

РЕЦИКЛИНГ КУСОЧНЫХ ОТХОДОВ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ В ИСХОДНУЮ ДЛИННОМЕРНУЮ ПРОДУКЦИЮ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Загиров Н.Н.¹, Логинов Ю.Н.², Иванов Е.В.¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье рассмотрены технологические особенности изготовления длинномерных прутков и проволоки из кусковых фракций меди на основе применения методов термомеханической обработки некомпактных материалов. Использование предлагаемой схемы позволит повысить выход годного при переработке данного вида отходов за счет исключения угара металла, свойственного плавильному переделу. **Цель работы:** практическое опробование энерго- и ресурсосберегающего способа переработки кусочных отходов медной проволоки в полуфабрикаты и изделия с заданным уровнем механических характеристик. **Используемые методы:** основу предлагаемой схемы составляли выполняемые при определенных условиях такие технологические операции, как горячее брикетирование, горячая экструзия, холодное волочение и отжиг. Для оценки прочностных и пластических свойств получаемой прутково-проволочной продукции применяли стандартные испытания на растяжение. **Новизна:** к элементам новизны относится реализация нестандартного подхода к переработке сортовых металлических отходов, основанного на использовании приемов, широко распространенных в порошковых и гранульных технологиях, но малоприменяемых при рециклинге вторичного сырья. **Результат:** показана принципиальная возможность получения длинномерной медной проволоки из представляющих отходы производства отдельных кусочных фрагментов, используя только методы термомеханической обработки. На всех стадиях ее изготовления поведение материала носит характер, во многом схожий с поведением соответствующих полуфабрикатов из компактной меди. Установлено, что, комбинируя величиной суммарного относительного обжатия при волочении и местом расположения в маршруте волочения промежуточного рекристаллизационного отжига, можно варьировать уровнем и соотношением достигаемых у получаемой проволоки прочностных и пластических характеристик. **Практическая значимость:** приобретенный опыт и результаты проведенных исследований могут служить потенциальной основой для распространения и проектирования подобного рода технологий переработки металлических мелкогабаритных отходов применительно к другим их видам, в том числе и для ряда других цветных металлов и сплавов.

Ключевые слова: медь, проволочные отходы производства, брикетирование, экструзия, волочение, отжиг, механические свойства, структура.

Введение

Среди многих задач, которые приходится решать производителям и потребителям различного рода металлопродукции, немало связано с поисками путей эффективного использования образующихся в том или ином виде отходов. Несоблюдение ряда установленных принципов при подготовке отходов к переработке по традиционной схеме через их переплав означает нарушение требований к химическому составу, который имеет первостепенное значение при выплавке металла или сплава определенной марки.

Некоторые особенности сопровождают возникновение отходов в области обработки меди. В отличие от сплавов меди (бронз, латуней) сама медь выступает в роли материала не конструкционного, а функционального назначения. Обработка материалов конструкционного назначения

приводит к получению деталей и узлов и часто выполняется методами обработки резанием с появлением отходов в виде стружки. Медь отличается от других материалов высокой электро- и теплопроводностью. В результате большая часть изделий из меди выпускается в виде проводников тока и труб различного диаметра.

Известно, что в структуре себестоимости готовой продукции во многих случаях около 50% занимает стоимость исходного сырья. Поэтому поиск наиболее рациональных путей использования для изготовления конкретных изделий соответствующих отходов производства будет способствовать снижению общего расхода металла на единицу готовой продукции.

Ряд исследователей занимались проблемой утилизации стружковых отходов, в том числе применительно к алюминиевым сплавам [1–3], сплавам магния [4], меди [5] и титана [6].

При рассмотрении вопросов, касающихся переработки сыпучих сортных металлических отходов, минуя плавильный передел [7], важное значение имеет предполагаемая область применения получаемых таким образом металлоизделий. Одним из вариантов, который представляется наиболее логичным, является изготовление из имеющихся в наличии отходов непосредственно той продукции, которая и послужила основой для их образования. В первую очередь это касается, на наш взгляд, обрывков и кусочных фрагментов отходов холодно-тянутой проволоки.

