

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ ПРЯМОМ ПРЕССОВАНИИ ЛЕГКОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, Д.В. Громов, И.Н. Ермаков*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

При холодном прямом прессовании легкоплавких материалов разогрев металла и оснастки, вызванный деформационными процессами и контактным трением, является причиной снижения качества готовой продукции и потерей стабильности процесса. АО «Челябинский цинковый завод» совместно с кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением» ЮУрГУ с 2019 года активно и успешно занимается разработкой и освоением технологии производства проволочного и пруткового припоя из сплава ПОИИ-52. В настоящей работе, используя специализированный инженерный пакет QForm, провели компьютерное моделирование температурных режимов процесса прессования проволочного припоя из сплава ПОИИ-52 диаметром 2,0 мм со скоростью прессования 0,5; 1,0 и 3,0 мм/с из заготовки диаметром 20 мм. По результатам компьютерного моделирования установлено, что скорость истечения металла из волоки, которая в свою очередь определяется скоростью прессования и коэффициентом вытяжки, оказывает существенное влияние на температурные условия процесса прессования. При изменении скорости прессования с 0,5 до 3 мм/с в процессе прессования проволоки Ø2,0 мм из заготовки Ø20 мм температура металла возрастает с 33,4 до 75,8 °С. Причем стоит отметить, что последовательное прессование четырех заготовок приводит к повышению температуры проволоки с 75,8 до 87 °С. Связано это с тем, что в процессе непрерывного прессования оснастка, а именно волока, разогревается и уже после четвертого цикла прессования ее средняя температура составляет около 45 °С. Средняя температура контейнера повышается при этом на 4 °С. После четвертого цикла дальнейшее повышение температуры как прессуемого металла, так и проволоки на исследуемом диаметре припоя прекращается и процесс стабилизируется.

*Ключевые слова:* прямое прессование проволоки, полунепрерывное прессование, компьютерное моделирование, деформационный разогрев, температура прессования.

Припой представляет собой материал, который используется для соединения металлов методом пайки. Он всегда имеет температуру плавления ниже, чем соединяемые детали [1]. С течением времени было создано большое количество припоев, которые отличаются по составу, соотношению материалов, наличию присадок [2]. В последние годы достаточно активно ведутся работы, посвященные способам и технологиям пайки с использованием бессвинцовых припоев [3–8]. Вызвано это тем, что в 2006 году Директива Европейского союза по экологической безопасности RoHS (Restriction of use of Certain Hazardous Substances) ограничила использование свинца в новом электрическом и электронном оборудовании на величине не более 0,01 % [9]. Эти ограничения установлены не от веса изделия, узла или компонента, а от каждого отдельного гомогенного материала. Среди бессвинцовых припоев в последнее время все большее распространение приобретает легкоплавкий при-

пой марки ПОИИ-52, состоящий из 51–53 % индия, остальное – олово.

АО «Челябинский цинковый завод» совместно с кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением» ЮУрГУ с 2019 года активно и успешно занимается разработкой и освоением технологии производства проволочного и пруткового припоя из сплава ПОИИ-52 [10]. За это время налажено мелкосерийное производство припоя диаметром 2,0 и 8,0 мм. В тоже время постоянное наличие заказов и увеличение объема производства, в том числе с необходимостью расширения сортамента, диктует необходимость совершенствования технологии и повышения производительности процесса.

В работе [11] была предложена математическая модель прямого прессования, позволяющая определять энергосиловые параметры процесса. Математическая модель показала высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований, однако не учитывает

температурный фактор и не позволяет рассчитывать температуру металла в контейнере и на выходе из него. Как показывает практика производства припоя, из-за высоких степеней деформации разогрев металла оказывается существенным. Температура плавления сплава ПОИн-52 составляет 121 °С. Прессование припоя в течение нескольких десятков минут приводит к разогреву оснастки и повышению температуры металла на выходе из матрицы до уровня потери стабильности процесса, проявляется это в появлении дефектов в виде пузырей и локальных мест оплавления металла. В связи с этим необходимо понимать, как распределяются температуры по сечению металла и изменением каких технологических параметров и до какого уровня можно управлять температурным режимом прессования.

