ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВЫХ БАНОК В ПРУТКИ И ПРОВОЛОКУ НЕОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ИСКЛЮЧАЮЩАЯ ИХ ПЕРЕПЛАВ

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

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье описаны суть и особенности реализации технологии переработки дробленых сыпучих отходов использованных алюминиевых банок в прутки и проволоку различного диаметра, полностью исключающей плавильный передел. Такой подход позволяет заметно повысить выход годного и снизить энергозатраты на проведение основных операций по переработке отходов.

Цель работы: составление и практическая апробация базовой технологической схемы по изготовлению полуфабрикатов из сыпучих отходов алюминиевых банок с поэтапным изучением характера изменения их механических характеристик. **Используемые методы:** при воплощении предлагаемой схемы использованы приемы и методы, применяемые в смежных областях промышленного производства, связанных с реализацией технологий порошковой металлургии и обработки металлов давлением. **Новизна:** полученные данные можно считать сравнительно новыми, так как до последнего времени рассматриваемые в работе металлические отходы утилизировались и возвращались в производственный оборот, как правило, через предварительное их пакетирование и последующий передел. **Результаты:** показана возможность получения прутковой и проволочной продукции из вторичных ресурсов на основе алюминия, приведены возможные параметры процессов обработки, выполнены механические испытания продукции, определены прочностные и пластические характеристики произведенных из дробленых отходов прутков и проволоки разного диаметра в зависимости от сообщаемой материалу при волочении степени деформации и места проведения по ходу волочения промежуточного отжига по выбранному режиму. **Практическая значимость** заключается в определении параметров обработки, позволяющих получить прутковую и проволочную продукцию с установленным уровнем свойств.

Ключевые слова: отходы алюминиевых банок, дробление, предварительная обработка, брикетирование, горячая экструзия, волочение, отжиг, прутково-проволочная продукция, механические свойства.

© Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В., Феськова Е.В., 2020

Для цитирования

Переработка отходов алюминиевых банок в прутки и проволоку ответственного назначения, исключая их передел / Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В., Феськова Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №3. С. 50–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-50-57>

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROCESSING OF ALUMINUM CAN WASTE INTO LOW DUTY RODS AND WIRE WITHOUT REMELTING

Zagirov N.N.¹, Loginov Yu.N.², Ivanov E.V.¹, Feskova E.V.¹

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper describes a key point and features of processing of bulk crushed aluminum can waste into rods and wire of various diameters, completely excluding their remelting. Such approach leads to a significant yield gain and energy cost reduction for the main operations of waste processing. **Objectives:** To draw out and practically test a basic process flow diagram for manufacturing semi-finished products from bulk aluminum can waste, and study step by step a pattern of changes in mechanical characteristics. **Methods Applied:** When introducing the suggested diagram, the authors applied the techniques and methods used in related areas of industrial production connected with powder metallurgy and metal forming. **Originality:** The obtained data can be considered relatively new, as until quite recently metal waste under study in the paper was disposed and returned to production, as a rule, by preliminary baling and subsequent remelting. **Findings:** The paper shows the possibility of producing bar and wire products from aluminum-based secondary resources, contains possible processing parameters, and performed mechanical tests of products, identifies strength and ductility of bars and wire of various diameters produced from crushed waste depending on the degree of deformation and the place of intermediate annealing in the course of drawing according to the selected mode. **Practical Relevance:** It lies in determining the processing parameters that make it possible to produce bar and wire products with a specified level of properties.

Keywords: aluminum can waste, crushing, preparatory treatment, briquetting, hot-melt extrusion, drawing, annealing, rods and wire products, mechanical properties.

For citation

Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Ivanov E.V., Feskova E.V. Processing of Aluminum Can Waste into Low Duty Rods and Wire Without Remelting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 50–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-50-57>

Введение

Одним из наиболее распространенных видов отходов, привлекающих внимание переработчиков вторичного алюминиевого сырья, являются остающиеся после использования банки из-под различных напитков [1, 2]. По данным статистики, емкость российского рынка алюминиевых банок оценивается приблизительно в 2–3 миллиарда. Учитывая вес банки даже небольшого объема, составляющий порядка 15 г, получаем необходимое количество затрачиваемого алюминия, которое даже по грубым оценкам составляет 30–40 тыс. т чистого металла в год. А если принять во внимание и энергетические ресурсы, связанные с производством металла из первичного сырья, становятся очевидным перспективы развития в алюминиевой промышленности перерабатывающей отрасли [3].

