сечения (рис. 2), чтобы затем изготовить из него образцы



Рис. 2. Снимок половины темплета с указанием зон очага деформации по центральному сечению

I – область упора; *II* – начало пресс-камеры; *III* – форкамера; *IV* – область матрицы; *V* – истечение из матрицы (контакт с охлаждающей жидкостью)

Fig. 2. Half template image indicating deformation zone along central section

I – abutment area; II – press chamber beginning; III – prechamber; IV – die area; V – die outflow (contact with cooling fluid)

для изучения параметров по длине очага деформации и его ширине с шагом 10 мм. Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе «Axio Scope. A1» (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия), а твердость вдоль сечения образцов измеряли на цифровом твердомере MH-6 (Metkon Instruments Ltd., Турция) по методу Виккерса при нагрузке 1000 г.

Обсуждение результатов

Результаты компьютерного моделирования

Физико-механические процессы, происходящие и развивающиеся непосредственно в очаге деформации при прессовании, оказывают существенное влияние как на сам технологический процесс экструдирования, так и на формирование функциональных свойств изделий.

На рис. 3 отображено изменение во времени расчетных параметров — момента на рабочем колесе и усилия, действующего на пресс-контейнер. Шкала времени здесь, а также на рис. 4, не регулярна, что является следствием изменения в ходе расчета величины шага моделирования. При вхождении прутка в зазор между рабочим колесом и прижимным роликом значения вращающего момента на колесе и усилия близки к нулю и мало изменяются вплоть до достижения заготовкой упора. В этот момент происходит резкое повышение величины момента до 6,6 кН·м, сохраняющееся до момента контакта металла с матрицей. При







Рис. 4. Зависимости изменения температуры заготовки от времени процесса экструдирования **Fig. 4.** Workpiece temperature versus extrusion time curves

этом усилие, оказываемое на пресс-контейнер, монотонно возрастает по мере заполнения пресс-камеры. С увеличением объема ее заполнения рост значений момента и усилия ускоряется и продолжается до полного заполнения пространства форкамеры и начала истечения металла, т.е. прохождения его через отверстие матрицы. Максимальные значения момента и усилия при этом достигают 12,26 кН·м и 1,54 МН соответственно. Далее, по мере выравнивания температуры в очаге деформации, происходит постепенное снижение значений момента вращения рабочего колеса и усилия на пресс-контейнер на 15 % от максимальных. Также стоит отметить колебания момента вращения, возникающие на установившемся этапе прессования (с 11-й секунды). Так как экструдирование происходит полностью за счет сил трения между прутком и канавкой рабочего колеса, то важно минимизировать скольжение между ними для обеспечения стабильности процесса экструзии. Результаты расчета показывают, что крутящий момент колеблется в небольшом диапазоне (±2 %), что свидетельствует о низком проскальзывании заготовки.

Для обработки результатов расчета температурной модели процесса выполняли трассировку точек, расположенных вдоль центральной оси заготовки. На рис. 4 приведен график изменения температуры для трех точек — P1, P2 и P3, которые удалены от переднего конца заготовки на расстояние 25, 250 и 400 мм соответственно. Выбор расстояния обусловлен стадиями процесса экструзии, которые отчетливо видны на рис. 3 и 4: так, точка P1 характеризует температуру металла на этапах заполнения канавки рабочего колеса и его вхождения в очаг деформации; P2 — соответствует стадии заполнения металлом пресс-камеры и начала истечения через отверстие матрицы; P3 — отображает период установившегося процесса непрерывного прессования.

