

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ СПОСОБОМ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

© 2020 г. Ю.В. Гамин, Б.А. Романцев, А.Н. Пашков, П.В. Патрин,
И.А. Быстров, А.В. Фомин, М.В. Кадач

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

МИРЭА – Российский технологический университет, филиал, г. Фрязино

Статья поступила в редакцию 29.07.19 г., доработана 07.10.19 г., подписана в печать 09.10.19 г.

Предложен способ получения полуфабрикатов в виде труб из медных сплавов электротехнического назначения методом винтовой прокатки. Представлены результаты экспериментальной прошивки и прокатки образцов труб из заготовок медного сплава Cu–0,75Cr диаметром 45 мм. Полученные образцы размером 43,5×10,0 мм после прошивки в двухвалковом стане винтовой прокатки имели точные геометрические размеры: отклонение по наружному диаметру на переднем конце – до 1 %, на заднем конце – до 2,4 %, относительная поперечная разностенность на переднем конце составила 0,3±0,5 %, на заднем конце – 0,5±1,0 %. Далее прошитые образцы труб были прокатаны на трехвалковом министане радиально-сдвиговой прокатки (РСП) с разной суммарной степенью обжатия – получены образцы с наружным диаметром 30, 25 и 18 мм. Процесс редуцирования проанализирован с точки зрения стабильности и формоизменения внутреннего отверстия. При относительном обжатии наружного диаметра на 30 % прокатка без оправки сопровождается увеличением толщины стенки. При этом отклонения внутреннего диаметра находятся в допустимых пределах. Проведенные эксперименты по получению образцов из сплава Cu–0,75Cr способом винтовой прошивки и редуцирования в стане РСП показывают, что данная схема может быть принципиально реализована в промышленности. В то же время для получения качественного продукта необходимо уточнение параметров деформации (степени деформации, выбора схемы редуцирования). Рассмотрены различные варианты термообработки (ТО) полученных образцов труб и влияние способа ТО на электропроводность и твердость. Образцы после прошивки имели электропроводность 59,3 % IACS. Максимальная электропроводность 76,7 % IACS получена на образцах после закалки с температуры 1020 °С и старения при 450 °С в течение 3 ч. Результаты работы показывают принципиальную возможность получения полуфабрикатов изделий из медных сплавов электротехнического назначения способом винтовой прокатки.

Ключевые слова: полуфабрикат, медный сплав, винтовая прокатка, прошивка, радиально-сдвиговая прокатка, редуцирование труб, электропроводность.

Гамин Ю.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением (ОМД) НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: y.gamin@mail.ru.

Романцев Б.А. – докт. техн. наук, профессор кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: boratr@yandex.ru.

Пашков А.Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники филиала МИРЭА (141190, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а, к. 1). E-mail: a.n.pashkov@yandex.ru.

Патрин П.В. – аспирант кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: patrinder@yandex.ru.

Быстров И.А. – магистр кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: ilbystr@yandex.ru.

Фомин А.В. – канд. техн. наук, вед. инженер кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: fominmisis84@mail.ru.

Кадач М.В. – зав. лабораторией кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: stendek89@yandex.ru.

Для цитирования: Гамин Ю.В., Романцев Б.А., Пашков А.Н., Патрин П.В., Быстров И.А., Фомин А.В., Кадач М.В. Получение полых полуфабрикатов изделий из медных сплавов электротехнического назначения способом винтовой прокатки. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2020. No. 1. С. 27–38.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-27-38.

Gamin Yu.V., Romantsev B.A., Pashkov A.N., Patriner P.V., Bystrov I.A., Fomin A.V., Kadach M.V.

Obtaining hollow semi-finished products from copper alloys for electrical applications by screw rolling method

The article proposes a process for obtaining semi-finished products in the form of pipes made of copper alloys for electrical applications using the screw rolling method. The paper presents the results of experimental piercing and rolling of pipe samples made of Cu–0.75Cr

copper alloy billets with a diameter of 45 mm. The 43.5×10.0 mm samples obtained after piercing using a two-roll screw rolling mill had exact geometrical dimensions: outer diameter deviation at the front end was up to 1 %, at the back end – up to 2.4 %; relative variation in wall thickness at the front end was 0.3±0.5 %, at the rear end – 0.5±1.0 %. Then pierced pipe samples were rolled using a three-roll radial-shear rolling (RSR) mini mill with a different total degree of reduction – samples were obtained with an outer diameter of 30, 25 and 18 mm. The reduction process was analyzed from the point of view of internal hole stability and deformation. In case of 30 % relative reduction of the outer diameter, rolling without a mandrel is accompanied by wall thickening. In this case, inner diameter deviations are within acceptable limits. The experiments on obtaining samples from the Cu–0.75Cr alloy by screw piercing and reduction in the RSR mill show that this scheme can be implemented in principle in industry. At the same time it is necessary to define more exactly deformation parameters (degree of deformation, choice of reduction scheme) to obtain a quality product. Various options for heat treatment (HT) of the obtained pipe samples and the effect of the HT method on electrical conductivity and hardness are considered. Samples after piercing had a conductivity of 59.3 % IACS. The maximum electrical conductivity of 76.7 % IACS was obtained on samples after quenching from a temperature of 1020 °C and aging at 450 °C for 3 h. The results of the work show the fundamental possibility of obtaining semi-finished products from copper alloys for electrical purposes using the screw rolling method.

Keywords: semi-finished product, copper alloy, screw rolling, piercing, radial-shear rolling, pipe reduction, electrical conductivity.

Gamin Yu.V. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of metal forming, National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: y.gamin@mail.ru.

Romantsev B.A. – Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: boralr@yandex.ru.

Pashkov A.N. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of electronics and microelectronics, MIREA – Russian Technological University, branch in Fryazino (119049, Russia, Moscow region, Fryazino, Vokzalnaya str., 2a, 1). E-mail: a.n.pashkov@yandex.ru.

Patrin P.V. – graduate student of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: patrinder@yandex.ru.

Bystrov I.A. – master of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: ilbystr@yandex.ru.

Fomin A.V. – Cand. Sci. (Tech.), lead engineer of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: fominmisis84@mail.ru.

Kadach M.V. – head of the laboratory of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: stendek89@yandex.ru.

Citation: Gamin Yu.V., Romantsev B.A., Pashkov A.N., Patrin P.V., Bystrov I.A., Fomin A.V., Kadach M.V. Obtaining hollow semi-finished products from copper alloys for electrical applications by screw rolling method. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 1. P. 27–38 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-27-38.