Наиболее эффективно решать подобного рода задачи позволяют специализированные

инженерные пакеты, использующие перспективный вычислительный метод конечных элементов [12–15]. Однако стоит отметить, что решенных задач по определению температурного поля металла в процессе прямого прессования легкоплавких материалов в ходе литературного обзора не выявлено.

Целью настоящей работы является исследование температурных режимов прямого полунепрерывного прессования легкоплавких материалов путем компьютерного моделирования методом конечных элементов в пакете QForm.

Процесс прессования осуществляется на гидравлическом прессе Д2428 и подробно описан в работе [11]. Эскиз и фото оснастки, применяемой для получения проволоки и прутков, приведены на рис. 1. Для проведения компьютерного моделирования была создана 3D-модель оснастки (инструментов) и заготовки припоя (рис. 2).

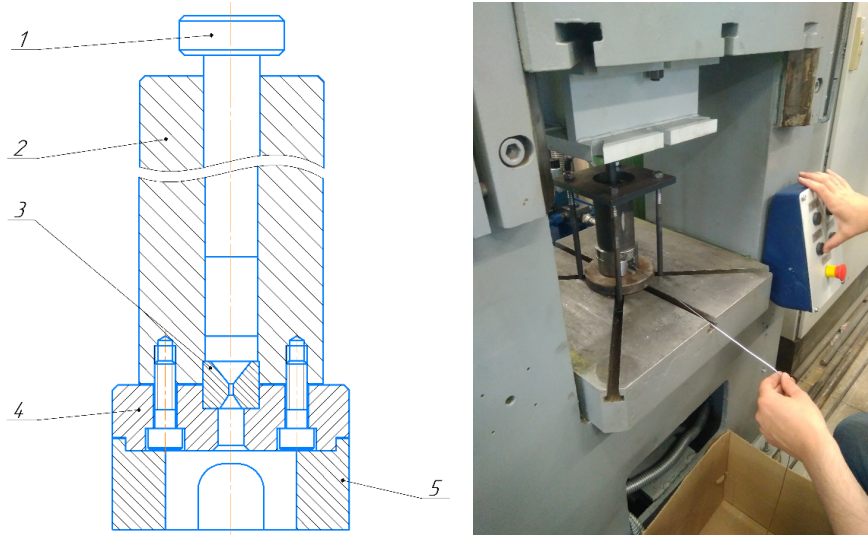


Рис. 1. Эскиз и фото оснастки:  
1 – пуансон; 2 – контейнер; 3 – монолитная волока; 4 – прижим; 5 – седло

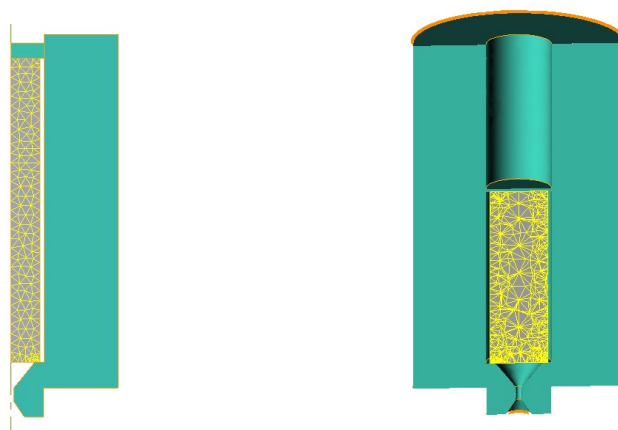


Рис. 2. Разрез и 3D-модель оснастки с заготовкой припоя

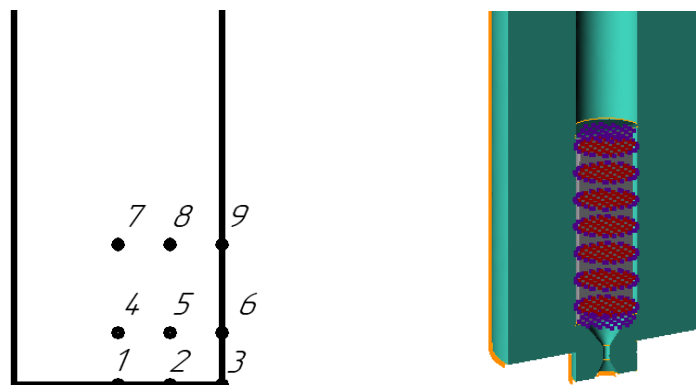


Рис. 3. Схема расположения точек измерения температуры в заготовке

Заданные параметры для инструментов следующие: диаметр волокна 2,0 мм; диаметр контейнера – 21,8 мм. Для припоя ПОИн-52 в библиотеку материалов QForm из справочника [16] были внесены данные. В базу материалов QForm были внесены следующие значения: сопротивление деформации  $\sigma_s = 10,5$  МПа, плотность  $\rho = 7300$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 86$  Вт/м·К, теплоемкость  $C = 230$  Дж/кг·К.