На этапе продвижения металла вдоль башмака температура металла не изменяется, однако по достижении им упора происходит выделение большого количества тепла, разогревающего его до 300 °С (см. Р1 на рис. 4). Далее, по мере накопления металла в форкамере, температура в точке Р1 растет незначительно, только лишь за счет теплообмена с поступающими объемами материала. Кривая Р2 на рис. 4 свидетельствует о двух этапах разогрева рассматриваемого участка заготовки сперва небольшое количество тепла выделяется в уже заполненном канале рабочего колеса, в зоне входа в пресс-контейнер, затем точка достигает области упора, где вследствие сдвиговых деформаций металл разогревается до 400 °C. На стадии установившегося процесса прессования (см. РЗ на рис. 4) разогрев металла в канавке не выражен так ярко, как на предыдущей стадии, и происходит по мере прохождения точкой участка близ упора. В результате моделирования максимальная температура наблюдается на контакте материала прутка с упором и на последней стадии процесса составляет 457 °C, что не нашло отражения на кривых рис. 4 по причине небольшой отдаленности отслеживаемых точек при прохождении эпицентра температурного роста. Кривые Р2 и Р3 свидетельствуют о дальнейшем снижении температуры металла по мере его продвижения вдоль очага деформации.

Известия вузов. Цветная металлургия • Т. 27 • № 1 • 2021

На рис. 5 и 6 приведены поля распределения степени накопленной деформации, интенсивности скоростей [36] деформации и среднего напряжения в центральных сечениях очага деформации на стадии установившегося процесса экструзии. Как известно [37], степень накопленной деформации и компонента сдвиговой деформации в определенной степени оказывают влияние на изменение размера зерна в процессе пластической деформации. На стадии заполнения металлом канавки колеса степень накопленной деформации составляет всего 0,5—1,0 (рис. 5), однако по достижении им упора ее величина резко возрастает до средних значений 100-150 при максимуме 300-350, который обнаруживает себя непосредственно на участке контакта заготовки и упора (см. рис. 5, а).

Далее, в соответствии с реологическими особенностями процесса непрерывной экструзии, происходит заполнение металлом расширяющихся частей форкамеры и мертвых зон, где степень накопленной деформации сохраняет низкие значения (см. рис. 5). Проистекающий через матрицу материал характеризуется высокой степенью (40— 70) накопленной деформации в сердцевине шины, образованной там в ходе перемещения объема металла от упора, и средними значениями (20—30) на периферийных участках сечений, отображающими деформацию на входе в матрицу, которая заметна на полях распределения интенсивности скоростей деформации (см. рис. 6, *a*).

Результаты расчета распределения интенсивности скоростей деформации (см. рис. 6, *a*) также



Рис. 5. Распределение степени накопленной деформации в вертикальном (*a*) и горизонтальном (*б*) центральных сечениях очага деформации

Fig. 5. Distribution of accumulated plastic strain in vertical (a) and horizontal (δ) central sections of the deformation zone



Рис. 6. Распределение интенсивности скоростей деформации (*a*) и среднего напряжения (*б*) в вертикальном центральном сечении очага деформации

Fig. 6. Distribution of the intensity of strain rates (a) and average stress (b) in the vertical central section of the deformation zone

отчетливо свидетельствуют о том, что деформация металла происходит не только в области упора и входа в матрицу, но и на входе в пресс-камеру. Данная область очага деформации, определяемая авторами [35] как «зона полного контакта металла по сечению контейнера в результате распрессовки заготовки осаживанием», характеризуется замедлением течения металла, вызванным его контактным трением с неподвижным пресс-контейнером, что приводит к развитию деформации сдвига в указанной области.

На рис. 6, δ показано поле распределения по очагу деформации средних напряжений σ_m (МПа), которые определяются как треть суммы напряжений, расположенных на главной диагонали тензора напряжений:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}).$$
 (2)

Исходя из результатов моделирования можно сказать, что интенсивный рост среднего напряжения сжатия (характеризуется знаком «—») происходит при заполнении металлом зоны входа в пресс-камеру и продолжает стремительно расти вплоть до изменения направления течения отслеживаемой области в сторону матрицы. В точке, расположенной на контакте с упором, рядом с местом отвода облоя, наблюдается максимум напряжений сжатия, достигающий 1419 МПа, что объясняет возникновение очага температурного роста, отмеченного на рис. 4 (кривые Р2 и Р3).

Результаты эксперимента

Структура литого прутка диаметром 20 мм, использованного в качестве заготовки для эксперимента по непрерывной экструзии Конформ, характеризуется достаточно крупными зернами, которые отчетливо видны даже при рассмотрении без средств микроскопии. В работе [38] по изучению эволюции микроструктуры в процессе прессования прутков отмечается, что размер зерен литого прутка составляет 800—1000 мкм.