Введение

В электротехнике, энергетическом машиностроении, авиастроении, автомобилестроении и других отраслях крупносерийными партиями используется прокат из низколегированных медных сплавов [1–3]. Однако в некоторых производствах существует необходимость в получении полуфабрикатов ограниченного марочного и размерного сортамента. Для данного сортамента возможно установить общие закономерности уровня свойств и структуры, выбора схемы производства и параметров изготовления полуфабрикатов.

Благодаря высоким значениям электро- и теплопроводности в сочетании с высокой прочностью и коррозионной стойкостью низколегированные медные сплавы широко применяются при изготовлении проводников электричества, электродов для контактной сварки и другой арматуры машин сварки сопротивлением, кристаллизаторов, теплообменных агрегатов и др. [1, 4]. Для этих целей в основном используют хромовые

бронзы, которые являются типичными дисперсионно-твердеющими сплавами. Они отличаются от других низколегированных бронз оптимальным сочетанием физических, механических и эксплуатационных свойств, которые формируются в процессе обработки давлением и термообработки. Удельный объем хромосодержащих бронз в общей номенклатуре низколегированных медных сплавов достигает 60 %, из которых около 90 % приходится на сплавы систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr [1]. Поэтому вопросы повышения свойств и поиск новых способов обработки хромистых бронз являются для производств весьма актуальными.

В последние годы большое количество работ посвящено исследованиям механических свойств и влиянию прокатки и последующей термообработки на эксплуатационные свойства медных сплавов [5, 6]. Авторы [7] представили результаты прокатки медных труб в трехвалковом планетарном стане. Ими были разработаны модели дина-

мической рекристаллизации и роста зерна в процессе интенсивной деформации. Было показано, что значительный деформационный разогрев в процессе интенсивной деформации приводит к изменению размера зерна и свойств материала заготовки. Аналогичные исследования проводились в работе [8] на промышленной чистой меди TP2. Авторы [9] разработали двухстадийный процесс прокатки и старения для изготовления сплавов Cu—Cr—Zr с сочетанием свойств высокой прочности (648 МПа) и высокой электропроводности (79,8 % IACS).

В статье [10] описано исследование механических свойств полос из медного сплава системы Cu—Cr—Zr после процесса горячей прокатки-закалки. Установлены оптимальные температуры горячей прокатки и режимы термической обработки для достижения сочетания свойств твердости и электропроводности.

Авторы [11] разработали новый вид сплава состава Cu—Zn—Cr и провели исследование свойств данного сплава в зависимости от параметров термомеханической обработки, состоящей из гомогенизации, горячей прокатки, solution (отжиг), холодной прокатки и старения.

Проведенный анализ научной литературы дает возможность выделить два основных этапа производства изделий электротехнического назначения из сплавов системы Cu—Cr (Cu—Cr—Zr): 1) получение полуфабрикатов, предполагающее изготовление слитка или исходной заготовки, их горячую деформацию и термообработку; 2) изготовление готовой продукции, включающее, чаще всего, холодную деформацию и термообработку. При этом в процессе производства полуфабрикатов из сплавов электротехнического назначения возможно применение термической обработки двух основных видов: рекристаллизационного отжига и закалки с последующим старением [1, 12]. При использовании дисперсионно-твердеющих сплавов применяют второй тип термообработки и закалку производят после горячей деформации. В результате закалки приобретает требуемое сочетание физических, механических и эксплуатационных свойств.

Для повышения механических свойств сплавы Cu—Cr (Cu—Cr—Zr), как правило, подвергаются пластической деформации. Прокатка в этом смысле является наиболее универсальным способом, с ее помощью получают изделия и полуфабрикаты самых разнообразных форм и размеров. Для

элементов, используемых в сварочных машинах (электродов, втулок, арматуры и пр.), чаще всего требуются полуфабрикаты в форме трубы с достаточно толстой стенкой и небольшим внутренним диаметром. Такие изделия работают в жестких температурно-силовых условиях, поэтому должны обладать хорошим сочетанием высокой прочности и электропроводности.

Для получения труб из черных и цветных металлов в промышленности применяются различные сочетания оборудования в зависимости от требуемой производительности, размерного сортамента и других факторов [13–15]. Толстостенные трубы с отношением наружного диаметра к толщине стенки $D/S < 6$ чаще всего изготавливают способами винтовой прошивки с последующей раскаткой или калибровкой-редуцированием в трехвалковом стане винтовой прокатки [16–18]. Авторами [19] описан способ получения толстостенных титановых труб из марки VT1-0 методом прошивки с последующим редуцированием в трехвалковом стане винтовой прокатки. Редуцирование проводилось без оправки с контролируемым увеличением толщины стенки трубы, что обеспечивается выбором режимов обжатия и калибровкой валков.

В ряде работ [20, 21] описано конечно-элементное моделирование (FEM) процесса прокатки труб на трехвалковых станах винтовой прокатки (в трехвалковом стане для раскатки гильз и трехвалковом планетарном стане). Определены закономерности формоизменения металла в очаге деформации, получены распределения эквивалентных напряжений и пластической деформации, а также показаны скорости прокатки по очагу деформации. Эти данные могут быть полезны при проектировании оборудования, расчетах деформационных параметров и разработке калибровки инструмента.

В настоящей статье предложена схема получения полуфабрикатов труб из медных сплавов системы Cu—Cr (Cu—Cr—Zr), которая основана на деформации в станах винтовой прокатки методом прошивки и последующего редуцирования. Прошивка выполняется на двухвалковом стане с направляющими линейками или дисками. Редуцирование труб реализуется в трехвалковом министане радиально-сдвиговой прокатки (РСП). При этом возможно редуцирование по различным схемам деформации в зависимости от требуемых размеров полуфабриката: безоправочное редуци-

рование; редуцирование на удерживаемой цилиндрической оправке; редуцирование на плавающей цилиндрической оправке.

Рассмотрены также особенности проведения экспериментальных исследований получения полуфабрикатов из хромистой бронзы, а также выполнено компьютерное моделирование редуцирования по различным схемам.

Экспериментальная прошивка и прокатка

Известно, что независимо от химического состава медных низколегированных сплавов значения их прочности и пластичности располагаются в достаточно узких интервалах [12]. Поэтому при выборе схемы деформирования, степени деформации по проходам, суммарной степени деформации в данном случае необходимо учитывать состав оборудования, форму и размеры производимого полуфабриката. Кроме того, схема производства должна выбираться исходя из условий эксплуатации изделий. В качестве наружного корпуса для электродной проволоки в сварочных машинах используются полые толстостенные втулки из хромистой бронзы диаметром 25—30 мм. С точки зрения размеров и производительности такие изделия относятся к сортаменту и области применения министанов [22]. Экспериментальные исследования выполнялись для полуфабрикатов данных изделий.