Источники возникновения отходов в этой области следующие:

1. Непосредственно в производстве длинномерных изделий методом волочения возникает передняя обрезь из-за необходимости утонения переднего конца для заправки в волоку.

2. На волочильных станах, реализующих процесс непрерывного волочения, применяется сварка заготовок встык, для чего торцы соседних заготовок подвергают обрезке с возникновением отходов.

3. При сварке заготовок образуется грат, который должен быть удален, представляющий собой самостоятельный вид отходов производства [8].

4. Волочильный передел так или иначе сопровождается обрывностью [9], с большим количеством причин ее происхождения, при перезаправке станов возникают дополнительные отходы в виде немерных отрезков проволоки.

5. В технологии производства электрических машин и трансформаторов поставка проводника тока осуществляется с избытком по длине, после намотки статора, ротора или сердечника этот избыток остается в виде немерного отрезка проволоки, представляющего в таком состоянии отходы производства.

Этот перечень показывает, что источники появления отходов являются не случайными, а постоянными факторами реального производства.

Материалы и методы исследования

В работе в качестве исходного материала для получения изделий были выбраны сортные отходы в виде проволочной обрезки из меди марки М1, общий вид которых показан на **рис. 1, а**.

Задача стояла получить из указанных отходов проволоку определенного диаметра с заданным уровнем механических характеристик, используя только приемы порошковой металлургии, обработки давлением и термообработки.

Замер диаметра и определение методом растяжения механических свойств исходных кусочных фрагментов проволоки позволили

уточнить основные характеристики получаемой из отходов проволочной продукции, на которые необходимо было ориентироваться при проведении исследований:

- диаметр $d=2,2$ мм;
- временное сопротивление разрыву $\sigma_B=270\pm 5$ МПа;
- относительное сужение $\Psi=50\pm 5\%$.



а



б



в

Рис. 1. Общий вид исходных отходов (а), прессовки после горячего брикетирования (б) и прутка после горячей экструзии (в)

Указанные показатели соответствуют по ГОСТ 1535-2006 свойствам медной проволоки в

полутвердом состоянии [10].

Разработанная общая технологически схема изготовления длинномерной проволоки предполагала выполнение следующих основных операций:

1. Подготовка исходных компонентов к компактированию, подразумевающая, в силу специфики их происхождения, лишь незначительную очистку от посторонних включений и промывку в содовом растворе для удаления следов смазки.

2. Горячее брикетирование в жесткой пресс-форме при температуре порядка $\theta_{бр}=450\text{--}500^\circ\text{C}$, давлении брикетирования $p=200$ МПа и времени выдержки при этом давлении в течение $\tau=5$ мин.

Температура нагрева была выбрана из условия, что она должна быть выше температуры рекристаллизации меди и ниже температуры начала ее интенсивного окисления. Диаметр рабочего канала пресс-формы составлял 42 мм. Масса засыпаемых в пресс-форму отходов принималась равной 350 г. Давление брикетирования назначалось, исходя из условия превышения его величины предела текучести материала при заданной температуре обработки. В результате были получены прессовки с соотношением высоты к диаметру, равным порядка 0,75. Интегральная плотность прессовки составляла $8,3$ г/см³, что соответствовало относительной плотности около 93%. Вид прессовки после осуществления горячего брикетирования приведен на **рис. 1, б**.

3. Нагрев прессовки до температуры 900°C в стоящей рядом с вертикальным прессом усилием 1 МН печи, подача нагретой заготовки к прессу и горячая экструзия через коническую матрицу прямым методом.