Контроль изменения температуры в заготовке проводился по 9 точкам (рис. 3): три точки в центре заготовки, три с краю и три между ними.

В ходе моделирования исследовались температурные изменения при прессовании проволоки  $\varnothing 2,0$  мм. В ходе прессования проволоки  $\varnothing 2,0$  мм из распрессованной заготовки  $\varnothing 21,8$  мм коэффициент вытяжки составляет  $\mu = 118,8$ . На рис. 4–6 предоставлены графики

измерения температур в исследуемых точках при скоростях прессования 0,5; 1,0 и 3,0 мм/с. При этом скорость истечения составила 59,4; 118,8 и 356,4 мм/с соответственно. Для проверки адекватности результатов, полученных в ходе компьютерного моделирования, был проведен эксперимент, в ходе которого была измерена температура металла на выходе из волокна с помощью портативного пирометра DT-9860 после прессования со скоростью 3 мм/с. Результаты замера температуры с помощью термопары показали, что проволока имеет температуру 57–60 °С. Средняя температура точек 1, 2, 4 и 5 на выходе из волокна при скорости прессования 3 мм/с составляет 55 °С (см. рис. 6). Однако стоит отметить, что расчетные значения приводятся при прессовании в оснастке комнатной температуры и первых секундах процесса, а экспериментальные данные получены на устано-

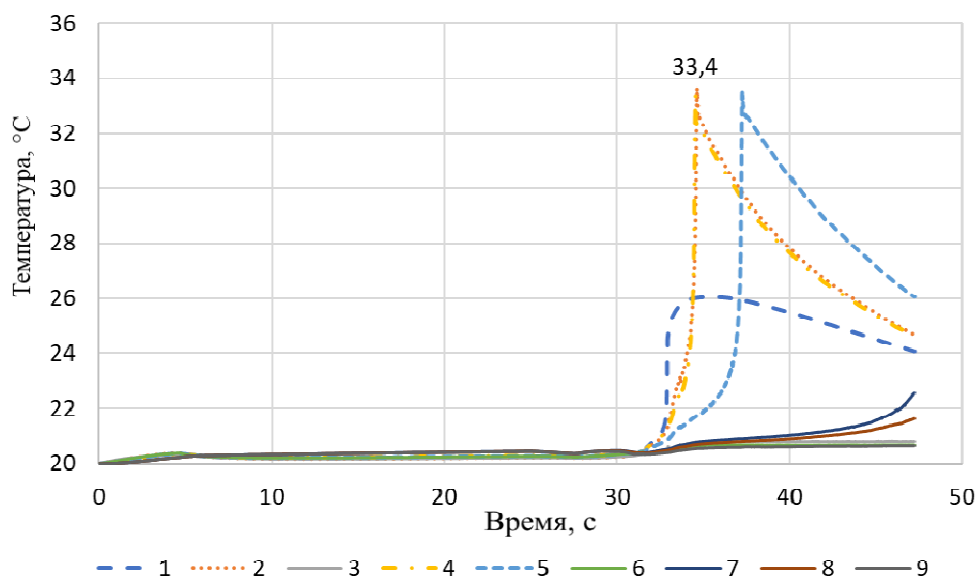


Рис. 4. Результаты моделирования процесса прессования проволоки  $\varnothing 2,0$  мм со скоростью 0,5 мм/с (цифрами обозначены точки контроля температуры в заготовке)