На рис. 7 приведены снимки микроструктуры полученного образца в разных зонах очага деформации. В зоне A отмечается наличие уже измельченной структуры с размером зерен 10—15 мкм, что несколько меньше, чем в остальных рассматриваемых участках образца (см. рис. 7, зоны E и B). Это объясняется тем, что в указанной части очага деформации (A) действует наибольший уровень напряжений сжатия (рис. 6, δ), а также гораздо быстрее развивается процесс деформации (рис. 6, a). Для зоны E характерно наличие более крупных зерен (40—50 мкм), что, скорее всего, вызвано спадом уровня действующих в металле напряжений, а также развитием рекристаллизационных процес-



Рис. 7. Микроструктура образца пресс-остатка в центральном вертикальном сечении
в зонах входа в пресс-камеру (*A*), форкамеры (*B*) и матрицы (*B*) **Fig. 7.** Microstructure of discard in the central vertical section at press chamber (*A*), prechamber (*B*) and die (*B*) inlet areas

сов, обусловленных повышением температуры материала при его прохождении через область вблизи упора. После прохождения металлом матрицы его структура приобретает заметную ориентировку (см. рис. 7, зона *B*), характерную для процессов прокатки или прессования. Размеры кристаллической структуры также претерпевают изменения — зерно в среднем измельчается до 25—30 мкм за счет деформации материала на входе в матрицу (см. рис. 5, *a*), отмеченной ранее.

На рис. 8 представлены результаты измерения микротвердости материала вдоль очага деформации с момента поступления заготовки в пресс-камеру до выхода экструдируемой шины из матрицы в охлаждаемую среду. Измерения проводили на образцах, отобранных от центрального вертикального сечения пресс-остатка с шагом 10 мм по ширине темплета: так, кривые C0—C3 (см. рис. 8) описывают микротвердость образцов в сечениях, смещенных на 0—30 мм от центрального вертикального сечения.

Рассмотрим изменение твердости вдоль центрального сечения (рис. 8, C0). При поступлении материала заготовки в пресс-камеру происходит выделение значительного количества тепла (450 °C), и это сопровождается падением твердости с 93 до 67 HV. По мере накопления материала в форкамере и его продвижения к матрице твердость повышается до 79 HV за счет деформации и, как следствие, измельчения зеренной структуры (см. рис. 7, зона *B*). Пройдя через матрицу, материал продолжает испытывать запущенные на входе в очаг деформации процессы рекристаллизации, и твердость вновь снижается до 74 HV. На выходе из калибровочной матрицы шина контактирует с охлаждающим раствором, что приводит к повторному росту твердости металла практически до исходных значений.

Сложное изменение твердости материала на пути его прохождения через очаг деформации процесса Конформ коррелирует с изменением величины зерна на соответствующих стадиях (см. рис. 7). На равноудаленных от центрального сечения линиях измерения твердости (см. рис. 8, С1 и С2) закономерности ее формирования сохраняются с небольшой разницей максимальных и минимальных значений, связанной с высокой теплопроводностью меди и контактными условиями, практически не поддающимися контролю.

Кривая С3, описывающая изменение микротвердости вдоль образца, отобранного на расстоянии 30 мм по ширине пресс-остатка от его центрального сечения, показывает отличающийся характер изменения параметра твердости. На длине очага деформации 20—24 мм прослеживается нехарактерный для линий других сечений (см. рис. 8, C0, C1, C2) рост твердости с 57 до 68 HV, что объясняется крупной структурой зерна в этой области (рис. 9, зона *A*). На снимке макроструктуры отчетливо видна граница между объемом металла, подверженного течению в процессе прессования, характеризуемым мелкими зерна-



Рис. 8. Распределение твердости вдоль сечений очага деформации в процессе непрерывного прессования **Fig. 8.** Hardness distribution along deformation zone sections during continuous pressing



Рис. 9. Макро- и микроструктура образца в сечении C3
в мертвой зоне очага деформации (A) и зоне течения металла (Б)
Fig. 9. Sample macro and micro structure in C3 section in the deformation zone dead area (A) and metal flow area (Б)

ми размером 30—40 мкм (рис. 9, зона *Б*), и объемом металла, располагающегося вдоль стенок форкамеры (мертвых зон), который не подвержен деформации, что подтверждает результаты моделирования (см. рис. 5, *a*). Здесь размер кристаллов возрастает вследствие действия высокой температуры до 300—400 мкм.

