

ПРИЧИНЫ ФОРМИРОВАНИЯ И СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРУТКОВОГО ПРИПОЯ, ПОЛУЧЕННОГО ПРЯМОЙ ЭКСТРУЗИЕЙ

С.Р. Фаизов¹, faizovsr@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6644-1173>

Л.В. Радионова², radionovalv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9587-2925>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация. Ужесточение показателей экологической безопасности и ограничение использования свинца в новом электротехническом и электронном оборудовании до величины не более 0,01 % продиктовали необходимость поиска новых легкоплавких сплавов для использования в качестве припоя. Сплав 52In–48Sn, являясь одним из самых перспективных бессвинцовых припоев, востребован электротехнической промышленностью в виде прутков и проволоки. В данной статье описана технология получения пруткового припоя из сплава 52In–48Sn в условиях мелкосерийного производства и проблемы, с которыми столкнулись при ее реализации. В данной статье представлены результаты исследования причин образования поверхностного дефекта «воздушные пузыри» у прутков Ø8,0 и Ø15,0 мм из сплава 52In–48Sn, изготовленных методом прямой экструзии. Моделирование в программе QForm процесса распрессовки заготовок в контейнере в процессе экструзии показало, что причиной образования дефекта «воздушные пузыри» на поверхности прутков является чрезмерный зазор между контейнером и заготовкой. В процессе осадки заготовки в контейнере объем воздуха запирается в контейнере и поступает внутрь сплава. Для устранения этого дефекта при прессовании необходимо минимизировать зазор между заготовкой и контейнером. Отношение длины к диаметру заготовки не должно превышать 2,5. Чтобы исключить поверхностный дефект «воздушные пузыри» готовой продукции, эти требования необходимо учитывать при конструировании инструмента для прямого прессования (экструзии). Результаты проведенных исследований экспериментально подтверждены при изготовлении прутков Ø8,0 мм. Уменьшение зазора между контейнером и заготовкой до 0,5 мм позволило получить прутки с высоким качеством поверхности.

Ключевые слова: экструзия, сплав 52In–48Sn, бессвинцовый припой, пруток, поверхностный дефект, воздушные пузыри

Для цитирования: Фаизов С.Р., Радионова Л.В. Причины формирования и способы устранения воздушных пузырей на поверхности пруткового припоя, полученного прямой экструзией // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т. 23, № 1. С. 38–46. DOI: 10.14529/met230105

Original article
DOI: 10.14529/met230105

REASONS FOR THE FORMATION AND METHODS TO ELIMINATE AIR BUBBLES ON THE SURFACE OF SOLDER ROD PRODUCED BY DIRECT EXTRUSION

S.R. Faizov¹, faizovsr@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6644-1173>

L.V. Radionova², radionovalv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9587-2925>

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract. The tightening of environmental safety indicators and limiting the use of lead in new electrical and electronic equipment to a value of no more than 0.01% dictated the need to search for new low-melting alloys for use as solder. Alloy 52In–48Sn, being one of the most promising lead-free solders, is in demand by the electrical industry in the form of rods and wire. This article describes the technology for producing rods solder from the 52In–48Sn alloy in small-scale production and the problems encountered in its implementation. The article presents the results of a study of the causes of the formation of a surface

defect “air bubbles” of $\varnothing 8.0$ and $\varnothing 15.0$ mm rods made by direct extrusion from the 52In–48Sn alloy. Simulation in the QForm program of the pressing process billets in a container during the extrusion showed that the reason for the formation of a defect “air bubbles” on the surface of the rods is an excessive gap between the container and the. In the billet upsetting process, the air volume is locked in the container and enters the interior of the alloy. To eliminate this defect during extrusion, it is necessary to minimize the gap between the billet and the container. The length to diameter ratio of the billet should not exceed 2.5. When designing a tool for direct extrusion, these requirements must be taken into account in order to eliminate the surface defect “air bubbles”. The research results were confirmed in the manufacture $\varnothing 8.0$ mm rods with high surface quality.

Keywords: extrusion, 52In–48Sn alloy, lead-free solder, rod, surface defect, air bubbles

For citation: Faizov S.R., Radionova L.V. Reasons for the formation and methods to eliminate air bubbles on the surface of solder rod produced by direct extrusion. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2023;23(1):38–46. (In Russ.) DOI: 10.14529/met230105

Введение

Запрос на поиск новых материалов с высоким уровнем функциональных свойств формируется промышленностью по разным причинам. Часто это связано с развитием техники и технологий, но иногда такие задачи формулирует рынок из-за ценовой политики или повышения требований со стороны экологических стандартов. Ужесточение показателей экологической безопасности и ограничение использования свинца в новом электротехническом и электронном оборудовании до величины не более 0,01 % продиктовали необходимость поиска новых легкоплавких сплавов для использования в качестве припоя.