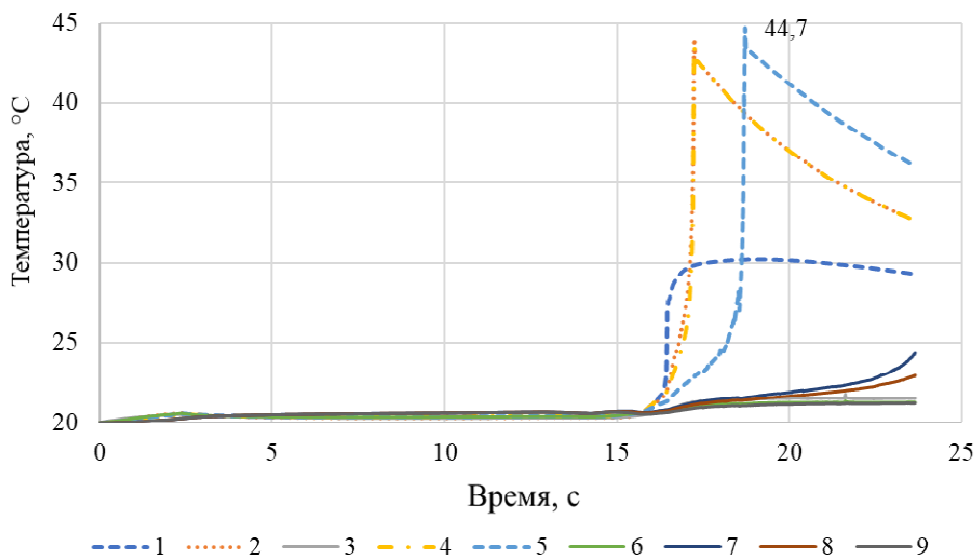


Рис. 5. Результаты моделирования процесса прессования проволоки Ø2,0 мм со скоростью 1 мм/с (цифрами обозначены точки контроля температуры в заготовке)

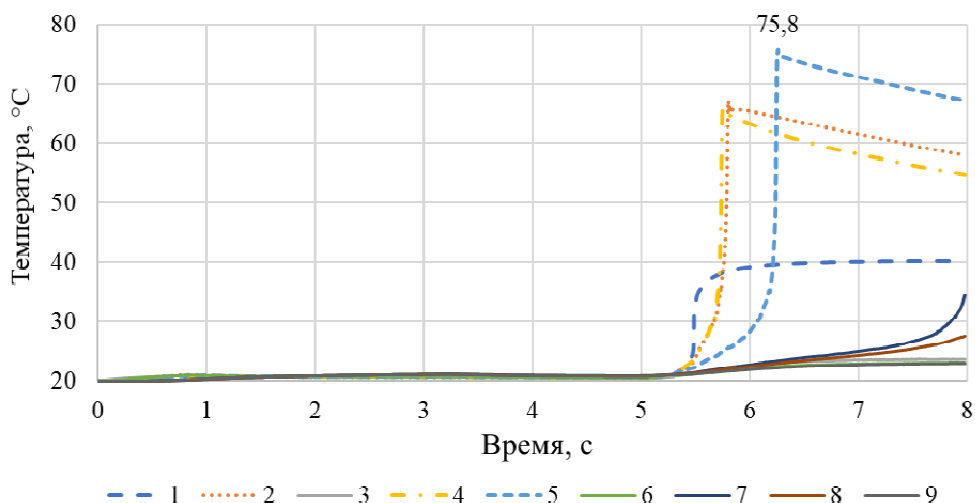


Рис. 6. Результаты моделирования процесса прессования проволоки Ø2,0 мм со скоростью 3 мм/с (цифрами обозначены точки контроля температуры в заготовке)

вившемся процессе, т. е. после нескольких минут прессования. В то же время ошибка между расчетными и экспериментальными данными не превышает 7 %.

Как видно на графиков (см. рис. 4–6), скорость прессования металла значительно влияет на температуру металла в волоке. Максимальная температура разогрева металла соответствует точкам 2, 4 и 5. Причем в точке 5 температура при увеличении скорости прессования с 0,5 до 3,0 мм/с возрастает с 33,4 до 75,8 °С. Разогрев металла вызван деформационными процессами. Разогрев за счет трения металла о поверхность контейнера незначителен и не превышает 2...3 °С и характеризуется величиной температуры в точках 6 и 9.

Анализируя полученные графики, можно оценить не только температуры металла в разных точках заготовки, но и каким образом происходит истечение металла через волоку. Точки, проходящие через волоку, оказывались в очаге деформации в следующем порядке: 1, 4, 2, 5. Точки 3, 6 и 9 задерживаются на краях контейнера, попадая в «мертвую зону», а их температура повышается благодаря теплопередаче в заготовке. Рассматривая течение металла, можно сказать, что «мертвая зона» имеет небольшой размер благодаря конической форме волоки.