Заключение

Выполнено комплексное изучение напряженно-деформированного состояния, а также особенностей формирования структуры и механических свойств в очаге деформации в процессе непрерывного прессования прямоугольных шин из меди М16 с применением методов теоретического и экспериментального исследований.

В результате проведенного моделирования получены данные о величинах момента вращения на рабочем колесе и усилия, действующего на пресс-контейнер и матрицу. Рост указанных значений происходит с момента заполнения заготовкой пространства канавки рабочего колеса и достижения упора и продолжается вплоть до момента начала истечения металла через матрицу, согласующегося с общим ростом средней температуры в очаге деформации до 450 °C.

Проанализированы расчетные поля распределений степени накопленной деформации, интенсивности скоростей деформации и средних напряжений, действующих в очаге деформации. Выявлено, что на стадии установившегося процесса экструдирования металл испытывает максимальную степень накопленной деформации и напряжений в зоне его контакта с упором. Величина напряжений сжатия достигает своего максимума на уровне 1419 МПа, что безусловно является причиной возникновения очага роста температуры на контакте «металл—упор». Картина распределения интенсивности скоростей деформации позволила обнаружить зону замедленного течения металла, которая оказывает влияние на формирование общего температурного фона процесса непрерывной экструзии.

Изучение макро- и микроструктур образцов из различных продольных сечений очага деформации показало, что формирование микроструктуры меди М1б в процессе прессования носит сложный характер, — это обусловлено конфигурацией самого очага деформации и физическими характеристиками бескислородной меди. Претерпевая в процессе экструдирования как измельчение, так и рост, кристаллическая структура металла приобретает на выходе из матрицы ориентированную в направлении истечения структуру со средней величиной зерна 25—30 мкм.

Результаты измерения микротвердости образцов согласуются со структурными исследованиями и прямо коррелируют с размером зеренной структуры в рассмотренных участках очага деформации. Следует подчеркнуть, что неоднократное изменение величины зерна в процессе Конформ, сопровождающееся изменением твердости материала, может являться причиной формирования существенной неоднородности свойств полученного изделия. Поэтому нередко требования ГОСТ 434-78 для шин категории «мягкого состояния» не выполняются, и для приведения изделия в требуемое состояние необходимо проведение равновесного отжига.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90104 и Фонда содействия инновациям в рамках программы «УМНИК» (договор от 19.12.2019 г. № 14903ГУ/2019).

Funding: The study was carried out under financial support of the Russian Foundation for Basic Research as part of Project No. 19-38-90104 and Innovation Promotion Fund as part of the «UMNIK» program (Contract No. 14903ГУ/2019 dated 19.12.2019).

Литература/References

- 1. *Davis J.R.* Copper and copper alloys. OH: ASM International, 2003.
- Smith W.F., Hashemi J. Foundations of materials science and engineering. Boston: McGraw-Hill Professional, 2003.
- Зиновьев А.В., Часников А.Я., Потапов П.В. Физикомеханические свойства и пластическая деформация меди и ее сплавов. М.: ИРИАС, 2009. Zinoviev A.V., Chasnikov A.Ya., Potapov P.V. Physical and mechanical properties and plastic deformation of copper and its alloys. Moscow: IRIAS, 2009 (In Russ.).
- Шаталов Р.Л., Лукаш А.С., Зисельман В.Л. Определение механических свойств медных и латунных полос по показателям твердости при холодной прокатке. Цвет. металлы. 2014. No. 5. C. 61—65. Shatalov R.L., Lukash A.S., Zisel'man V.L. Definition of mechanical properties of copper and brass strips on indices of hardness factors in the time of cold rolling. Tsvetnye Metally. 2014. No. 5. P. 61—65 (In Russ.).
- Зиновьев А.В., Соколов П.Ю., До Ван Минь, Часников А.Я. Исследование сопротивления деформации простых латуней. Цвет. металлургия. 2015. No. 5. C. 24—25 Zinoviev A.V., Sokolov P.Yu., Do Van Min', Chasnikov A.Ya. Research of resistance of deformation of simple bras-

ses. *Tsvetnaya Metallurgiya*. 2015. No. 5. P. 24–25 (In Russ.).