Сбором использованных банок занимаются, как правило, мелкие фирмы, которые реализуют только часть цикла утилизации: отделение магнитной сепарацией механической примеси железа, пакетирование и обжиг пакетов с целью уда-

ления обычно применяемых поверхностных покрытий, а также передачу другим предприятиям для переплавки.

Стоит отметить, что различные элементы алюминиевых банок изготавливают из различных марок алюминиевых сплавов [4]. В корпусе банки применяют сплав 3004 (Д12) или близкий к нему по химическому составу сплав 3104: марганца и магния в них в среднем по 1%, меди – до 0,25% и железа – до 0,7–0,8%. Крышку банки делают из сплава 5182. В этом сплаве магния уже 4–5%, а марганца – 0,20–0,50%. Ключ для открывания банки, дающий самый малый вклад в общую массу банки, изготавливают из сплава 5042 с содержанием магния 3–4% и марганца – 0,20–0,50%. Вид баночных отходов после разделки на отдельные составляющие показан на рис. 1.

Область рециркуляции алюминия и относительно высокая стоимость материала означают, что в отличие от конкурирующих упаковок, таких как стеклянные и пластиковые бутылки, подавляющая часть металла из лома алюминиевых банок – около 80% – возвращается к производителям новых банок. Процесс можно считать за-

мкнутым, экологически устойчивым, с достаточно эффективным циклом высоких показателей рециркуляции [5, 6]. При этом руководствуются, как правило, общим подходом к их переработке, схематично отображенным на **рис. 2** [7].

Рис. 1. Вид баночных отходов после их разделки на отдельные составляющие

Fig. 1. Can waste after crushing into fragments

Рис. 2. Общая технологическая схема переработки отходов алюминиевых банок, применяемая на многих заводах Западной Европы

Fig. 2. A general process flow diagram of processing aluminum can waste applied at many plants in Western Europe

Некоторую часть лома алюминиевых банок переплавляют в обычных или роторных плавильных печах, и она идет на изготовление литейных сплавов. Существует, однако, на наш взгляд, и другой альтернативный вариант вовлечения баночных отходов в производственный оборот, заключающийся в реализации, по терминологии зарубежных исследователей, твердотельного способа утилизации сыпучих металлических отходов. Базируется он на применении только традиционных процессов обработки давлением пористых металлических сред без использования плавильного предела [8, 9].

Материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

В работе для опробования указанного подхода в качестве исходного сырья использовали дробленые фрагменты корпуса банок, выполненного, как отмечалось выше, из алюминиевого сплава марки 3004. В развернутом виде химический состав указанного сплава приведен в **табл. 1**.

Таблица 1. Химический состав сплава 3004
Table 1. Chemical composition of alloy 3004

Массовая доля элементов, %								
Основные компоненты				Примеси, не более				
Al	Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Zn	Cr	
основа	0,85–1,15	1,0–1,25	0,35–0,55	0,2	0,05–0,2	0,15	0,15	

Конечным объектом переработки была принята прутково-проволочная продукция разного диаметра, практическое назначение которой в первом приближении определить однозначно не представлялось возможным. Была поставлена общая задача составления базовой технологической схемы по изготовлению такого рода полуфабрикатов с поэтапным изучением характера изменения их механических характеристик.

Исходный материал изначально был получен за счет реализации процессов дробления отходов банок и их фрагментирования с использованием специальных измельчающих машин-шредеров. После дробления на поверхности частиц оставались следы лакокрасочных покрытий, которые в виде тематических рисунков и текстов наносятся на корпуса банок при их изготовлении. С точки зрения последующей переработки это является нежелательным фактором, поэтому дробленые отходы подвергали дополнительной предварительной обработке, после чего они приобретали вид, приведенный на **рис. 3**.

Рис. 3. Общий вид отходов после дробления и термической обработки (обжига) на воздухе
Fig. 3. A general view of waste after crushing and heat treatment (annealing) in air

На рис. 4 представлена развернутая технологическая схема изготовления прутков и проволоки, включающая стадии предварительной подготовки дробленых отходов к переработке, холодного брикетирования, горячей экструзии и холодного волочения.