В качестве материала исходной заготовки для прошивки и редуцирования была использована низколегированная бронза Cu—0,75Cr. По результатам анализа на оптико-эмиссионном спектрометре «Q4 Tasman» (Bruker, США) ее химический состав был следующим, мас. %: Cu — 99,06, Cr — 0,744, Zr — 0,03, Au — 0,02, Pb — 0,024, примеси — 0,122.

Исходная заготовка представляла собой цилиндр диаметром 45 мм и длиной 300 мм. Для обеспечения стабильного захвата и повышения точности геометрических размеров гильз на переднем торце заготовок выполнено зацентровочное углубление диаметром 12 мм и глубиной 10—15 мм.

Прошивка производилась на двухвалковом прошивном стане с биконическими бочковидными валками и направляющими линейками. Принципиальная схема очага деформации и геометрические параметры рабочего инструмента показаны на рис. 1.

Размеры рабочего инструмента и параметры процесса винтовой прошивки представлены ниже:

Диаметр заготовки, мм	45
Длина заготовки, мм	300
Температура нагрева заготовки, °С	860
Диаметр валка в пережиме, мм	430
Входной / выходной угол валка, град	2,5 / 3
Длина бочки валка, мм	320
Длина пережима валка, мм	20
Угол подачи валка, град	12
Диаметр / длина оправки, мм	23 / 75
Угол конусности оправки, град	5
Диаметр носка оправки, мм	12
Расстояние между валками, мм	39
Расстояние между линейками, мм	43
Выдвижение носка оправки за пережим валков, мм	36
Обжатие заготовки в пережиме, %	13,3

Материал валков — сталь 45, материал оправки — сталь 4Х5МФС.

Исходные заготовки предварительно нагревали до температуры прокатки в камерной печи электросопротивления.

В результате прошивки было получено 6 гильз с наружным диаметром 43,5 мм и толщиной стенки 10 мм. Их геометрические размеры оценивали путем замера внешнего и внутреннего диаметров и толщины стенки переднего и заднего торцов на расстоянии 30 мм от края (рис. 2). Максимальное отклонение по наружному диаметру на прошитых гильзах на переднем конце не превышает 1 %, для заднего конца — 2,4 %. Относительная разностенность гильз составила 0,3—0,5 % на переднем конце и 0,5—1,0 % — на заднем.

Большие отклонения геометрических размеров заднего конца гильз объясняются наличием зацентровочного углубления на переднем торце и нестабильным положением заднего конца гильзы при окончании процесса прошивки.

В целом, используемый материал обладает высокой пластичностью, и его горячая винтовая прошивка не вызывает каких-либо затруднений. В то же время медные сплавы обладают склонностью к налипанию на поверхность инструмента, что может отрицательно сказаться на качестве поверхности самих получаемых полуфабрикатов. Поэтому необходимо стремиться к уменьшению скольже-

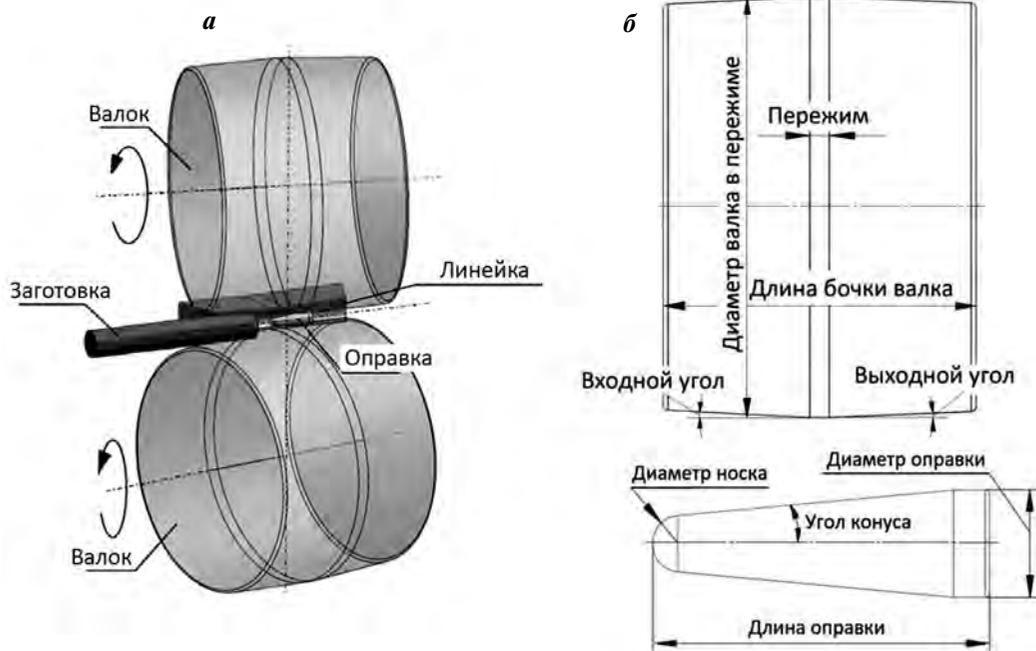


Рис. 1. Схема очага деформации прошивного стана (а) и геометрические параметры оправки и вала (б)

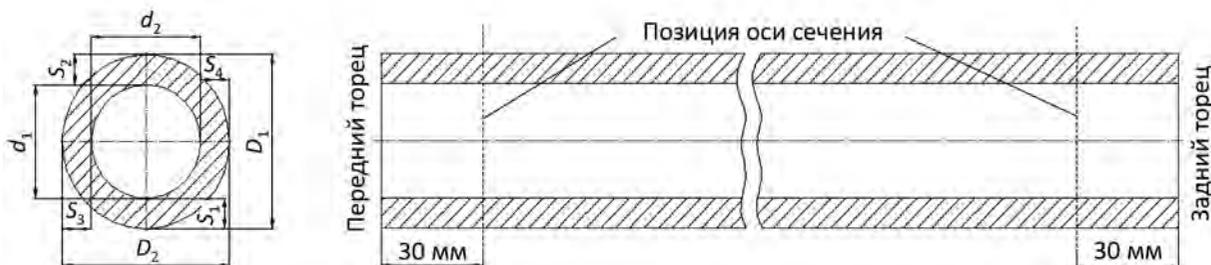


Рис. 2. Схема измерения гильз после прошивки

ния металла заготовки относительно деформирующего инструмента.