Компьютерное моделирование однократного процесса прессования показало, что температура металла в очаге деформации при

## Обработка металлов давлением...

высоких скоростях истечения повышается весьма существенно, а при мелкосерийном производстве непрерывно прессуется не менее 30...50 заготовок. Логично предполагать, что в процессе непрерывного прессования разогрев металла будет приводить к разогреву оснастки, накоплению тепла и дальнейшему повышению температуры металла в очаге деформации. Для изучения влияния этого фактора на температуру волоки было проведено осесимметричное моделирование прессова-

ния проволоки  $\varnothing 2,0$  мм со скоростью 3 мм/с, с учетом теплообмена инструмента с окружающей средой и заготовкой. Результаты расчета температуры в объеме волоки представлены на рис. 7.

На рис. 7 высокие температуры соответствуют температуре канала волоки, а низкие – температуре наружной поверхности волоки.

Рассмотрим ситуацию, когда при полунепрерывном прессовании температура волоки и контейнера повышается вследствие разогре-

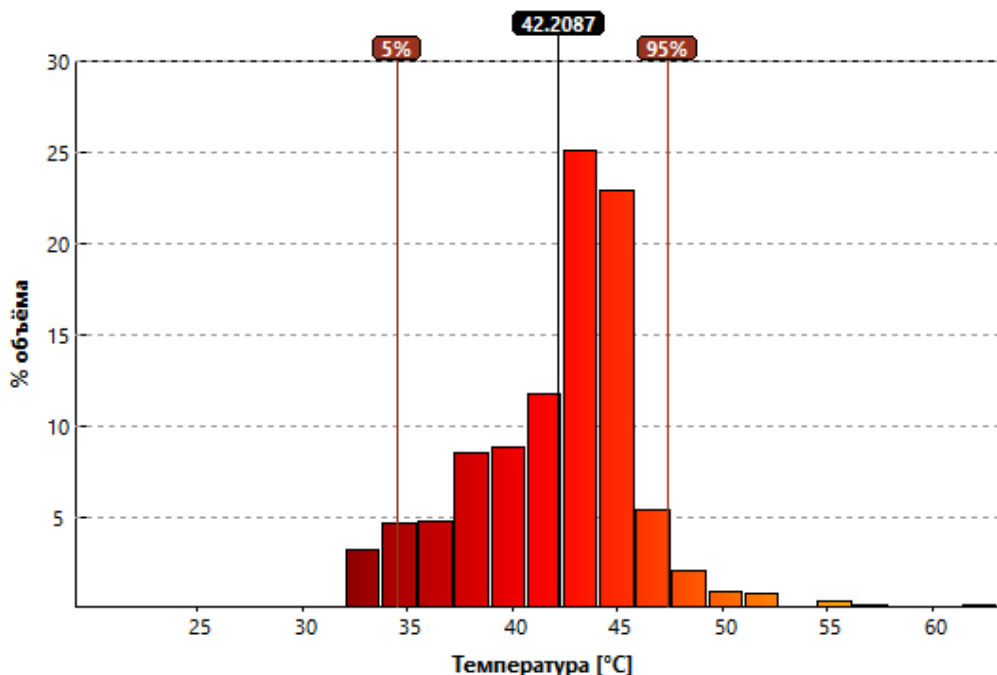


Рис. 7. Распределение температур в объеме волоки при прессовании проволоки  $\varnothing 2,0$  мм со скоростью 3 мм/с