 Зиновьев А.В., Шмурыгин Е.Г., Морозов Г.П., Луговов В.Ф., Лобков А.И. Повышение эффективности производства листов, полос и лент, сплавов на основе меди и никеля. М.: Металлургия, 1996.

Zinoviev A.V., Shmurygin E.G., Morozov G.P., Lugovov V.F., Lobkov A.I. Increasing the production efficiency of plates, sheets and strips of alloys based on copper and nickel: monograph. Moscow: Metallurgiya, 1996 (In Russ.).

Логинов Ю.Н., Шалаева М.С. Эволюция микронеровностей внутренней поверхности медных труб при волочении. Известия вузов. Цветная металлургия. 2014. No. 3. C. 39–44. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-3-39-44.

Loginov Yu.N., Shalaeva M.S. Evolution of microroughnesses of copper pipes' inside surface in drawing. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy).* 2014. No. 3. P. 39–44 (In Russ.).

- Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Prog. Mater. Sci.* 2006. Vol. 51. No. 7. P. 881–981. https:// doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003.
- Wang Y.L., Lapovok R., Wang J.T., Qi Y.S., Estrin Y. Thermal behavior of copper processed by ECAP with and without back pressure. *Mater. Sci. Eng. A.* 2015. Vol. 628. P. 21–29. https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.01.021.
- Gamin Yu.V., Romantsev B.A., Pashkov A.N., Patrin P.V., Bystrov I.A., Fomin A.V., Kadach M.V. Obtaining hollow semifinished products based on copper alloys for electrical purposes by means of screw rolling. Russ. J. Non-Ferr. Met. 2020. Vol. 61. P. 162–171. https://doi.org/10.3103/ S1067821220020054.
- Валеев И.Ш., Валеева А.Х. Изменение микротвердости и микроструктуры меди М1 при радиально-сдвиговой прокатке. Письма о материалах. 2013. Т. 3. No. 1. С. 38—40. https://doi.org/10.22226/2410-3535-2013-1-38-40.

Valeev I.Sh., Valeeva A.Kh. On the microhardness and microstructure of copper Cu 99,99 % at radial-shear rolling. *Pis'ma o materialakh.* 2013. Vol. 3. No. 1. P. 38–40 (In Russ.).

- Skripalenko M.M., Galkin S.P., Sung H.J., Romantsev B.A., Huy T.B., Skripalenko M.N., Kaputkina L.M., Sidorow A.A. Prediction of potential fracturing during radial-shear rolling of continuously cast copper billets by means of computer simulation. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. P. 849– 856. https://doi.org/10.1007/s11015-019-00728-8.
- 13. Иванов А.М. Прессование призматических и винтовых профилей из меди М4. Известия вузов. Цвет-

ная металлургия. 2017. No. 3. C. 77—84. https://doi. org/10.17073/0021-3438-2017-3-77-84.

Ivanov A.M. Press forming of prismatic and screwshaped sections of M4 copper. Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy). 2017. No. 3. P. 77–84 (In Russ.).

- Vu V.Q., Prokof'eva O., Toth L.S., Usov V., Shkatulyak N., Estrin Y., Kulagin R., Varyukhin V., Beygelzimer Y. Obtaining hexagon-shaped billets of copper with gradient structure by twist extrusion. Mater. Charact. 2019. Vol. 153. P. 215–223. https://doi.org/10.1016/j. matchar.2019.04.042.
- Адно Ю.Л. Феномен металлургических мини-заводов. Мировая экономика и междунар. отношения. 2014. No. 3. C. 34—45.

Adno Yu.L. The phenomenon of metallurgical mini-mills. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya.* 2014. No. 3. P. 34–45 (In Russ.).