Для решения этой проблемы в последние годы создан ряд бессвинцовых припоев на базе систем Sn–Cu, Sn–Ag, Sn–Ag–Cu [1–4]. Бессвинцовые технологии отличаются значительным повышением температуры пайки, а именно с 230 °C при использовании сплава Sn60Pb40 (температура плавления 183 °C) до 265...270 °C при использовании наиболее легкоплавкого, общепризнанного бессвинцового припоя Sn3Ag0,7Cu (температура плавления 217 °C). Смена припоя на высокотемпературный требует смены флюсов, основных материалов печатных плат, обновления технологического оборудования и как следствие – пересмотра удельных затрат. Это, в свою очередь, приводит к необходимости инвестиций в обновление производства. Поэтому в последние годы было уделено большое внимание разработке припоев с низкой температурой плавления. Повышенное внимание низкотемпературным припоям уделяется еще и в связи с тем, что современные чипы и микросхемы имеют дополнительные ограничения по температурному режиму при пайке. Таким

требованиям отвечают сплавы систем Sn–In, Sn–Bi [5, 6]. Несмотря на то, что индий (In) в земной коре очень мало и технология его получения достаточно сложная, он является одним из перспективных материалов для получения бессвинцовых припоев. Это связано, в том числе, с тем, что источниками индия являются отходы и промежуточные продукты производства цинка и свинца [7].

Для мелкосерийного и ресурсосберегающего производства проволочного и пруткового припоя нами разработана технология прямой экструзии (прессования) сплава 52In–48Sn [8].

Производство проволоки $\varnothing 2,0$ мм не сопровождалось проблемами и получением бракованной продукции, а при изготовлении прутков $\varnothing 8,0$ и $\varnothing 15,0$ мм на поверхности образовывались дефекты в виде пузырьков воздуха (рис. 1).

Воздушный пузырь – это дефект, возникающий при экструзии (прессовании), представляющий собой одиночную или полосообразную выпуклость на поверхности готового изделия, заполненную воздухом. Основными причинами образования пузырьков воздуха являются следующие [9]:

- 1) в контейнер попадает влага вместе со смазочным материалом, заготовкой;
- 2) размер контейнера в результате износа увеличивается в диаметре и в контейнере остается слишком большое количество воздуха;
- 3) заготовка имеет дефекты рыхлости и пористости;
- 4) большое содержание водорода в заготовке;
- 5) слишком высокие температуры заготовки и контейнера при горячем прессовании;
- 6) зазор между заготовкой и контейнером слишком большой, и после начала прессования воздух закупоривается при сваливании

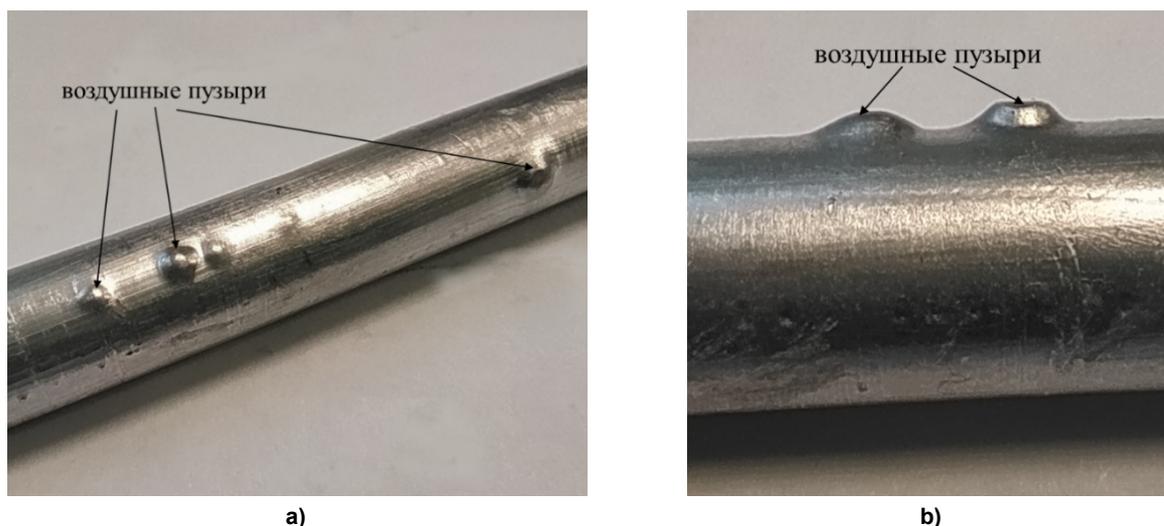


Рис. 1. Дефект «воздушные пузыри»
Fig.1. Defect “air bubbles”

или бочкообразовании в процессе осадки заготовки в контейнере;

7) скорость экструзии (прессования) слишком высокая, и разогрев приводит к увеличению объема воздуха в контейнере.