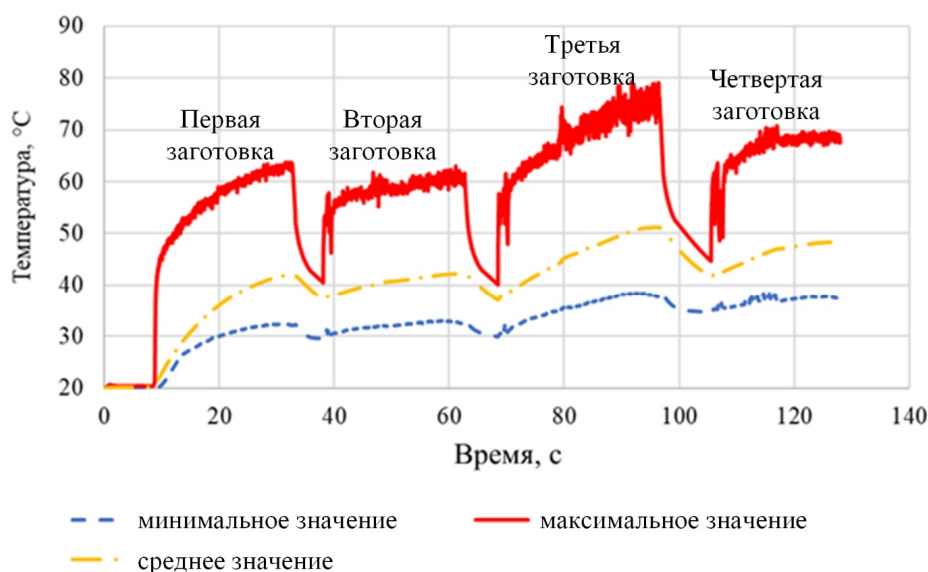


Рис. 8. Изменение температуры волоки во время прессования проволоки  $\varnothing 2,0$  мм со скоростью 3 мм/с

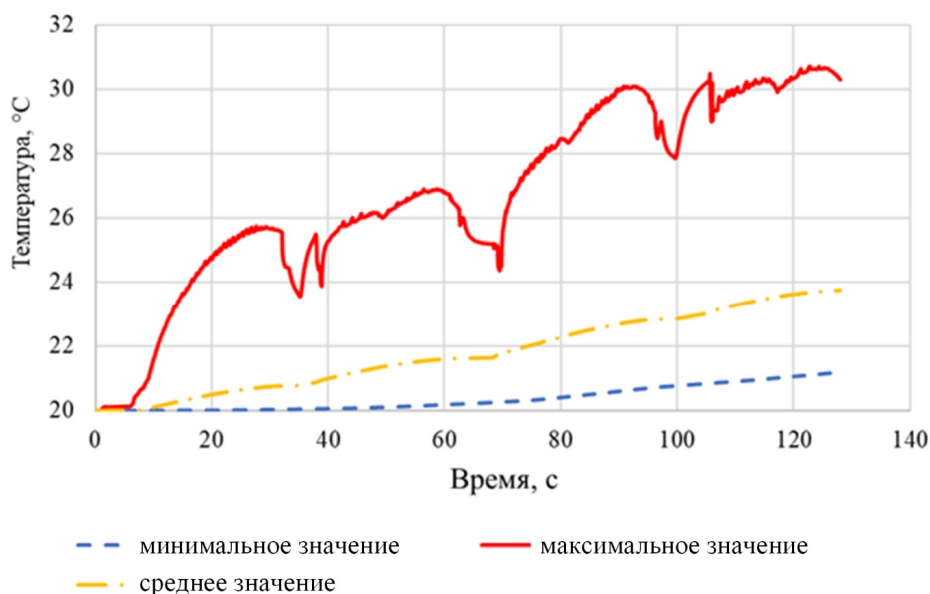


Рис. 9. Изменение температуры контейнера во время прессования проволоки  $\varnothing 2,0$  мм со скоростью 3 мм/с

Температуры инструмента и проволоки из сплава ПОИн-52  $\varnothing 2,0$  мм после моделирования четырех проходов

Диаметр заготовки, мм	Диаметр волоки, мм	Скорость прессования, мм/с	Максимальная температура металла в процессе прессования, °C	Средняя/максимальная температура волоки, °C	Средняя/максимальная температура контейнера, °C
20 мм	2 мм	3 мм/с	87 °C	~ 46/80 °C	~ 24/35 °C

ва от деформируемого металла. Полунепрерывное прессование в разогретом инструменте должно привести к еще более существенному повышению температуры металла в очаге деформации. График изменения температуры волоки по результатам компьютерного моделирования в ходе последовательного четырехкратного прессования заготовки в проволоку  $\varnothing 2$  мм со скоростью 3 мм/с приведены на рис. 8.

Из графика видно, что в процессе прессования волока разогревается в месте контакта до температуры 60...80 °C. При этом по результатам моделирования многократного прессования можно говорить о среднем значении температуры волоки на уровне 50 °C. Температура контейнера в процессе непрерывного прессования также постепенно возрастает (рис. 9).