- Green D. Continuous extrusion-forming of wire section. J. Inst. Metals. 1972. Vol. 100. P. 295–300.
- BWE Ltd Brochure. BWE Limited. URL: https:// bwe.co.uk/wp-content/uploads/2020/04/BWE-Ltd-Brochure-Website-After-Proof.pdf (accessed: 25.05.2020).
- Константинов И.Л., Сидельников С.Б. Основы технологических процессов обработки металлов давлением. Красноярск: СФУ, 2015.

Konstantinov I.L., Sidelnikov S.B. Basics of metal forming processes. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2015 (In Russ.).

 Горохов Ю.В., Солопко И.В., Суслов В.П., Крылов М.А. Особенности пластического течения материала заготовки в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом «Конформ». Цвет. металлы. 2010. No. 12. C. 69—71.

Gorokhov Yu.V., Solopko I.V., Suslov V.P., Krylov M.A. Features of the plastic current of billet material in deformation area at conform continuous extrusion. *Tsvetnye Metally.* 2010. No. 12. P. 69–71 (In Russ.).

 Шимов Г.В., Фоминых Р.В., Ефремова А.С., Ковин Д.С. Исследование траектории течения непрерывно-литой меди при прессовании способом Conform. Цвет. металлы. 2018. No. 4. C. 79—85. https://doi.org/10.17580/ tsm.2018.04.11.

Shimov G.V., Fominykh R.V., Efremova A.S., Kovin D.S. Study of flow trajectories of continuously cast copper during the Conform pressing. *Tsvetnye Metally.* 2018. No. 4. P. 79–85 (In Russ.).

21. Фоминых Р.В., Шимов Г.В., Ефремова А.С., Лямина Э.А. Экспериментальное исследование причин брака медных шин при прессовании на линии непрерывной экструзии «Conform-400». В сб.: Материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов — молодых ученых (г. Екатеринбург, 21—23 нояб. 2017 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 47—53.

Fominykh R.V., Shimov G.V., Efremova A.S., Lyamina E.A. Experimental study of causes of refused of copper busbares while pressing on the line of continuous extrusion «Conform-400». In: Proceedings of the XVIII International scientific and technical Ural summer school for young scientists-metallurgists» (Russia, Ekaterinburg, 21–23 Nov. 2017). Ekaterinburg: Ural Federal University, 2017. P. 47–53 (In Russ.).

- Song L., Yuan Y., Yin Zh. Microstructural evolution in Cu—Mg alloy processed by conform. Int. J. Nonferr. Met. 2013. Vol. 2. No. 3. P. 100—105. http://dx.doi.org/10.4236/ ijnm.2013.23014.
- Yuan Y, Li Z., Xiao Z., Zhao Z., Yang Z. Microstructure evolution and properties of Cu—Cr alloy during continuous extrusion process. J. Alloys Compd. 2017. Vol. 703. P. 454—460. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.355.
- Li B., Li Ch., Yao X., Song B. Effects of continuous extrusion on microstructure evolution and property characteristics of brass alloy. *Adv. Mater. Res.* 2011. Vol. 189–193.
 P. 2921–2924. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.2921.
- Li B., Wei Q., Pei J.-Y., Zhao Y. Flow characteristics of brass rod during continuous extrusion. *Procedia Eng.* 2014. Vol. 81. P. 647–651. https://doi.org/10.1016/j. proeng.2014.10.054.

 Мочалин И.В., Горохов Ю.В., Беляев С.В., Губанов И.Ю. Экструдирование медных шин на установке «Конформ» с форкамерой. Цвет. металлы. 2016. No. 5. C. 75—78. https://doi.org/10.17580/tsm.2016.05.12. Mochalin I.V., Gorokhov Yu.V., Belyaev S.V., Gubanov I.Yu. Copper busbars extrusion on «Conform» installation with prechamber. Tsvetnye Metally. 2016. No. 5. P. 75—78 (In Russ.).