Принятая температура нагрева прессовок перед экструзией соответствовала «верхним» границам температурного интервала горячей обработки меди [11]. Это связано с тем, что при перемещении прессовки от печи к нагретой до температуры около 450°C инструментальной оснастке неизбежно некоторое ее охлаждение, однако нельзя допустить снижения температуры больше чем на $200\text{--}300^\circ\text{C}$. Коэффициент вытяжки при получении прутка $\varnothing 6$ мм, внешний вид которого показан на **рис. 1, в**, составлял 56.

Однократное холодное волочение на цепном волочильном стане усилием 50 кН, осуществляемое по маршруту: $6,0 \rightarrow 5,0 \rightarrow 4,0 \rightarrow 3,5 \rightarrow 3,0 \rightarrow 2,6 \rightarrow 2,2$ мм. При его составлении учитывалась возможность проведения после одного из этапов обработки давлением операции «отжиг» при температуре 500°C и времени выдержки 60 мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Поскольку в работе речь идет о получении проволоки фиксированных размеров с заданными механическими свойствами, то, как известно [12], требуемые показатели в этом случае достигаются комбинированием на завершающем этапе обработки промежуточного отжига и следующего за ним волочения с определенной величиной суммарного относительного обжатия. Так как графическое представление кривой упрочнения при холодной обработке рассматриваемой категории прутково-проволочного материала на медной основе в литературе отсутствует, решено было на первом этапе протянуть полученный горячепрессованный прут $\varnothing 6$ мм до конечного размера без промежуточного отжига. При этом на нескольких промежуточных диаметрах производился отбор фрагментов проволоки, по результатам испытаний на растяжение которых осуществлялось построение соответствующей кривой упрочнения с одновременным установлением зависимости показателя пластичности (относительного сужения ψ) от величины суммарного относительного обжатия ε . Указанные зависимости в виде совокупности экспериментальных точек отображены на **рис. 2**, причем изменение прочностных характеристик (**рис. 2, а**), имеющее в целом общепринятый для холодной обработки вид, может быть аппроксимировано уравнением

$$\sigma_B = 228 + 3,81\varepsilon - 0,019\varepsilon^2.$$

В результате на $\varnothing 2,2$ мм ($\varepsilon=87\%$) прочность проволоки достигает значений $\sigma_B=415\pm 5$ МПа.

Зависимость же, отражающая изменение пластических свойств (**рис. 2, б**), имеет достаточно специфический вид, обусловленный особенностями уплотнения и деформирования используемого для изготовления проволоки исходного сырья. Результаты проведенных испытаний показывают, что с повышением ε относительное сужение сначала растет, достигая максимальных значений при $\varepsilon=40\text{--}50\%$, а затем снижается, составляя на $\varnothing 2,2$ мм величину $\psi=10\pm 2\%$. По-видимому, это можно объяснить тем, что и в ходе экструзии, и на начальных переходах волочения развиваемые деформации еще не достигают того уровня, чтобы обеспечить качественное соединение отдельных проволочных кусочков между собой. При повышении степени деформации площадь контактного соприкосновения стремится к своему максимуму, в результате чего изменение пластичности материала проволоки начинает носить предсказуемый убывающий характер, свойственный поведению беспористых материалов при холодной обработке.