Целью настоящей работы является исследование причин образования воздушных пузырей на поверхности прутков $\varnothing 8,0$ и $\varnothing 15,0$ мм и поиск решений для исключения их образования при производстве.

Материалы и методы исследования

Сплав 52In–48Sn состоит из 52 % индия и 48 % олова. При указанном химическом составе сплав является эвтектическим и имеет температуру плавления 120 °С [8]. Временное сопротивление разрыву при растяжении – 11,5 МПа. Сплав не упрочняемый при холодной пластической деформации.

Учитывая эти особенности сплава, для мелкосерийного производства прутков припой нами был предложен метод прямого прессования на гидравлическом прессе с использованием инструмента, показанного на рис. 2. Исследования проводились в лаборатории обработки металлов давлением Южно-Уральского государственного университета. При конструировании инструмента руководствовались такими требованиями, как необходимый запас прочности, низкая стоимость изготовления и использование недорогих инструментальных марок стали [10]. Математическим моделированием были определены технологические параметры прямого прессования прутков $\varnothing 8,0$ и $\varnothing 15,0$ мм из сплава

52In–48Sn [11–13]. Опытная партия прутков $\varnothing 8,0$ и $\varnothing 15,0$ мм была изготовлена по технологическим параметрам, приведенным в таблице. Показатели, полученные при опытном производстве, соответствовали результатам расчета по математической модели. Однако качество поверхности прутков не соответствовало требованиям из-за наличия дефекта «воздушные пузыри» (см. рис. 1). Для выявления причин образования поверхностного дефекта в виде пузырьков воздуха использовалось моделирование процесса прямой экструзии (прессования) в программе QForm [14–18].

Результаты и дискуссия

Попадание влаги, слишком высокая температура процесса экструзии, перегрев контейнера и заготовки были исключены из анализа возможных причин образования дефекта «воздушные пузыри». Экструзию сухой заготовки всегда проводили при температуре лаборатории, обычно это 22...24 °С. Контейнер в процессе многократной экструзии не нагревается выше температуры 32 °С [8]. Попытка снижения скорости экструзии также не дала положительного результата. Пузырьки воздуха образовывались на поверхности прутков и при низкой скорости экструзии. Наиболее вероятными причинами образования поверхностного дефекта являются неправильно подобранный диаметр заготовки и (или) ее слишком большая длина. Для проверки предположения было смоделировано поведение заготовки в контейнере при прессовании.