Рис. 4. Технологическая схема изготовления прутков и проволоки из дробленых баночных отходов
Fig. 4. A process flow diagram of producing rods and wire from crushed can waste

Обоснование выбранной схемы состоит в следующем. В перечне операций отсутствует переплав, поскольку тонкомерные фрагменты

будут окислены в атмосфере печи. Обычно такие отходы плавают по поверхности расплава. Их окружает пленка оксидов алюминия, которая не дает возможности слияния отдельных расплавленных фрагментов в единое целое. Поэтому выгоднее использовать режим твердофазной обработки, включающий элементы порошковой металлургии. После получения брикета целесообразно применить именно горячую экструзию, а не прокатку, поскольку этому способствует форма брикета, а также схема всестороннего сжатия, повышающая пластичность металла.

Из-за неправильности формы и относительной крупности фрагментов отходов насыпная плотность их перед брикетированием была сравнительно низкой. Поэтому в конечном итоге, несмотря на прикладываемое давление $p = 180$ МПа (что соответствовало для диаметра рабочего канала пресс-формы 42 мм усилию брикетирования 250 кН), брикеты, как видно из рис. 5, получались достаточно низкими, высотой 20–25 мм. При общей массе каждого брикета порядка 60–75 г их интегральная плотность составляла $2,23\text{--}2,29$ г/см³, что соответствовало относительной плотности 82–84%.

Рис. 5. Общий вид брикетов, полученных холодным брикетированием дробленых баночных отходов
Fig. 5. A general view of briquettes produced by cold briquetting of crushed can waste

В дальнейшем для повышения выхода годного при получении прутков решено было использовать составные (состоящие из 2-х брикетов) заготовки, общая высота которых равнялась 40–50 мм. Поскольку для прессования заготовок из сплава системы Al-Mn рекомендуют оснастку нагревать до температуры 400–430°C, а саму заготовку – до температуры 440–480°C [10], составной брикет размещали внутри рабочей зоны контейнера. После чего инструментальную наладку нагревали до 430–450°C, обеспечивая в ходе экструзии изотермические условия деформирования. Для проведения экспериментов использовали оснастку и оборудование, общий вид которых показан на рис. 6.

Рис. 6. Схема инструментальной оснастки (а) и сборки (б) установки для проведения горячей экструзии:
1 – пресс-штемпель; 2 – ограничитель хода; 3 – контейнер; 4 – пресс-шайба; 5 – заготовка; 6 – подкладка;
7 – матрицедержатель; 8 – основание; 9 – матрица
Fig. 6. Tool equipment (a) and assembly (b) of the hot-melt extrusion machine: 1 is an extrusion ram; 2 is a stop block;
3 is a bin; 4 is a pressure disc; 5 is a workpiece; 6 is a plate; 7 is a die holder; 8 is a base stand; 9 is a die

Результаты исследования и их обсуждение

Как уже отмечалось выше, горячей экструзией были получены прутки $\varnothing 8,4$ мм и $6,8$ мм, которые далее подвергали холодной обработке волочением, сопровождая ее промежуточными отжигами. Это объясняется тем, что сплав, отходы которого рассматривались в работе, термической обработкой не упрочняется, а профили из него поставляются, как правило, в отожженном или упрочненном холодной деформацией состояниях [10]. При составлении маршрута волочения не стремились к его оптимальности, назначая единичные обжатия на уровне 10–12% за проход. Произвольно выбирались и места проведения отжигов, которые каждый раз проходили по единому режиму: $\theta_{\text{отж}} = 380^\circ\text{C}$, $\tau = 1$ ч. После одного из этапов обработки по мере уменьшения диаметра осуществлялся отбор образцов проволоки (по 3 шт. на каждый диаметр) для проведения механических испытаний на растяжение. Общий вид фрагментов проволоки разного диаметра приведен на рис. 7. Результаты выполненных с использованием стандартных методик испытаний, в ходе которых определяли временное сопротивление разрыву σ_b , относительное удлинение δ и относительное сужение ψ , представлены в табл. 2 и 3, в которых приведены усредненные показатели указанных величин для двух опробованных вариантов.

Рис. 7. Проволока разного диаметра, полученная из дробленых баночных отходов
Fig. 7. Wire of various diameters produced from crushed can waste

Приведенные в табл. 2 и 3 данные свидетельствует о следующем:

1. Изменение коэффициента вытяжки при горячей экструзии в интервале значений λ от 29 до 44 принципиального влияния на уровень механических характеристик экструдированных прутков не оказывает. При реализуемом в ходе экспериментов температурно-скоростном режиме горячей обработки временное сопротивление разрыву σ_b достигает значений 210–220 МПа, относительное удлинение $\delta = 10$ –15%, относительное сужение $\psi = 30$ –35%.