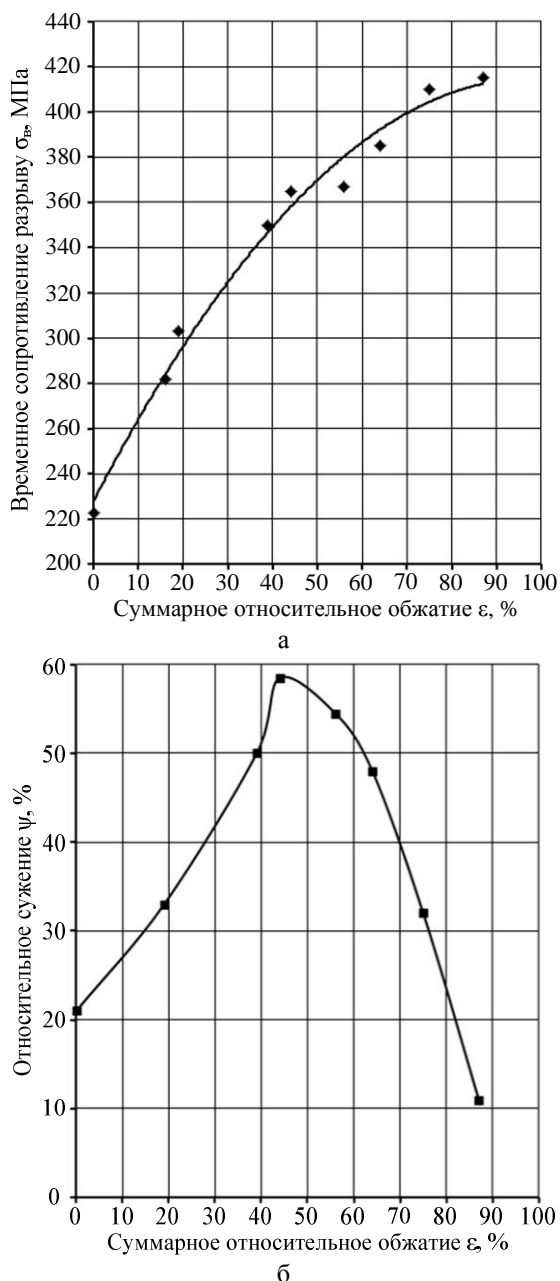


Рис. 2. Механические характеристики прутков и проволоки из медных кусочных проволочных отходов после горячей экструзии ($\epsilon=0$) и холодного волочения с разной величиной суммарного относительного обжатия

Проведенный на конечном $\varnothing 2,2$ мм отжиг по упомянутому выше режиму ($\theta_{отж}=500^{\circ}\text{C}$, $\tau_{отж}=1$ ч) вызывает снижение прочностных характеристик проволоки до отметки $\sigma_B=220\pm 5$ МПа с одновременным повышением пластичности до значений $\Psi=20\pm 5\%$. Таким образом, для того чтобы обеспечить выполнение требований по заданным показателям прочности получаемой проволоки, промежуточный отжиг необходимо производить чуть раньше на $\varnothing 2,3\text{--}2,4$ мм. Это делается с той целью, что-

бы на заключительном отрезке можно было осуществить деформацию со строго рассчитанной величиной относительного обжатия $\epsilon=10\%$. При этом достичь параллельно требуемых по условиям задачи показателей пластичности в любом случае не удастся из-за специфики поведения материала, из которого проволока была изготовлена.

В ходе выполнения специально спланированных экспериментов были подтверждены приведенные выше рассуждения, которые были дополнены данными об уровне значений механических характеристик проволоки $\varnothing 2,2$ мм, получаемой волочением с промежуточным отжигом, проводимом в других местах по ходу реализации указанного выше маршрута волочения.

Решено было осуществить отжиг проволоки на диаметрах 5,0; 4,0 и 3,0 мм, в результате чего при волочении до конечного диаметра 2,2 мм суммарное относительное обжатие составило соответственно 81; 70 и 46 %.

На рис. 3 отражено изменение свойств проволоки $\varnothing 2,2$ мм после проведения промежуточного отжига на разных диаметрах и последующего волочения до конечного размера с определенной величиной суммарного относительного обжатия ϵ .

Как и следовало ожидать, чем больше величина ϵ , тем выше значение прочностных свойств полученной проволоки, причем рост σ_B подчиняется степенной зависимости, описываемой уравнением

$$\sigma_B=223+14,22\epsilon^{0,561}$$

Характер изменения пластических характеристик опять же будет несколько отличаться от традиционного за счет наличия максимума достигаемых значений ψ холоднотянутой проволоки, полученной с величиной суммарного относительного обжатия после отжига на уровне 60–70%.