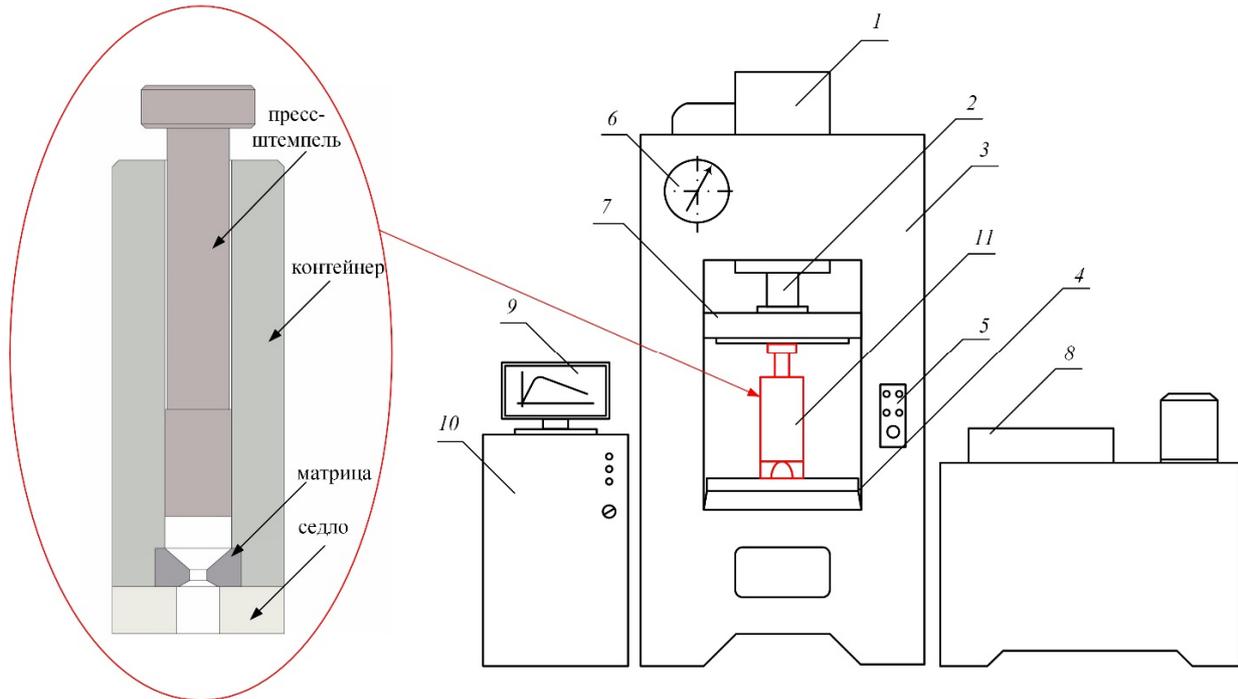


Рис. 2. Схема лабораторного гидравлического пресса: 1 – главный цилиндр; 2 – шток; 3 – станина; 4 – рабочий стол; 5 – пульт управления; 6 – манометр; 7 – ползун; 8 – маслостанция; 9 – монитор; 10 – блок управления и сбора данных; 11 – оснастка для экструзии

Fig. 2. Scheme of a laboratory hydraulic press: 1 – main cylinder; 2 – stock; 3 – bed; 4 – desktop; 5 – control panel; 6 – manometer; 7 – slider; 8 – oil station; 9 – monitor; 10 – block of control and data collection; 11 – equipment for extrusion

Результаты расчета по математической модели параметров экструзии
Calculation results according to the mathematical model of extrusion parameters

Параметр	Размерность	Величина	
		пруток 8,0 мм	пруток 15,0 мм
Исходные данные			
Диаметр заготовки (прутка), $D_{вх}$	мм	30,0	30,0
Диаметр готовой проволоки, $D_{вых}$	мм	8,0	15,0
Длина заготовки, L	мм	120	120
Диаметр контейнера, $D_{кон}$	мм	32,0	31,0
Скорость прессования, $V_{пр}$	мм/с	3,5	12,0
Соппротивление деформации заготовки (52In–48Sn), σ	МПа	10,5	10,5
Полуугол матрицы, α	град.	40,0	33,5
Коэффициент трения, f	–	0,5	0,5
Результаты расчета			
Коэффициент вытяжки, μ	–	16,0	4,3
Скорость истечения, $V_{ист}$	мм/с	56	51
Усилие в момент начала прессования, $F_{н}$	кН	106,0	92,8
Усилие в момент завершения прессования, $F_{к}$	кН	55,6	41,0

Моделирование проводилось для заготовок $\varnothing 30,0$ мм, что соответствует технологическим параметрам экспериментальной экструзии. Заготовка помещается в контейнер, распрессовывается, т. е. осаживается, в результате

чего происходит заполнение контейнера и только после этого начинается непосредственно сама экструзия сплава из матрицы. Именно процесс распрессовки и привлек наше внимание в процессе компьютерного моделирования.

Зоны контакта сплава с контейнером при моделировании окрашены в синий цвет, а в зонах, где между контейнером и заготовкой есть воздух, мы видим серый цвет (рис. 3). В обозначении «40/1» цифра «40» указывает на длину заготовки, а цифра «1» указывает на одновременное количество заготовок в контейнере. По результатам моделирования пресования заготовки $\varnothing 30,0$ мм в контейнере $\varnothing 32,0$ мм можно отметить, что деформация заготовки начинается с ее нижнего конца и в верхней области контейнера. Это приводит к закрытию средней части контейнера деформируемым сплавом и там остается воздух. Визуально изгиб заготовки $\varnothing 30,0$ мм не виден.

Для лучшей визуализации поведения заготовки в контейнере было проведено моделирование распрессовки заготовки $\varnothing 25,0$ мм в контейнере $\varnothing 32,0$ мм (рис. 4).

Длина заготовок при исследовании также варьировалась и составляла 40, 60 и 120 мм. Результат моделирования с обозначением

«120/1» хорошо визуализирует изгиб заготовки при осадке (распрессовке) заготовки при невыполнении соотношения $L/D_{\text{вх}} \leq 2,5$, общеизвестного для процессов свободной осадки. Осадкой не рекомендуется деформировать заготовки, у которых отношение высоты к диаметру больше 2,5, так как при этом возможно искривление оси заготовки [19]. Именно это мы и наблюдаем в процессе распрессовки заготовки в контейнере.

По результатам моделирования был рассчитан объем воздуха в контейнере для различных вариантов заполнения контейнера заготовкой (рис. 5). Диаметр заготовки оказывает существенное влияние на объем воздуха, запертого в контейнере. Наиболее показательный вариант моделирования – одна заготовка длиной 40 мм в контейнерах. При заготовке $\varnothing 30,0$ мм объем воздуха, запертого в контейнере, составляет 68 мм^3 , а при заготовке $\varnothing 25,0$ мм этот объем увеличивается до 747 мм^3 . Длина заготовки также влияет на объем воз-