2. Проведение после горячей экструзии отжига прутков по выбранному температурно-временному режиму приводит к некоторому снижению прочности и повышению пластичности. Однако изменение показателей, характеризующих указанные свойства, довольно незначительно. По величине σ_b снижение составляет 9–12%, по δ увеличение чуть больше и равняется 28–30%, по ψ – чуть меньше и равняется 15–20%.

3. Холодное волочение как неотожженных, так и отожженных прутков приводит к заметному упрочнению материала с одновременным снижением пластичности. При этом деформация горячепрессованного прутка, который промежуточному отжигу не подвергается, при значении суммарного относительного обжатия $\epsilon_{\Sigma} = 45,5\%$ вызывает увеличение показателя прочности в 1,3 раза (σ_b достигает максимальных

для рассматриваемого случая значений 270–275 МПа). Показатели пластичности при этом снижаются по величине δ в 2 раза, а по величине ψ – в 1,2 раза. Волочение полученного горячей экструзией прутка после проведения отжига также способствует повышению прочности и снижению пластичности. Однако изменение абсолютных значений основных их показателей в значительной мере зависит от сообщаемой материалу степени деформации. Чем больше величина суммарного относительного обжатия ϵ_{Σ} , тем заметнее упрочнение материала. При этом следуя общим тенденциям, отражающим характер изменения механических свойств металлов при холодной обработке, наиболее интенсивный прирост прочности происходит на начальном этапе развития деформации после проведения отжига до значений $\epsilon_{\Sigma} = 20$ –30%.

Таблица 2. Результаты механических испытаний прутков и проволоки, полученных из прутка $\varnothing 8,4$ мм
Т а б л и ц а 2. Mechanical tests of rods and wire produced from rods with a diameter of 8.4 mm

Стадии технологического процесса	Механические характеристики		
	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
1. Горячая экструзия	209	13	30
2. Отжиг на $\varnothing 8,4$ мм	190	18,5	34,5
3. Волочение с $\varnothing 8,4$ мм до $\varnothing 7,5$ мм ($\epsilon_{\Sigma} = 20\%$)	233	7,5	17
4. Отжиг на $\varnothing 7,5$ мм	178,5	14	28

Таблица 3. Результаты механических испытаний прутков и проволоки, полученных из прутка $\varnothing 6,8$ мм
Т а б л и ц а 3. Mechanical tests of rods and wire produced from rods with a diameter of 6.8 mm

Стадии технологического процесса	Механические характеристики		
	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
1. Горячая экструзия	215	14	32
2. Отжиг на $\varnothing 6,5$ мм	189,5	19,5	43,5
3. Волочение с $\varnothing 6,5$ мм до $\varnothing 5,4$ мм ($\epsilon_{\Sigma} = 31\%$)	252,5	7,5	31
4. Волочение с $\varnothing 5,4$ мм до $\varnothing 5,1$ мм ($\epsilon_{\Sigma} = 38,5\%$)	254,5	6	20
5. Волочение с $\varnothing 6,5$ мм до $\varnothing 4,8$ мм ($\epsilon_{\Sigma} = 45,5\%$)	273,5	7	26
6. Отжиг на $\varnothing 4,8$ мм	202	19,5	40
7. Волочение с $\varnothing 4,8$ мм до $\varnothing 4,0$ мм ($\epsilon_{\Sigma} = 31\%$)	226	4,5	6
8. Волочение с $\varnothing 4,0$ мм до $\varnothing 3,0$ мм ($\epsilon_{\Sigma} = 61\%$)	257	3	2

Заключение (выводы)

1. Установлена возможность переработки отходов алюминиевых банок в прутки и проволоку с использованием приемов, исключающих пере-
плав.

2. Опробована последовательность операций, позволяющая получить продукт в виде прутков и проволоки, а также описан комплекс свойств этого продукта.

3. Применение методов холодной пластической деформации позволяет повышать прочностные свойства продукта.