Одновременно с выполнением механических испытаний полученной проволоки с использованием микроскопа AXIO OBSERVER.D1m были проведены исследования ее структуры в продольном и поперечном направлениях (рис. 4). В качестве сравниваемых объектов были выбраны: фрагмент исходных кусочных проволочных отходов (характерная структура приведена на рис. 4, а); проволока $\varnothing 2,2$ мм, изготовленная из горячепрессованного прутка без проведения промежуточного отжига (рис. 4, б); проволока того же диаметра, изготовленная с промежуточным отжигом на $\varnothing 4$ мм (рис. 4, в). Из сопоставления структур следует, что полученная из отходов проволока не совсем отвечает требованиям по сплошности. Причем в большей мере это касается периферийных участков проволоки, где в первую очередь и начинают появляться разрывы.

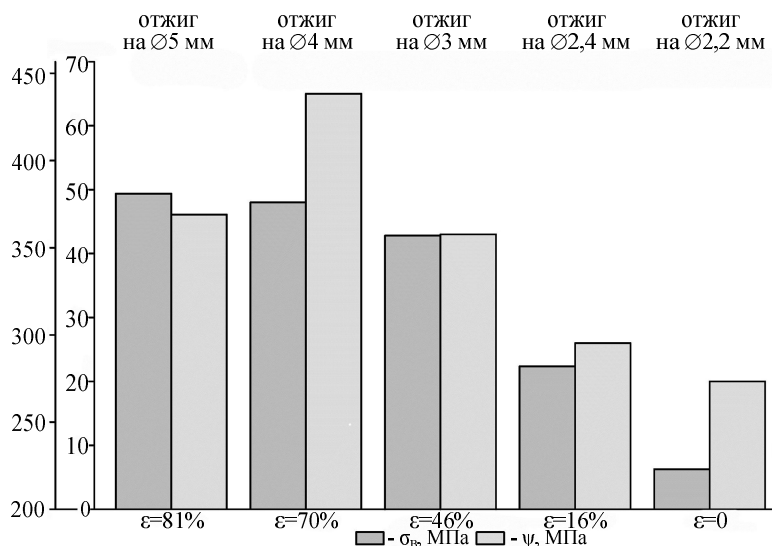


Рис. 3. Свойства проволоки Ø2,2 мм после проведения промежуточного отжига ($\theta_{отж}=500^{\circ}\text{C}$, $\tau_{отж}=1$ ч) на разных диаметрах и последующего волочения до конечного размера с определенной величиной суммарного относительного обжатия