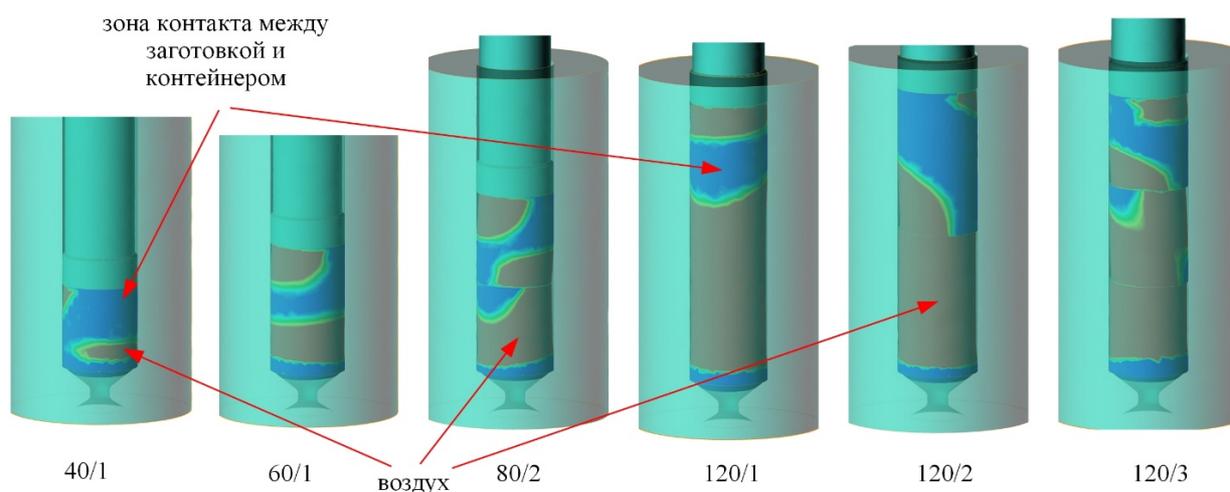


Рис. 3. Моделирование в QForm распрессовки заготовки $\varnothing 30,0$ мм в контейнере $\varnothing 32,0$ мм
 Fig. 3. Simulation in QForm of pressing out a workpiece $\varnothing 30.0$ mm in a container $\varnothing 32.0$ mm

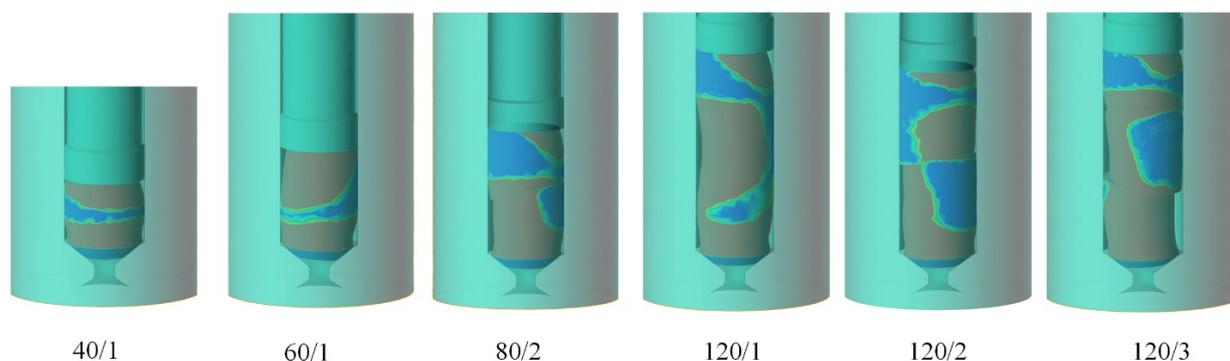


Рис. 4. Моделирование в QForm распрессовки заготовки $\varnothing 25,0$ мм в контейнере $\varnothing 32,0$ мм
 Fig. 4. Modeling in QForm of pressing out a workpiece $\varnothing 25.0$ mm in a container $\varnothing 32.0$ mm