После прошивки гильзы редуцировали в трехвалковом министане радиально-сдвиговой прокатки по различным режимам.

Для оценки формоизменения металла в процессе редуцирования и исследования влияния степени горячей деформации на свойства металла были получены образцы нескольких размеров. Редуцирование гильз выполняли без оправки в очаге деформации, образованном тремя валами.

В результате после редуцирования гильз диаметром 43,5 мм за несколько проходов получены образцы толстостенных труб наружным диаметром 30, 25 и 18 мм (рис. 3). Перед каждой следующей операцией деформирования трубы подогревали в печи.

Процесс деформирования протекал стабильно. После первого прохода при уменьшении диаметра гильзы с 43,5 до 30 мм толщина стенки увеличивается примерно на 1 мм. При этом отклонение в размере внутреннего диаметра не превышает 0,1 мм. При следующем проходе с обжатием до диаметра 25 мм изменения толщины стенки не происходит, однако форма внутреннего профиля гильзы начинает искажаться. За счет этого толщина стенки поллой гильзы изменяется в диапазоне от 9,5 до 11 мм в центральной части и от 8,5 до 11 мм на концевых участках полого прутка. После прокатки с наружного диаметра 25 мм до 18 мм внутренний профиль полого образца принимает форму неправильного многогранника и практически смыкается.

Проведенные эксперименты по получению образцов из сплава Cu—0,75Cr способом винтовой



Ø 43,5 → 30 → 25 → 18 мм



Ø 43,5 → 30 → 25 → 18 мм

Рис. 3. Внешний вид прошитового и редуцированных образцов полых труб из сплава Cu–0,75Cr

прошивки и редуцирования в стане РСП показывают, что данная схема может быть принципиально реализована в промышленности. В то же время для получения качественного продукта необходимо уточнение параметров деформации (степени деформации, выбора схемы редуцирования).

Термообработка и анализ полученных результатов

Как правило, технология получения полуфабрикатов из хромистой бронзы электротехнического назначения подразумевает закалку или закалку с последующим старением. Закалка позволяет

зафиксировать пресыщенный твердый раствор, в результате старения происходит распад с выделением дисперсных частиц фазы-упрочнителя [1, 23, 24].

Для получения требуемых свойств применяют также способ термомеханической обработки (ТМО), которая включает холодную пластическую деформацию между операциями закалки и старения. Однако при эксплуатации изделий из дисперсионно-твердеющих сплавов при температурах выше температуры рекристаллизации ($>550 \pm 660$ °С) использование холодной деформации может оказать отрицательное влияние. Поэтому при выборе и сочетании технологических операций деформирования и термообработки необходимо учитывать и специфику работы готового изделия.

Термообработку полученных труб проводили по трем вариантам. В первом случае прутки сразу после окончания операции редуцирования охлаждали в воде. Старение выполняли с охлаждением на воздухе. Режимы термообработки представлены в таблице.

После выполнения термообработки на всех образцах при комнатной температуре проводили измерения удельной электропроводности методом вихревых токов на вихретоковом структуро-скопе ВЭ-26НП (ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», г. Москва).

Отожженная чистая медь имеет удельную электропроводность 58 МСм/м (электросопротивление 0,017241 мкОм·м), что в соответствии с международным стандартом IACS (international annealed copper standard) составляет 100 % IACS [1]. Поэтому результаты измерений электропроводности далее представлены в % IACS, т.е. в процентах от электропроводности чистой меди.

Изучение электропроводности показало, что образцы после прошивки имели электропроводность 59,3 % IACS. В образцах, полученных после закалки сразу после операции редуцирования, электропроводность составила от 60,3 до 63 %

Режимы термообработки после горячей прокатки

№	Вариант термообработки	Температура закалки, °С	Время выдержки при закалке, ч	Температура старения, °С	Время выдержки при старении, ч
1	Закалка	750	Охлаждение с температуры окончания прокатки		—
2	Закалка + старение	980	1	450	3
3	Закалка + старение	1020	1	450	3

IACS. Максимальная электропроводность наблюдалась на образцах диаметром 30 мм, т.е. после первого прохода редуцирования. Это можно объяснить большим диаметром полый гильзы и меньшей его длиной. Гильза большего диаметра меньше остывает в процессе прокатки, соответственно, закалка происходит при чуть более высоких температурах относительно полых образцов диаметром 25 и 18 мм.

После закалки и старения образцов по второму режиму значение электропроводности незначительно изменялось в зависимости от диаметра и составляло 69,5–70,5 % IACS. После выполнения термообработки по третьему варианту электропроводность всех образцов составила 75,0–76,7 % IACS (рис. 4).

Старение образцов способствует распаду пересыщенного хромом раствора и выделению легирующих элементов в дисперсные частицы, что ведет к повышению электропроводности в сравнении с образцами, подвергнутыми только закалке. В данном случае закалка медного сплава с содержанием хрома 1 % при температуре выше 1000 °С дает лучшие результаты по электропроводности, так как в структуре сплавов, содержащих более 0,4 % Cr, при температуре закалки ниже 1000 °С сохраняются частицы избыточного хрома, сдерживающие рост зерен α -раствора [1].

Измерения микротвердости проводили на микротвердомере «Tukon 1102» (ITW Test & Measurement GmbH, Reichert Wolpert — Wilson hardness group, Германия) при нагрузке 0,01 кПа и времени приложения усилия 5 с. Микротвердость полученных труб по поперечному сечению до термообработки составляла в среднем 85 HV, после термообработки — 125 HV.

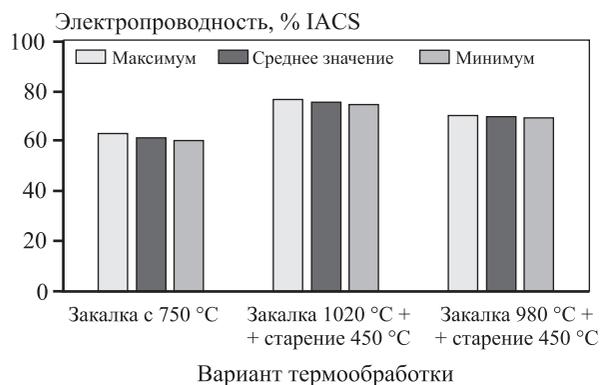


Рис. 4. Диаграмма электропроводности сплава Cu-0,75Cr в зависимости от вида термообработки

Моделирование редуцирования полых образцов с использованием МКЭ

Современное программное обеспечение позволяет быстро и качественно прогнозировать и оптимизировать различные технологические процессы обработки металлов давлением. Программные комплексы, основанные на методе конечных элементов (QFORM, Deform 3D, ANSYS, Abacus и др.), дают возможность сократить затраты на проведение экспериментов и получить приемлемые для анализа и расчетов данные по характеру формоизменения, распределению температурных полей, скорости деформации, по силе и мощности деформирования и другим параметрам.