Максимальная температура контейнера за время прессования четырех заготовок поднимается на 10 °C, среднее значение температуры контейнера повышается на 4 °C.

Температуры инструмента и проволоки из

сплава ПОИн-52 диаметром 2,0 мм после моделирования четырех проходов представлены в таблице.

**Заключение**

По результатам компьютерного моделирования установлено, что скорость истечения металла из волоки, которая в свою очередь определяется скоростью прессования и коэффициентом вытяжки оказывает существенное влияние на температурные условия процесса прессования. При изменении скорости прессования с 0,5 до 3 мм/с в процессе выдавливания проволоки  $\varnothing 2,0$  мм из заготовки  $\varnothing 20$  мм максимальная температура металла возрастает с 33,4 до 75,8 °C. Причем стоит отметить, что последовательное прессование четырех заготовок приводит к повышению максимальной температуры проволоки с 75,8 до 87 °C. Связано это с тем, что в процессе непрерывного прессования оснастка, а именно волока, разогревается и уже после четвертого цикла прессования ее средняя температура составляет около 45 °C. Средняя температура



контейнера повышается при этом на 4 °С. После четвертого цикла дальнейшее повышение температуры как прессуемого металла, так и проволоки на исследуемом диаметре припоя прекращается и процесс стабилизируется.

Однако в перспективе стоит рассмотреть вопрос влияния на температурные условия процесса прессования изменения геометрических параметров оснастки, коэффициента вытяжки, а также диаметра готовой проволоки и прутка.

### Литература

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учеб. для вузов / под общ. ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.
2. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: учеб. для студентов вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высшая школа, 2006. – 799 с.
3. Медведев, А.М. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? / А.М. Медведев // Электронные компоненты. – 2004. – № 11.
4. Медведев, А.М. Электронные компоненты и монтажные площадки / А.М. Медведев // Компоненты и технологии. – 2006. – № 12.
5. Григорьев, В. Бессвинцовые технологии – требование времени или прихоть законодателей от экологии? / В. Григорьев // Электронные компоненты. – 2001. – № 6.
6. Бессвинцовые припои в технологии производства изделий микроэлектроники / В.В. Зенин, В.Н. Беляев, Ю.Е. Сегал, А.А. Колбенков // Микроэлектроника. – 2003. – Т. 32, № 4.
7. Пайка без свинца. Bleifrei loten: Silber und Kupfer statt Blei. Krempelsauer // Elektor (BRD). – 2000. – № 5.
8. Шапиро, Л. Использование бессвинцовых технологий не избежать / Л. Шапиро // Вестник электроники. – 2007. – № 2.
9. Шапиро Л. Внедрение европейской директивы RoHS / Л. Шапиро // Электронные компоненты. – 2006. – № 1.
10. Глебов, Л.А. Припой ПОИн-52: исследование процесса и разработка технологии мелкосерийного производства проволоки / Л.А. Глебов, Л.В. Радионова, С.С. Фаизов // Magnitogorsk Rolling Practice 2019: материалы IV молодежной научно-практической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – С. 54–56.
11. Математическое моделирование энергосиловых параметров прямого прессования легкоплавких материалов / Л.В. Радионова, С.П. Фаизов, В.Д. Лезин, А.Е. Сарафанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 71–79. DOI: 10.14529/met200207
12. Аль-Кхузай, А.С.О. Определение диапазона изменения параметров напряженно-деформированного состояния металла при непрерывной прокатке труб / А.С.О. Аль-Кхузай, В.В. Широков, А.В. Выдрин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 74–79. DOI: 10.14529/met190109
13. Моделирование операций обработки давлением при производстве штампованных деталей трубопровода / К.С. Торгонин, В.В. Широков, Б.А. Чаплыгин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 109–120. DOI: 10.14529/met180412
14. Харитонов, В.А. Расчет параметров преформации на основе моделирования в программном комплексе DEFORM 3D / В.А. Харитонов, Э.Р. Ямтеева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 56 (10). – С. 47–48. DOI: 10.17073/0368-0797-2013-10-47-48
15. Стругов, С.С. Сравнение методов оценки напряженно-деформированного состояния при осадке цилиндрической заготовки / С.С. Стругов, В.А. Иванов, В.Г. Шеркунов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 140–146. DOI: 10.14529/met160416
16. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ.: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 3, кн. 1. – 872 с.