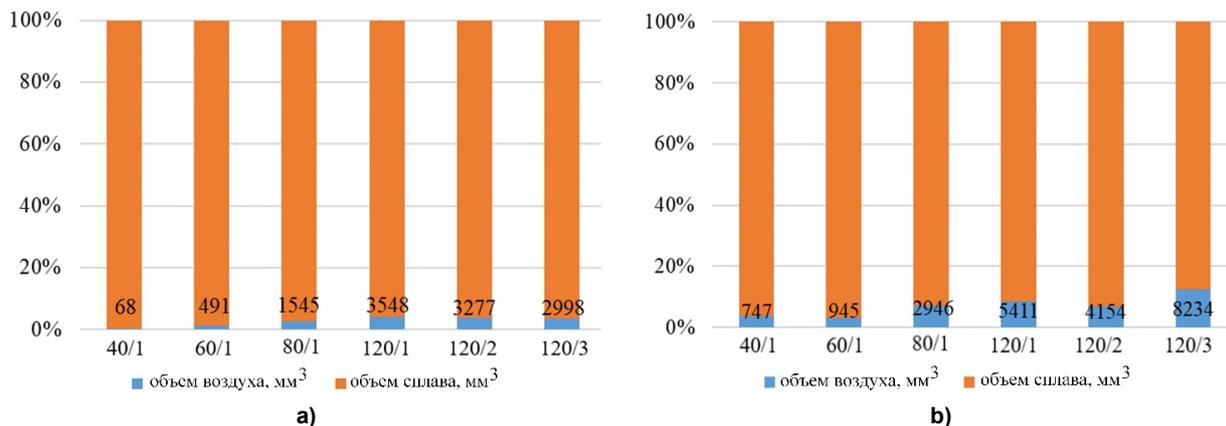


Рис. 5. Результаты расчета объема воздуха в контейнере при экструзии прутка $\varnothing 8,0$ мм из заготовок: а – $\varnothing 30,0$ мм; б – $\varnothing 25,0$ мм

Fig. 5. Results of calculating the volume of air in the container during the extrusion of a rod $\varnothing 8,0$ mm from blanks: а – $\varnothing 30,0$ mm; б – $\varnothing 25,0$ mm



Рис. 6. Прутки $\varnothing 8,0$ мм, полученные при экструзии из заготовки $\varnothing 31,5$ мм
Fig. 6. Bars $\varnothing 8,0$ mm obtained by extrusion from a billet $\varnothing 31,5$ mm

духа, запертого в контейнере. Объем воздуха, запертого в контейнере при прессовании одной заготовки длиной 40 мм и длиной 120 мм («120/1»), составляет 3548 мм³, а при длине 120 мм, состоящей из трех заготовок («120/3»), объем захваченного воздуха уменьшается до 2998 мм³.

Результаты моделирования и расчета объема воздуха показали, что основной причиной получения поверхностного дефекта «воздушные пузыри» является диаметр и длина заготовки при экструзии. Зазор между заготовкой и контейнером должен быть как можно меньше. Также для уменьшения объема воздуха в контейнере можно использовать заготовки в количестве, необходимом для полного заполнения контейнера, но длиной каждой не более $2,5D_{\text{вх}}$.

По результатам исследований экструзии прутков $\varnothing 8,0$ и $\varnothing 15,0$ мм был скорректирован диаметр заготовки. Для прутков $\varnothing 8,0$ мм диаметр литой заготовки должен быть 31,5 мм, для прутков $\varnothing 15,0$ мм – 30,5 мм. Эксперимен-

тальная проверка скорректированных параметров экструзии подтвердила отсутствие дефекта «воздушные пузыри» на поверхности прутков $\varnothing 8,0$ мм (рис. 6).

Заключение

Моделирование в программе QForm процесса распрессовывания заготовок в контейнере при экструзии прутков $\varnothing 8,0$ и $\varnothing 15,0$ мм из сплава 52In–48Sn показало, что причиной образования поверхностного дефекта «воздушные пузыри» является чрезмерный зазор между контейнером и заготовкой. В процессе осадки заготовки объем воздуха запирается в контейнере и поступает внутрь сплава. Для устранения этого дефекта прутков при экструзии необходимо минимизировать зазор между заготовкой и контейнером до 0,5 мм. Кроме того, целесообразно делить заготовки на части по условию $L/D_{\text{вх}} \leq 2,5$. Кроме того, чтобы исключить поверхностный дефект «воздушные пузыри» готовой продукции, эти тре-

бования необходимо учитывать при конструировании инструмента для прямого прессования. Результаты проведенных исследований экспериментально подтверждены при изго-

товлении прутков $\varnothing 8,0$ мм. Уменьшение зазора между контейнером и заготовкой до 0,5 мм позволило получить прутки с высоким качеством поверхности.