С целью исследования формоизменения внутренней поверхности гильз при редуцировании по различным режимам было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе QFORM.

Рассмотрено три варианта редуцирования: с обжатием заготовки без оправки, на цилиндрической неподвижной оправке и на свободно перемещаемой оправке.

Исходная трехмерная модель, включающая рабочие валки, оправку и гильзу (рис. 5), импортирована в QFORM, после чего в режиме препроцессора происходят необходимые позиционирование элементов модели и задача исходных данных и условий взаимодействия.

Обжатие заготовок по проходам осуществлялось по следующему маршруту: $\varnothing 43,5 - 30 - 25 - 18$ мм с обжатием заготовки по наружному диаметру за проход соответственно 31, 17 и 28 %. Оправка использовалась только при первом проходе. Режи-

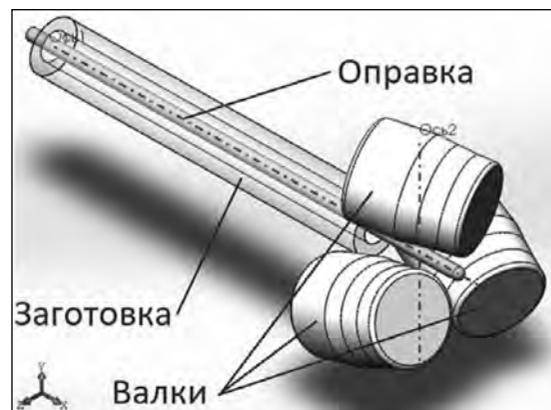


Рис. 5. Схема 3D-модели для моделирования процесса редуцирования

мы обжатий, с одной стороны, должны выбирать с точки зрения максимально возможной степени деформации за проход, но, с другой стороны, ограничены технологическими и конструктивными возможностями оборудования.

Основные параметры, принятые при проведении моделирования процесса редуцирования, представлены ниже:

Угол раскатки, град	15
Угол подачи, град.....	18
Диаметр валка в пережиме, мм	75
Диаметр оправки, мм.....	10
Температура нагрева заготовки, °С.....	860
Материал рабочих валков.....	40X
Материал оправки.....	4X5МФС
Смазка между оправкой и заготовкой	на основе графита
Частота вращения валков, об/мин	30

На рис. 6 показан внешний вид образцов после редуцирования без оправки и с применением цилиндрической длинной оправки.

Редуцирование без оправки сопровождается свободным течением металла на внутренней поверхности трубы. Винтовой характер движения

трубы по очагу деформации и отсутствие деформации по внутренней поверхности приводят к некоторому искривлению внутреннего диаметра трубы после редуцирования и незначительному увеличению толщины стенки. С точки зрения пластического формоизменения процессы редуцирования на неподвижной оправке и на свободно перемещаемой оправке практически не отличаются (рис. 6, *в, д* и *з, е*). Оправка в обоих случаях контактирует с внутренней поверхностью трубы с момента максимального обжатия и до выхода трубы из очага деформации. Оправка ограничивает радиальное истечение металла и увеличение толщины стенки, а также обеспечивает правильную форму внутреннего отверстия трубы в процессе редуцирования.

Для оценки деформирования заготовки по различным схемам редуцирования по результатам моделирования было рассмотрено распределение накопленной степени деформации, которое представлено на рис. 7.

Наибольшее значение накопленной степени деформации сконцентрировано в поверхностных слоях трубы. Как можно видеть, способ редуцирования и наличие оправки не оказывают существенного влияния на уровень пластической деформации, так как не происходит деформирования трубы по стенке. Величина накопленной степени дефор-

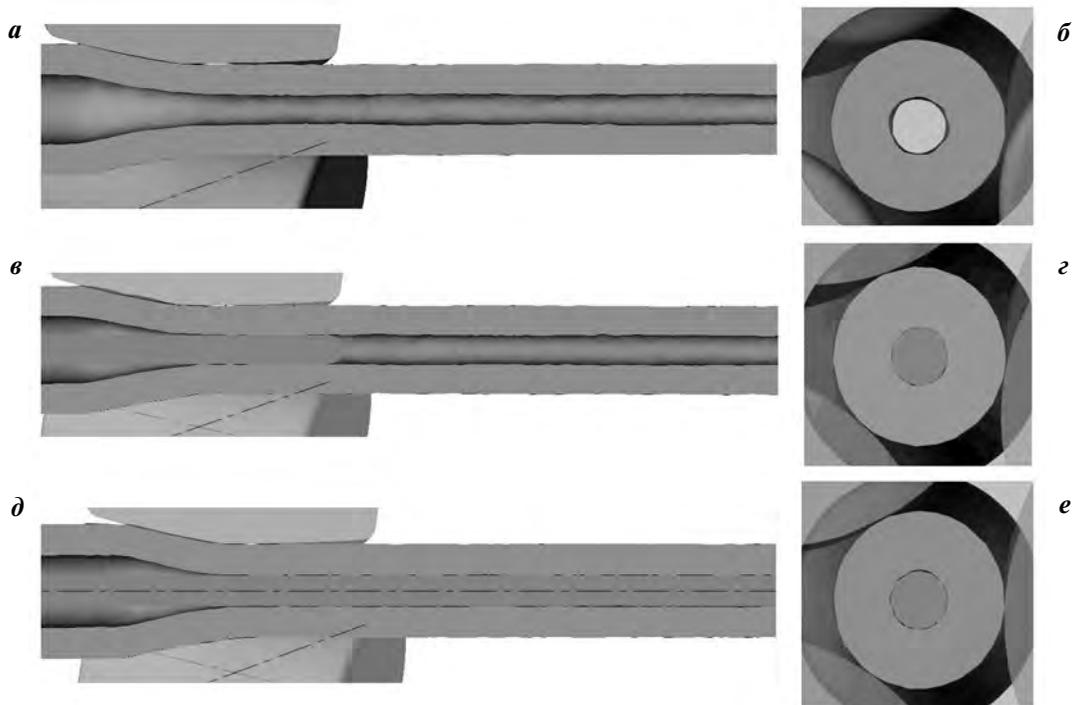


Рис. 6. Продольное (*а, в, д*) и поперечное (*б, з, е*) сечения труб после моделирования редуцирования в QFORM 3D