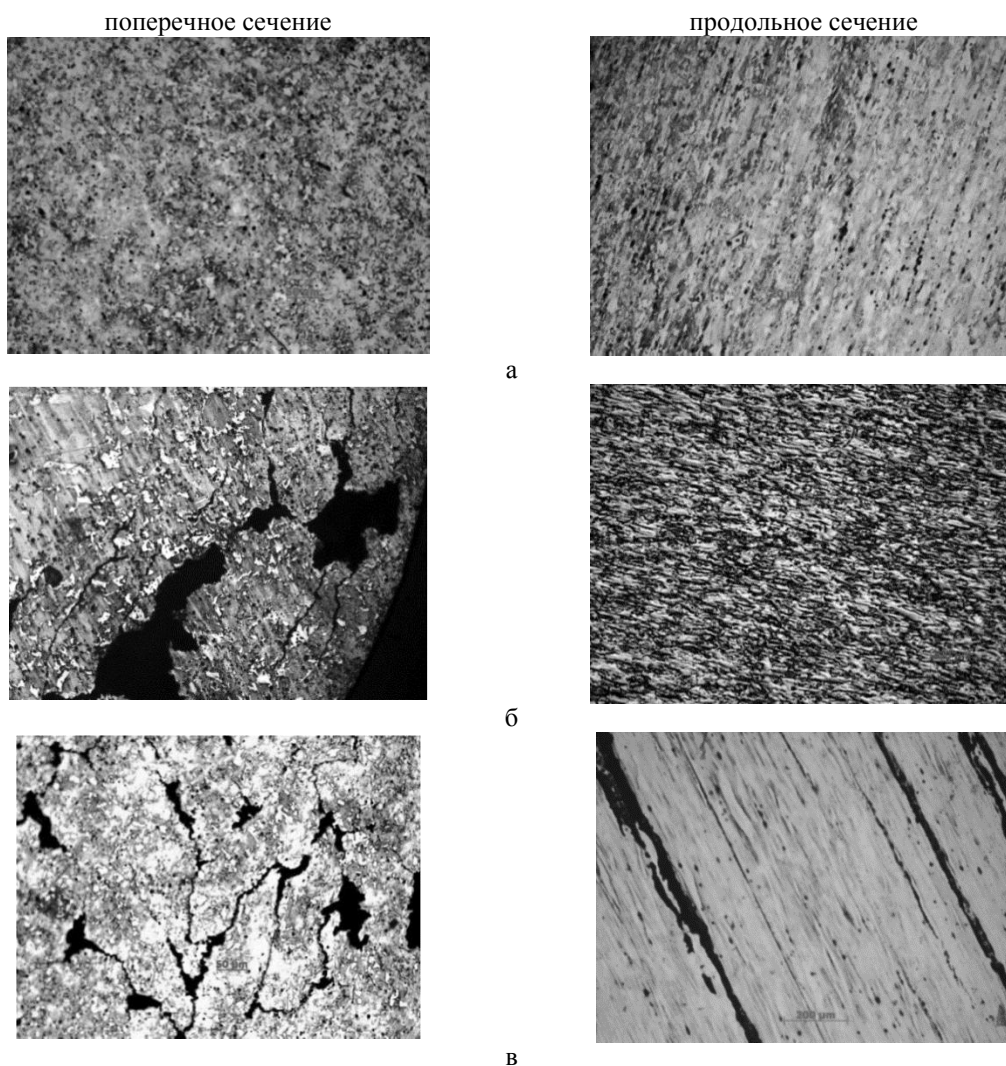


Рис. 4. Характерная микроструктура ($\times 200$) исходных кусочных проволочных фрагментов (а) и проволоки Ø2,2 мм, полученной из них без проведения промежуточного отжига (б) и с отжигом на Ø4 мм (в)

Кроме того, при волочении сплошность может нарушаться в результате создания сложной схемы напряженного состояния с преобладанием растягивающих напряжений в местах присутствия дефектов типа частиц оксидов, что показано в работах [13–15].

Заключение

Обобщая все вышеизложенное, можно сделать следующие выводы. Принципиально получить длинномерную медную проволоку из ее отдельных кусочных фрагментов, представляющих собой отходы производства, используя только методы обработки давлением, особых сложностей не представляет. На всех стадиях ее изготовления, включающих этапы горячего брикетирования (прессования), горячей экструзии, холодного волочения и промежуточной термообработки, поведение материала носит предсказуемый характер, во многом схожий с поведением соответствующих полуфабрикатов из компактной меди. Комбинируя величину суммарного относительного обжатия при волочении и местом проведения промежуточного рекристаллизационного отжига, можно варьировать уровнем достигаемых у получаемой проволоки прочностных характеристик. Приобретаемые при этом пластические свойства, обусловленные спецификой сформированной структуры проволоки, характеризующейся наличием дефектов сплошности, будут значительно ниже по сравнению с проволокой, изготовленной из компактной меди.