 Горохов Ю.В., Тимофеев В.Н., Беляев С.В. Авдулов А.А., Усков И.В., Губанов И.Ю., Авдулова Ю.С., Иванов А.Г. Прессовый узел установки Conform для непрерывного прессования цветных металлов. Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. No. 4. C. 69—75. https:// doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-69-75.

Gorokhov Yu.V., Timofeev V.N., Belyaev S.V., Avdulov A.A., Uskov I.V., Gubanov I.Yu., Avdulova Yu.S., Ivanov A.G. Die assembly of the Conform unit for continuous non-ferrous metal forming. Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy). 2017. No. 4. P. 69–75 (In Russ.).

28. Горохов Ю.В., Тимофеев В.Н., Губанов И.Ю., Плотни-

кова Т.А., Иванов А.Г. Модернизация конструкции установки Конформ. Сборник докладов девятого международного конгресса «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 11—15 сент. 2017 г.). Красноярск: ООО «Научно-инновационный центр», 2017. С. 591—596.

Gorokhov Yu.V., Timofeev V.N., Gubanov I.Yu., Plotnikova T.A., Ivanov A.G. Modernization of the Conform installation construction. In: Book of papers of the ninth International Congress «Non-Ferrous Metals & Materials» (Russia, Krasnoyarsk, 11–15 Sept. 2017). Krasnoyarsk: Nauchnoinnovatsionnyi tsentr, 2017. P. 591–596 (In Russ.).

- Katajarinne T., Manninen T., Ramsay P. Numerical simulation of flash formation in continuous rotary extrusion of copper. J. Mater. Process. Technol. 2006. Vol. 177. No. 1–3. P. 604–607. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec. 2006.04.054.
- Yun X., You W., Zhao Y., Li B., Fan Z. Continuous extrusion and rolling forming velocity of copper strip. *Trans.* Nonferr. Met. Soc. China. 2013. Vol. 23. P. 1108–1113. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62572-8.
- Ershov A.A., Loginov Y.N. Simulation of the Conform-type pressing process by using the QFORM VX software complex. *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. P. 207–211. https://doi. org/10.1007/s11015-018-0646-6.
- 32. Шимов Г.В., Ковин Д.С., Фоминых Р.В., Богатов А.А. Моделирование начальной стадии заполнения форкамеры при прессовании медной шины на линии непрерывной экструзии «Conform-400». В сб.: Материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов — молодых ученых (г. Екатеринбург, 21—23 нояб. 2017 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 599—603.

Shimov G.V., Kovin D.S., Fominykh R.V., Bogatov A.A. Modeling of the initial stage of the prechamber filling while copper busbares pressing on the continuous extrusion line «Conform-400». In: *Proceedings of the XVIII International scientific and technical Ural summer school for young scientists-metallurgists*» (Russia, Ekaterinburg, 21–23 Nov. 2017). Ekaterinburg: Ural Federal University, 2017. P. 599–603 (In Russ.).

QuantorForm2019. URL: https://qform3d.com. (accessed: 26.11.2019).

34. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия, 1983. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. Resistance to plastic deformation of metals and alloys: Handbook. Moscow: Metallurgiya, 1983 (In Russ.).

 Горохов Ю.В., Шеркунов В.Г., Довженко Н.Н., Беляев С.В., Довженко И.Н. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов. Красноярск: СФУ, 2013.

Gorokhov Yu.V., Sherkunov V.G., Dovzhenko N.N., Belyaev S.V., Dovzhenko I.N. Continuous extrusion of metals: Basics of process design. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013 (In Russ.).

- 36. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: Учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1986. Kolmogorov V.L. Mechanics of metal forming. Moscow: Metallurgiya, 1986 (In Russ.).
- Hallberg H., Wallin M., Ristinmaa M. Modeling of continuous dynamic recrystallization in commercial-purity aluminum. *Mater. Sci. Eng. A.* 2010. Vol. 527. No. 4–5. P. 1126–1134. https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.043.
- Zinoviev A.V., Koshmin A.N., Chasnikov A.Y. Effect of continuous extrusion parameters on alloy M1 round section bar microstructure and mechanical property formation. *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. P. 422–428. https://doi. org/10.1007/s11015-019-00838-3.