Список литературы

1. Бессвинцовые припои в технологии производства изделий микроэлектроники / В.В. Зенин, В.Н. Беляев, Ю.Е. Сегал, А.А. Колбенков // Микроэлектроника. 2003. Т. 32, № 4. С. 310–320.
2. Gain A.K., Zhang L., Chan Y. Microstructure, elastic modulus and shear strength of alumina (Al_2O_3) nanoparticles-doped tin–silver–copper (Sn–Ag–Cu) solders on copper (Cu) and gold/nickel (Au/Ni)-plated Cu sub-strates // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2015. Vol. 26. P. 7039–7048. DOI: 10.1007/s10854-015-3325-4
3. Медведев А.М. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? // Электронные компоненты. 2004. № 11.
4. Gain A.K., Zhang L., Quadir M.Z. Thermal aging effects on micro-structures and mechanical properties of an environmentally friendly eutectic tin-copper solder alloy // Mater. Des. 2016. Vol. 110. P. 275–283. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.007
5. Gain, A.K.; Zhang, L. Microstructure, thermal analysis and damping properties of Ag and Ni nano-particles doped Sn–8Zn–3Bi solder on OSP–Cu substrate // J. Alloys Compd. 2014. Vol. 617. P. 779–786. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.08.076
6. Gain A.K., Zhang L. Growth mechanism of intermetallic compound and mechanical properties of nickel (Ni) nanoparticle doped low melting temperature tin–bismuth (Sn–Bi) solder // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2016. Vol. 27. P. 781–794. DOI: 10.1007/s10854-015-3817-2
7. Дьяков В.Е. Производство индия из оловянного сырья экстракцией из расплавов: моногр. М.: Издат. Дом «Академия Естествознания», 2020. 144 с. ISBN 978-5-91327-609-4. EDN ABQBGJ. DOI: 10.17513/np.384
8. On the direct extrusion of solder wire from 52In–48Sn alloy / S. Faizov, A. Sarafanov, I. Erdakov et al. // Machines. 2021. Vol. 9 (5). P. 93. DOI: 10.3390/machines9050093
9. Ma X. Surface quality of aluminium extrusion products. Enschede, The Netherlands: University of Twente, 2011. 223 p.
10. Фаизов С.Р., Радионова Л.В. Моделирование и прочностной анализ при проектировании оснастки для прямого прессования легкоплавкого припоя // Пром-Инжиниринг: труды VII всероссийской научно-технической конференции, Москва, Челябинск, Новочеркасск, Волгоград, Сочи, 17–21 мая 2021 года. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2021. С. 180–185. EDN IWGN DU.
11. Компьютерное моделирование температурных режимов при полунепрерывном прямом прессовании легкоплавких материалов / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, Д.В. Громов, И.Н. Ермаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 4. С. 30–38. DOI: 10.14529/met200404
12. Математическое моделирование энергосиловых параметров прямого прессования легкоплавких материалов / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, В.Д. Лезин, А.Е. Сарафанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 2. С. 71–79. DOI: 10.14529/met200207
13. Оптимизация процесса прямого прессования проволоки из сплава ПОИн-52 методом обобщенного приведенного градиента / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, И.Н. Ермаков, А.В. Брык // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2021. Т. 21, № 1. С. 54–65. DOI: 10.14529/met210106
14. Стебунов С.А. 25 лет программе моделирования процессов обработки металлов давлением QForm // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2016. № 11. С. 3–4.
15. Пустовойтов Д.О., Песин А.М. Основы компьютерного моделирования процессов ОМД с применением программы QFORM 2D/3D. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. 73 с. ISBN 978-5-9967-2448-2. EDN VXYJFX.
16. Компьютерное моделирование в программе QForm валковой формовки профиля из круглой сварной трубы / Д.В. Громов, И.Н. Ермаков, Л.В. Радионова, А.С. Свистун // Пром-Инжиниринг: труды VII всероссийской научно-технической конференции, Москва, Челябинск, Новочеркасск, Волгоград, Сочи, 17–21 мая 2021 года. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2021. С. 176–179. EDN SIEOZJ.

17. Логинов Ю.Н., Ершов А.А. Моделирование в программном комплексе QFORM образования пресс-утяжины при прессовании // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 7. С. 42–46. EDN PJJSSQ.
18. Петров М.А., Гневашев Д.А., Крутина Е.В. Численное моделирование осадки образцов из бронзы с учетом изменения их относительной плотности // Технология металлов. 2022. № 2. С. 35–48. EDN PHZHVQ. DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-2-35-48
19. Каргин В.Р., Каргин Б.В. Основы технологических процессов ОМД: раздел прессование: учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2011. 103 с. ISBN 978-5-7883-0826-5.