Список литературы

1. Ab Rahim S.N., Lajis M.A., Ariffin S. A review on recycling aluminum chips by hot extrusion process. *Procedia CIRP*. 2015. V. 26. P. 761–766.
2. Ryoichi Chiba, Morihiro Yoshimura. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf into c-channel by hot extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015. V. 17. P. 1–8.
3. Haase Matthias, Tekkaya A. Erman. Recycling of aluminum chips by hot extrusion with subsequent cold extrusion. *Procedia Engineering*. 2014. V. 81. P. 652–657.
4. Anilchandra A.R., Surappa M.K. Microstructure and tensile properties of consolidated magnesium chips. *Materials Science and Engineering: A*. 2003. V. 560. P. 759–766.
5. Uwe Hofmann, Essam El-Magd. Behaviour of Cu-Zn alloys in high speed shear tests and in chip formation processes. *Materials Science and Engineering A*. V. 2005. V. 395. P. 129–140.
6. Малиновская И.Д., Демин А.Б. Исследование технологического процесса утилизации титановых отходов компактированием. Современные ресурсосберегающие технологии получения и обработки материалов в машиностроении. Киев, 1991. С.12–14.
7. Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих стружковых отходов меди и ее сплавов методами обработки давлением: монография. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2015. 171 с.
8. Loginov Y.N., Illarionov A.G., Klyueva S.Y., Ivanova M.A. Deformations and structure of metal during cold butt-seam welding of copper blanks. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2012. V. 53. Iss. 1. P. 45–53.
9. Логинов Ю.Н., Осминин А.С., Копылова Т.П. Исследование изменения относительного сужения кислородсодержащей медной проволоки по маршруту волочения // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 5. С. 29–32.
10. Медные сплавы. Марки, свойства, применение: справочник / Райков Ю. Н., Ашихмин Г. В., Полухин В. П., Гуляев А. С. М.: ОАО «Институт «Цветметобработка», 2011. 456 с.
11. Шевакин Ю. Ф., Грабарник Л. М., Нагайцев А. А. Прессование тяжелых цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1987. 246 с.
12. Брабец В. И. Проволока из тяжелых цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1984. 296 с.
13. Hoon Cho, Hyung-Ho Jo, Sang-Gon Lee, Byung-Min Kim, Young-Jig Kim Effect of reduction ratio, inclusion size and distance between inclusions on wire breaks in Cu fine wire-drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. V. 130–131. P. 416–420.
14. Loginov Y.N., Demakov S.L., Illarionov A.G., Ivanova M.A. Interaction of a copper oxide particle with copper in drawing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. V. 11. P. 947–953.
15. Garcia V.G., Cabrera J.M., Prado J.M. Role of Cu₂O during hot compression of 99.9% pure copper. *Materials Science and Engineering A*. 2008. V. 488. P. 92–101.

Материал поступил в редакцию 05.02.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-50-56

RECYCLING OF COPPER WIRE SCRAP INTO INITIAL LONG PRODUCTS BY METAL FORMING

Nikolay N. Zagirov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Siberian Federal University. E-mail: kafomd_1@mail.ru

Yury N. Loginov – D.Sc. (Eng.), Professor
Ural Federal University. E-mail: unl@mtf.ustu.ru

Evgeny V. Ivanov – Assistant Professor
Siberian Federal University. E-mail: kafomd_1@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article describes a technology of making long rods and wire from lump copper by hot deformation of sparse materials. The proposed method may help increase the yield as it eliminates the waste of metal which is a typical feature of the melting operation. **Objectives:** The objective is to test the energy- and resource-saving method of processing waste copper wire to produce semi-finished and finished products with given mechanical characteristics. **Methods Applied:** The proposed method is based on such processes as hot briquetting, hot extrusion, cold drawing and annealing, which take place under specified conditions. A conventional tensile test procedure was used to analyse the strength and ductility of copper rods and wire. **Originality:** This article offers an original approach to waste steel product processing based on the methods that are extensively used in powder and granular technologies, but that are not popular in secondary raw materials recycling industry. **Findings:** The authors demonstrated the possibility of producing long copper wire from waste fragments exclusively by hot deformation. The behavior of the material at all the stages is similar to that of semi-finished products made from compact copper. It was found that it was possible to vary the degree and the combination of strength and ductility in the resultant wire by changing the total reduction during drawing and the place of recrystallization annealing in the drawing sequence. **Practical Relevance:** This experience and the results of the research may be a potential basis for popularizing and designing similar metal processing technologies which can also be applicable to non-ferrous metals and alloys.