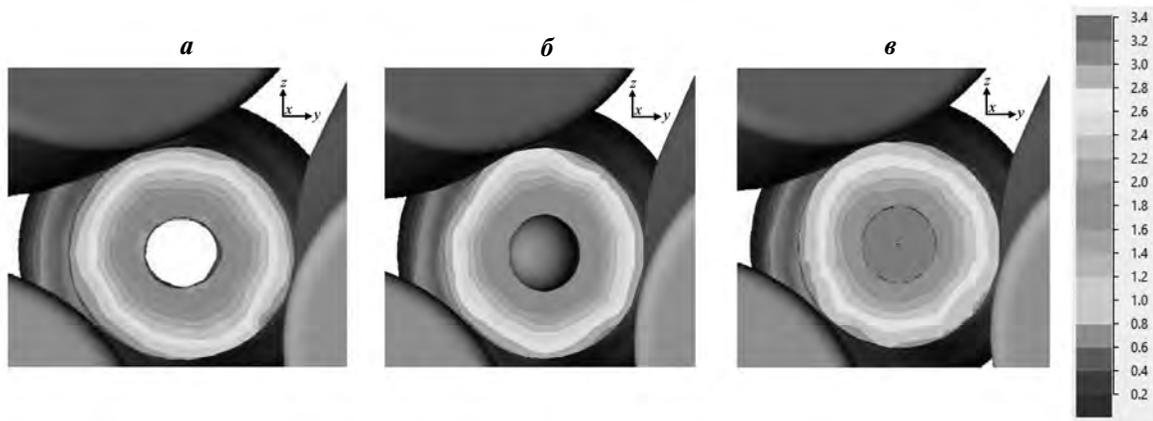


Рис. 7. Распределение накопленной степени деформации по поперечному сечению трубы после редуцирования без оправки (а), на неподвижной оправке (б) и на плавающей оправке (в)

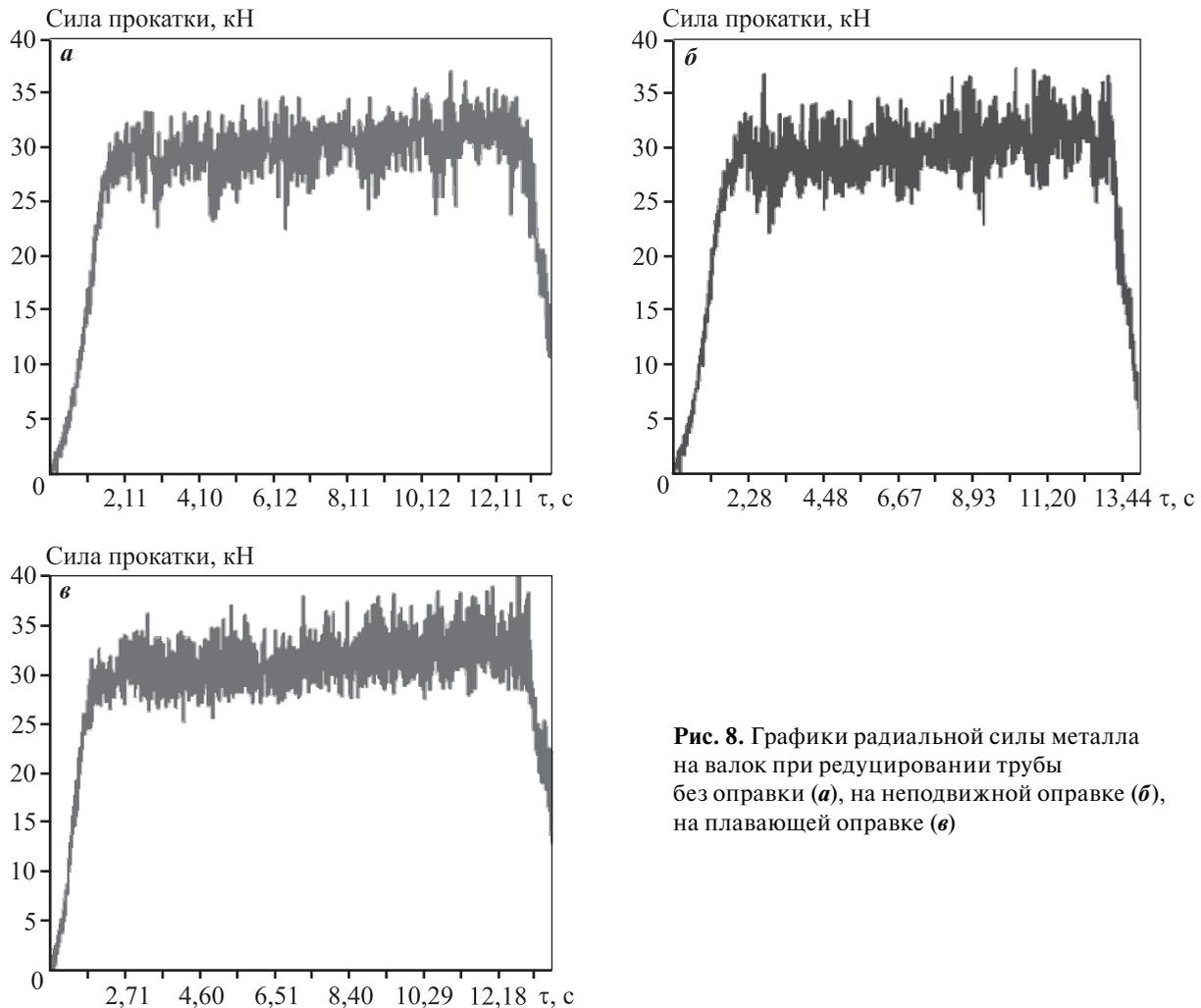


Рис. 8. Графики радиальной силы металла на валок при редуцировании трубы без оправки (а), на неподвижной оправке (б), на плавающей оправке (в)

мации на поверхности достигает значений 3,0—3,2 и плавно снижается по поперечному сечению до 1,8—2,0 к поверхности внутреннего диаметра.