References

1. Zenin V.V., Belyaev V.N., Segal Yu.E., Kolbenkov A.A. Lead-free solders in IC manufacture: a review. *Russian Microelectronics*. 2003;32(4):247–256.
2. Gain A.K., Zhang L., Chan Y. Microstructure, elastic modulus and shear strength of alumina (Al_2O_3) nanoparticles-doped tin–silver–copper (Sn–Ag–Cu) solders on copper (Cu) and gold/nickel (Au/Ni)-plated Cu sub-strates. *J. Mater. Sci. Mater. Electron*. 2015;26:7039–7048. DOI: 10.1007/s10854-015-3325-4
3. Medvedev A.M. [Lead-free field soldering technology. What awaits us?]. *Elektronnyye komponenty*. 2004;11. (In Russ.)
4. Gain A.K., Zhang L., Quadir M.Z. Thermal aging effects on micro-structures and mechanical properties of an environmentally friendly eutectic tin-copper solder alloy. *Mater. Des*. 2016;110:275–283. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.007
5. Gain, A.K.; Zhang, L. Microstructure, thermal analysis and damping properties of Ag and Ni nano-particles doped Sn–8Zn–3Bi solder on OSP–Cu substrate. *J. Alloys Compd*. 2014;617:779–786. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.08.076
6. Gain A.K., Zhang L. Growth mechanism of intermetallic compound and mechanical properties of nickel (Ni) nanoparticle doped low melting temperature tin–bismuth (Sn–Bi) solder. *J. Mater. Sci. Mater. Electron*. 2016;27:781–794. DOI: 10.1007/s10854-015-3817-2
7. D'yakov V.E. *Proizvodstvo indiya iz olovyannogo syr'ya ekstraktsiyey iz rasplavov: monogr.* [Production of indium from tin raw materials by extraction from melts]. Moscow: Akademiya Estestvoznaniya Publ., 2020. 144 p. (In Russ.) ISBN 978-5-91327-609-4. EDN ABQBGJ. DOI: 10.17513/np.384
8. Faizov S., Sarafanov A., Erdakov I. et al. On the direct extrusion of solder wire from 52In–48Sn alloy. *Machines*. 2021;9(5):93. DOI: 10.3390/machines9050093
9. Ma X. *Surface quality of aluminium extrusion products*. Enschede, The Netherlands: University of Twente; 2011. 223 p.
10. Faizov S.R., Radionova L.V. [Modeling and strength analysis in the design of tooling for direct pressing of low-melting solder]. In: *Prom-Inzhiniring: trudy VII vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Moskva, Chelyabinsk, Novochoerkassk, Volgograd, Sochi, 17–21 maya 2021 goda* [Prom-Engineering: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, Chelyabinsk, Novochoerkassk, Volgograd, Sochi, May 17–21, 2021]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2021. P. 180–185. (In Russ.) EDN IWGN DU.
11. Radionova L.V., Faizov S.R., Gromov D.V., Erdakov I.N. Computer Modelling of Low-Melting-Point Materials Semicontinuous Direct Extrusion Temperature Conditions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2020;20(4):30–38. (In Russ.) DOI: 10.14529/met200404
12. Radionova L.V., Faizov S.R., Lezin V.D., Sarafanov A.E. Mathematical Modeling of Direct Extrusion Power Parameters of Low-melting Materials. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2020;20(2):71–79. (In Russ.) DOI: 10.145–29/met200207
13. Radionova L.V., Faizov S.R., Erdakov I.N., Bryk A.V. Optimization of the Wire Extrusion Process from 52In–48Sn Alloy by the Generalized Reduced Gradient Method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2021;21(1):54–65. (In Russ.) DOI: 10.14529/met210106
14. Stebunov S.A. 25 years of the program for simulation of forming processes QForm. *Forging and stamping production. Material working by pressure*. 2016;11:3–4.
15. Pustovoytov D.O., Pesin A.M. *Osnovy komp'yuternogo modelirovaniya protsessov OMD s primeneniym programmy QFORM 2D/3D* [Fundamentals of computer modeling of metal forming processes

using the QFORM 2D/3D program]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2021. 73 с. (In Russ.) ISBN 978-5-9967-2448-2. EDN BXYJFX.

16. Gromov D.V., Erdakov I.N., Radionova L.V., Svistun A.S. [Computer simulation in the QForm program of roll forming a profile from a round welded pipe]. In: *Prom-Inzhiniring: trudy VII vse-rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Moskva, Chelyabinsk, Novocherkassk, Volgograd, Sochi, 17–21 maya 2021 goda* [Prom-Engineering: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, Chelyabinsk, Novocherkassk, Volgograd, Sochi, May 17–21, 2021]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2021. P. 176–179. (In Russ.) EDN SIEOZJ.

17. Loginov Yu.N., Yershov A.A. Simulation of the formation of funnel at extrusion in software package QFORM. *Forging and stamping production. Material working by pressure*. 2013;7:42–46. EDN PJLSSQ.

18. Petrov M.A., Gnevashev D.A., Krutina E.V. [Numerical simulation of the sedimentation of bronze specimens taking into account changes in their relative density]. *Tekhnologiya metallov*. 2022;2:35–48. EDN PHZHVQ. DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-2-35-48

19. Kargin V.R., Kargin B.V. *Osnovy tekhnologicheskikh protsessov OMD: razdel pressovaniye: ucheb. posobiye* [Fundamentals of technological processes of metal forming: pressing section. Tutorial]. Samara: SSAU Publ., 2011. 103 p. ISBN 978-5-7883-0826-5.

Информация об авторах

Фаизов Сергей Радиевич, аспирант, преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, faizovsr@susu.ru.

Радионова Людмила Владимировна, канд. техн. наук, доц. кафедры металлургии, Московский политехнический университет, Москва, Россия; radionovalv@rambler.ru.

Information about the authors

Sergey R. Faizov, Postgraduate Student of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; faizovsr@susu.ru.

Lyudmila V. Radionova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Metallurgy, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; radionovalv@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 20.11.2022

The article was submitted 20.11.2022