Keywords: Copper, wire waste materials, briquetting, extrusion, drawing, annealing, mechanical properties, structure.

References

1. Ab Rahim S.N., Lajis M.A., Ariffin S. A review on recycling aluminum chips by hot extrusion process. *Procedia CIRP*. 2015, vol. 26, pp. 761–766.
2. Ryoichi Chiba, Morihiro Yoshimura. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf into c-channel by hot extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015, vol. 17, pp. 1–8.
3. Haase Matthias, Tekkaya A. Erman. Recycling of aluminum chips by hot extrusion with subsequent cold extrusion. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 81, pp. 652–657.
4. Anilchandra A.R., Surappa M.K. Microstructure and tensile properties of consolidated magnesium chips. *Materials Science and Engineering: A*. 2003, vol. 560, pp. 759–766.
5. Uwe Hofmann, Essam El-Magd. Behaviour of Cu-Zn alloys in high speed shear tests and in chip formation processes. *Materials Science and Engineering A.V.* 2005, vol. 395, pp. 129–140.
6. Malinovskaya I.D., Demin A.B. The study of the titanium waste recycling by compaction. *Modern resource saving technologies of material working in mechanical engineering*. Kiev, 1991, pp. 12–14.
7. Zagirov N.N., Loginov Yu.N. The basic technology of producing materials and products from bulk copper chips and copper alloys by metal forming: monograph. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2015, 171 p. (In Russ.)
8. Loginov Y.N., Illarionov A.G., Klyueva S.Y., Ivanova M.A. Deformations and structure of metal during cold butt-seam welding of copper blanks. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2012, vol. 53, iss. 1, pp. 45–53.
9. Loginov Yu.N., Osminin A.S., Kopylova T.P. The study of changing reduction of oxygen copper wire in the process of drawing. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank production in machine building industry], 2012, no. 5, pp. 29-32.
10. Raikov Yu.N., Ashikhmin G.V., Polukhin V.P., Gulyaev A.S. *Mednye splavy. Marki, svoystva, primeneniye: spravochnik* [Copper alloys. Brands, properties, application: handbook] Moscow: The Tsvetmetobrabotka Institute, 2011. 456 p. (In Russ.)
11. Shevakin Yu.F., Grabarnik L.M., Nagaitsev A.A. *Pressovanie tyazhelykh tsvetnykh metallov i splavov* [Extrusion of heavy non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1987. 246 p. (In Russ.)
12. Brabets V.I. *Provoloka iz tyazhelykh tsvetnykh metallov i splavov* [Wire made of heavy non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 296 p.
13. Hoon Cho, Hyung-Ho Jo, Sang-Gon Lee, Byung-Min Kim, Young-Jig Kim Effect of reduction ratio, inclusion size and distance between inclusions on wire breaks in Cu fine wire drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol. 130–131, pp. 416–420.
14. Loginov Y.N., Demakov S.L., Illarionov A.G., Ivanova M.A. Interaction of a copper oxide particle with copper in drawing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012, vol. 11, pp. 947–953.
15. Garcia V.G., Cabrera J.M., Prado J.M. Role of Cu₂O during hot compression of 99.9% pure copper. *Materials Science and Engineering A*. 2008, vol. 488, pp. 92–101.

Received 05/02/16

Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В. Рециклинг кусочных отходов медной проволоки в исходную длинномерную продукцию методами обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 50–56. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-50-56

Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Ivanov E.V. Recycling of copper wire scrap into initial long products by metal forming. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 50–56. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-50-56