Известно, что способ радиально-сдвиговой прокатки может оказывать влияние на изменение

величины зерна и прочностных свойств материала [25, 26]. В процессе обработки происходит геликоидальное течение металла с ускорением внутренних слоев заготовки и замедлением внешних, создавая эффект объемного макросдвига, что

способствует проработке структуры. С другой стороны, во время прошивки, со стороны оправки, формирующей отверстие, также действуют деформации, которые распределяются от внутренней поверхности во внутрь стенки. Поэтому следует ожидать, что наибольшая проработка структуры на полученных трубах будет в приповерхностных слоях относительно наружного и внутреннего диаметров.

Также оценивали зависимость силы, действующей на валок, от варианта редуцирования на оправке или без нее. На рис. 8 представлены графики нормальной силы металла на рабочий валок, полученные по результатам проведенного моделирования.

В целом режим редуцирования и наличие оправки не оказывают существенного влияния на показатели силы прокатки. Максимальное значение силы во всех трех случаях составляет 35 кН, которое достигается к окончанию установившейся фазы процесса прокатки ($\tau = 11 \div 12$ с на графиках). Незначительное увеличение можно объяснить остыванием заднего конца заготовки и, в связи с этим, некоторым повышением сопротивления деформации медного сплава.

Выбор схемы редуцирования труб должен учитывать конкретный вид продукции. При необходимости получения длинномерных полуфабрикатов с точки зрения реализации процесса и проектирования оборудования целесообразной является схема прокатки на длинной цилиндрической, свободно перемещаемой оправке. Для коротких заготовок возможно использование удерживаемой оправки и схемы прокатки со сползанием. В случае, если к точности изготовления полуфабрикатов и качеству внутренней поверхности не предъявляется высоких требований, процесс получения толстостенных полых прутков возможно реализовать без оправки, что значительно упрощает конструкцию оборудования и вспомогательных устройств.

Выводы

1. Результаты проведенных исследований создают научную и технологическую основу промышленного получения полуфабрикатов из медных сплавов электротехнического назначения на основе способов винтовой и радиально-сдвиговой прокатки. Министаны винтовой прокатки обладают рядом преимуществ, основными из которых

являются сравнительно небольшая масса оборудования, невысокая потребляемая мощность и гибкость производства.

2. Проведенные эксперименты по прошивке заготовок из сплава Cu—0,75Cr показали, что горячая винтовая прошивка таких сплавов не вызывает каких-либо затруднений с технологической точки зрения. Для достижения высокой точности геометрических параметров гильз целесообразной может являться прошивка на двухвалковом министане винтовой прокатки с направляющими дисками. Это также будет способствовать меньшему скольжению материала заготовки в очаге деформации, что снизит возможность налипания на технологический инструмент.

3. Последующие операции редуцирования возможно выполнять на трехвалковых министанах радиально-сдвиговой прокатки. При этом в зависимости от требуемых конечных размеров полуфабрикатов и качества внутренней поверхности можно использовать различные схемы прокатки: для получения длинномерных полуфабрикатов целесообразна схема прокатки на длинной цилиндрической, свободно перемещаемой оправке; для коротких заготовок — прокатка на удерживаемой оправке со сползанием; если к качеству внутренней поверхности не предъявляются высоких требований, то процесс редуцирования возможно реализовать без оправки, что значительно упрощает конструкцию оборудования и вспомогательных устройств.

4. Для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств полуфабрикатов изделий, регламентированных в технической документации (электропроводность, твердость), было рассмотрено три вида термообработки, выполняемой после операций горячего деформирования. Максимальное значение электропроводности 76,7 % IACS получено на образцах труб после закалки при температуре 1020 °С с последующим старением при температуре 450 °С в течение 3 ч. Термообработка обеспечила повышение твердости прокатанных труб в среднем на 40 HV (с 85 до 125 HV).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 11.7172.2017/8.9.

Литература/References

1. *Осинцев О.Е., Федоров В.Н.* Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник. 2-е

- изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2016.
- Osintsev O.E., Fedorov V.N.* Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands: A directory. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2016 (In Russ.).
- Зиновьев А.В., Кошмин А.Н., Часников А.Я.* Исследование формирования микроструктуры сплава М1 в очаге деформации при непрерывном прессовании шин. *Цвет. металлы*. 2018. No. 10. С. 81–85.
Zinoviev A.V., Koshmin A.N., Chasnikov A.Ya. Understanding how the M1 alloy microstructure is formed in the deformation zone during continuous extrusion of bus bars. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 10. P. 81–85 (In Russ.).
 - Райков Ю.Н.* Обработка меди: Учеб. пос. для вузов. М.: Институт Цветметобработка, 2006.
Raikov Yu.N. Copper processing. Moscow: Institut Tsvetmetobrabotka, 2006 (In Russ.).
 - Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф., Лозиков И.А.* Бронзы электротехнического назначения и особенности их производства. *Вестн. Белорус.-Росс. ун-та*. 2012. No. 3 (36). С. 36–52.
Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Lozikov I.A. Bronzes for electrical purposes and the features of their production. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*. 2012. No. 3 (36). P. 36–52 (In Russ.).
 - Watanabe C., Monzen R., Tazaki K.* Mechanical properties of Cu–Cr system alloys with and without Zr and Ag. *J. Mater. Sci.* 2008. Vol. 43. P. 813–819.
 - Исламгалиев Р.К., Нестеров К.М., Валиев Р.З.* Структура, прочность и электропроводность медного сплава системы Cu–Cr, подвергнутого интенсивной пластической деформации. *Физика металлов и металловедение*. 2015. Т. 116. No. 2. P. 219–228.
Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Valiev R.Z. Structure, strength and electrical conductivity of a Cu–Cr system copper alloy subjected to severe plastic deformation. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2015. Vol. 116. No. 2. P. 219–228 (In Russ.).
 - Li B., Zhang S.H., Zhang G.L., Zhang H.Y., Zhang H.Q.* Microstructure simulation of copper tube and its application in three roll planetary rolling. *Mater. Sci. Technol.* 2007. Vol. 23. Iss. 6. P. 715–722.
 - Zhou Y.W., Mao Z.N., Liu Y., Wang J.T.* Microstructure evolution of copper by three roll planetary milling. In: *6th Intern. conf. on metallurgy technology and materials (ICMTM 2018)* (Xi'an, China, 30 May 2018). *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 279 SSP. P. 44–48.
 - Li R., Guo E., Chen Z., Kang H., Wang W., Zou C., Li T., Wang T.* Optimization of the balance between high strength and high electrical conductivity in CuCrZr alloys through two-step cryorolling and aging. *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 771. P. 1044–1051.
 - Wu Y., Xia C., Wang M., Zhang W., Zhang R.* Effect of hot rolling process on mechanical properties and electrical properties of Cu–Cr–Zr alloy. *J. Central South Univ. (Science and Technology)*. 2013. Vol. 44. Iss. 3. P. 930–935.
 - Liu L., Wang M., Chen W., Chen C.* Thermomechanical treatment of a novel Cu–Zn–Cr alloy and its effect on properties. *Jinshu Rechuli/Heat Treat. Met.* 2015. Vol. 40. Iss. 6. P. 80–85.
 - Николаев А.К., Розенберг В.М.* Сплавы для электродов контактной сварки. М.: Metallurgiya, 1978.
Nikolaev A.K., Rozenberg V.M. Alloys for resistance welding electrodes. Moscow: Metallurgiya, 1978 (In Russ.).
 - Romantsev B., Goncharuk A., Aleshchenko A., Gamin Y., Mintakhanov M.* Development of multipass skew rolling technology for stainless steel and alloy pipes' production. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. Vol. 97. Iss. 9-12. P. 3223–3230.
 - Галкин С.П., Романцев Б.А., Та Д.С., Гамин Ю.В.* Ресурсосберегающая технология производства круглого сортового проката из бывших в употреблении осей подвижного железнодорожного состава. *Чер. металлы*. 2018. No. 4. С. 21–27.
Galkin S.P., Romantsev B.A., Ta D.X., Gamin Yu.V. Resource-saving technology for production of round bars from used shaft of rolling railroad stock. *Cher. Metally*. 2018. No. 4. P. 20–27 (In Russ.).
 - Zhe Zhang, Dong Liu, Yanhui Yang, Yong Zheng, Yuhua Pang, Jianguo Wang, Haiping Wang.* Explorative study of rotary tube piercing process for producing titanium alloy thick-walled tubes with bi-modal microstructure. *Arch. Civil Mech. Eng.* 2018. Vol. 18. Iss. 4. P. 1451–1463.
 - Харитонов Е.А., Романенко В.П., Будников А.С.* Разработка методики расчета деформационных параметров при раскатке гильз в трехвалковом стане винтовой прокатки. *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 2016. Т. 59. No. 3. С. 167–172.
Kharitonov E.A., Romanenko V.P., Budnikov A.S. Sleeve deformation in a three-roller screw-rolling mill. *Steel Transl.* 2016. Vol. 46. No. 3. P. 180–185.
 - Романцев Б.А., Гончарук А.В., Алещенко А.С., Онучин А.Б., Гамин Ю.В.* Совершенствование режимов горячей прокатки труб на мини ТПА 70–270. *Металлург*. 2015. No. 5. С. 41–43.
Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S., Onuchin A.B., Gamin Yu.V. Improving the regimes used for hot-rolling tubes on mini tube-production unit 70–270. *Metallurgist*. 2015. Vol. 59. Iss. 5-6. P. 386–389.

18. Будников А.С., Харитонов Е.А., Сорокин Ф.В. Исследование разностенности труб в процессе редуцирования на трехвалковом стане винтовой прокатки. *Сталь*. 2017. No. 10. С. 31–34.
Budnikov A.S., Kharitonov E.A., Sorokin F.V. The study of pipe difference in the reduction process on a three-roll helical rolling mill. *Stal'*. 2017. No. 10. P. 31–34 (In Russ.).
19. Романицев Б.А., Гончарук А.В., Алещенко А.С., Гамин Ю.В. Получение полых толстостенных профилей и труб из титановых сплавов методом винтовой прокатки. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2015. No. 4. С. 38–41.
Romancev B.A., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S., Gamin Y.V. Production of hollow thick-walled profiles and pipes made of titanium alloys by screw rolling. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. Iss. 5. P. 522–526.
20. Shyue-Jian Wu, Yeong-Maw Hwang and Ming-Hu Chang. A three-dimensional finite element analysis of the three-roll planetary mill. *J. Mater. Proc. Technol.* 2002. Vol. 123. Iss. 3. P. 336–345.
21. Харитонов Е.А., Романенко В.П., Будников А.С. Моделирование процесса раскатки труб на трехвалковом раскатном стане винтовой прокатки. *Сталь*. 2014. No. 10. С. 44–47.
Kharitonov E.A., Romanenko V.P., Budnikov A.S. Modeling the process of rolling pipes on a three-roll screw rolling mill. *Stal'*. 2014. No. 10. P. 44–47 (In Russ.).
22. Романицев Б.А., Галкин С.П., Михайлов В.К., Хлопонин В.Н., Корышев А.Н. Микро-микропрокатный стан. *Сталь*. 1995. No. 2. С. 40–42.
Romantsev B.A., Galkin S.P., Mikhailov V.K., Khloponin V.N., Koryshev A.N. Bar micromill. *Stal'*. 1995. Iss. 2. P. 40–42 (In Russ.).
23. Розенберг В.М., Николаев А.К. Совершенствование технологии производства полуфабрикатов из цветных металлов и сплавов. В сб. науч. тр.: *Гипроцветмет-обработка*. М.: Металлургия, 1977. No. 50. С. 50–67.
Rozenberg V.M., Nikolaev A.K. Improving the technology for the production of semi-finished products from non-ferrous metals and alloys. In: *Giprotsvetmetobrabotka*. Moscow: Metallurgiya, 1977. No. 50. P. 50–67 (In Russ.).
24. Николаев А.К., Новиков А.И., Розенберг В.М. Хромовые бронзы. М.: Металлургия, 1983.
Nikolaev A.K., Novikov A.I., Rozenberg V.M. Chrome bronzes. Moscow: Metallurgiya, 1983 (In Russ.).
25. Акopyян Т.К., Белов Н.А., Алещенко А.С., Галкин С.П., Гамин Ю.В., Горшенков М.В., Чеве́рикин В.В., Шуркин П.К. Formation of the gradient microstructure of a new Al alloy based on the Al–Zn–Mg–Fe–Ni system processed by radial-shear rolling. *Mater. Sci. Eng. A*. 2019. Vol. 746. P. 134–144.
26. Dobatkin S., Galkin, S., Estrin Y., Serebryany V., Diez M., Martynenko N., Lukyanova E., Perezhogin V. Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling. *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 774. P. 969–979.