Список литературы

1. Stotz P.M., Niero M., Bey N., Paraskevas D. Environmental screening of novel technologies to increase material circularity: A case study on aluminium cans. *Resources, Conservation and Recycling* 127, 96–106 (2017).
2. Ingaldi M., Borkowski S. Recycling process of the aluminium cans as an element of the sustainable development concept. *Manufacturing Technology*, 14(2), 172–178 (2014).
3. Duan R.B., Bai P.K., Yang J., Zhang W.D., Ding H. Study on waste aluminum cans remelting and purification technology. *Applied Mechanics and Materials*, 372, 360–363 (2013).
4. Промышленные алюминийевые сплавы: справочник. М.: Металлургия, 1984. 526 с.
5. Bulei C., Todor M.P., Heput T., Kiss I. Recovering Aluminium for Recycling in Reusable Backyard Foundry that Melts Aluminium Cans. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 416(1), 012099 (2018).
6. Verran G.O., Kurzawa U. An experimental study of aluminum can recycling using fusion in induction furnace. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), 731–736 (2008).
7. Фомин Б. А. Металлургия вторичного алюминия. М.: Экомет, 2004. 240 с.
8. 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. федер. ун-т, 2015. 171 с.
9. Вариант технологии получения прутково-проволочной продукции из силумина АК12 / Н.Н. Загиров, Ю.Н. Логинов, С.Б. Сидельников, Е.В. Иванов // *Металлург*. 2018. № 6. С. 89–95.
10. Ерманок М.З., Фейгин В.И., Сухоруков Н.А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1977. 264 с.

References

1. Stotz P.M., Niero M., Bey N., Paraskevas D. Environmental screening of novel technologies to increase material circularity: A case study on aluminium cans. *Resources, Conservation and Recycling* 127, 96–106 (2017).
2. Ingaldi M., Borkowski S. Recycling process of the aluminium cans as an element of the sustainable development concept. *Manufacturing Technology*, 14(2), 172–178 (2014).
3. Duan R.B., Bai P.K., Yang J., Zhang W.D., Ding H. Study on waste aluminum cans remelting and purification technology. *Applied Mechanics and Materials*, 372, 360–363 (2013).
4. *Promyshlennyye alyuminiyevyye splavy: Spravochnik* [Industrial aluminum alloys: Reference guide]. Moscow: Metallurgy, 1984, 526 p. (In Russ.)
5. Bulei C., Todor M.P., Heput T., Kiss I. Recovering aluminium for recycling in reusable backyard foundry that melts aluminium cans. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 416(1), 012099 (2018).
6. Verran G.O., Kurzawa U. An experimental study of aluminum can recycling using fusion in induction furnace. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), 731–736 (2008).
7. Fomin B.A. *Metallurgiya vtorichnogo alyuminiya* [Metallurgy of secondary aluminum]. Moscow: Ekomet, 2004, 240 p. (In Russ.)
8. Zagirov N.N., Loginov Yu.N. *Tekhnologicheskie osnovy polucheniya materialov i izdeliy iz syupchikh struzhkovykh otkhodov medi i ee splavov metodami obrabotki davleniem: monografiya* [Technological basis for producing materials and products from chip waste of copper and its alloys by metal forming: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2015, 171 p. (In Russ.)
9. Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Sidelnikov S.B., Ivanov E.V. An option of the technology for producing bars and wire products from silumin AK12. *Metallurg* [Metallurgist], 2018, no. 6, pp. 89–95. (In Russ.)
10. Ermanok M.Z., Feigin V.I., Sukhorukov N.A. *Pressovanie profiley iz alyuminiyevykh splavov* [Extrusion of aluminum alloy profiles]. Moscow: Metallurgy, 1977, 264 p. (In Russ.)

Поступила 09.07.2020; принята к публикации 07.09.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 09/07/2020; revised 07/09/2020; published 25/09/2020

Загиров Николай Наильич – канд. техн. наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Email: kafomd_1@mail.ru

Логинов Юрий Николаевич – д-р техн. наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. Email: unl@mtf.ustu.ru

Иванов Евгений Владимирович – ст. преподаватель, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Email: kafomd_1@mail.ru

Феськова Елена Васильевна – канд. пед. наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Email: kafomd_1@mail.ru

Nikolay N. Zagirov – PhD (Eng.), Associate Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Email: kafomd_1@mail.ru

Yury N. Loginov – DrSc (Eng.), Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. Email: unl@mtf.ustu.ru

Evgeny V. Ivanov – Senior Lecturer, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Email: kafomd_1@mail.ru

Elena V. Feskova – PhD (Ed.), Associate Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Email: kafomd_1@mail.ru