**Радионова Людмила Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; radionovalv@susu.ru; ORCID ID: 0000-0001-9587-2925.

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

**Громов Дмитрий Владимирович**, студент 1-го курса магистратуры на кафедре процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gromov111999@gmail.com.

**Ермаков Иван Николаевич**, канд. техн. наук, доцент, заместитель декана факультета «Материаловедение и металлургические технологии», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; erdakovin@susu.ru.

Поступила в редакцию 13 августа 2020 г.

DOI: 10.14529/met200404

## COMPUTER MODELLING OF LOW-MELTING-POINT MATERIALS SEMICONTINUOUS DIRECT EXTRUSION TEMPERATURE CONDITIONS

L.V. Radionova, radionovalv@susu.ru,  
S.R. Faizov, faizovsr@susu.ru,  
D.V. Gromov, gromov111999@gmail.com,  
I.N. Erdakov, erdakovin@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The heating of metal and tooling caused by deformation processes and contact friction is the reason for a decrease in the finished product quality and a loss of process stability during cold direct extrusion of low-melting-point materials. PJSC Chelyabinsk Zinc Plant together with the Department of Metal Forming Processes and Machines of SUSU has been actively and successfully developing and mastering the technology for the production of wire and rod solder from POIn-52 alloy. A computer simulation of the extrusion process temperature conditions of the POIn-52 alloy wire with a diameter of 2.0 mm at an extrusion speed of 0.5; 1.0 and 3.0 mm/s from a workpiece with a diameter of 20 mm was carried out in this work, using a specialized engineering package QForm. Based on the results of computer simulation, it has been established that the speed of metal outflow from the die, which in turn is determined by the extrusion speed and the extrusion ratio, has a significant effect on the pressing process temperature conditions. The metal temperature increases from 33.4 to 75.8 °C, when the extrusion speed changes from 0.5 to 3 mm/s in the extrusion process of wire Ø2.0 mm from a billet 20 mm. Moreover, it should be noted that sequential extrusion of four blanks leads to an increase in the wire temperature from 75.8 to 87 °C. This is due to the fact that in the process of continuous extrusion the tooling, namely the drawing die, heats up and after the fourth extrusion cycles its average temperature is about 45 °C. The average container temperature rises by 4 °C. A further increase in the temperature of both the metal being extruded and the wire on the investigated diameter of the solder stops and the process stabilizes after the fourth cycle.

*Keywords: direct wire extrusion, semicontinuous extrusion, computer modeling, deformation heating, extrusion temperature.*

### References

1. Shakhnova V.A. (Ed.) *Konstruktorско-tekhnologicheskoye proyektirovaniye elektronnoy apparatury: ucheb. dlya vuzov* [Design and technological design of electronic equipment]. Moscow, Publishing house of Bauman MSTU, 2005. 568 p.



2. Gusev V.G., Gusev Yu.M. *Elektronika i mikroprotsessornaya tekhnika: ucheb. dlya studentov vuzov* [Electronics and microprocessor technology. A textbook for university students]. Moscow, Higher school Publ., 2006. 799 p.
3. Medvedev A.M. [Lead-free assembly soldering technologies. What awaits us?]. *Electronic components*, 2004, no. 11. (in Russ.)
4. Medvedev A.M. [Electronic components and mounting platforms]. *Components and Technologies*, 2006, no. 12. (in Russ.)
5. Grigoriev V. [Lead-free technologies – a requirement of the time or a whim of legislators from the environment?]. *Electronic Components*, 2001, no. 6. (in Russ.)
6. Zenin V.V., Belyaev V.N., Segal E.Yu., Kolbenkov A.A. [Lead-free solders in the production technology of microelectronic products]. *Microelectronics*, 2003, vol. 32, no. 4. (in Russ.)
7. Bleifrei loten: Silber und Kupfer statt Blei. Krempelsauer. *Elektor (BRD)*, 2000, no. 5.
8. Shapiro L. [The use of lead-free technologies cannot be avoided]. *Bulletin of Electronics*, 2007, no. 2. (in Russ.)
9. Shapiro L. [Implementation of the European RoHS Directive]. *Electronic Components*, 2006, no. 1. (in Russ.)
10. Glebov L.A., Radionova L.V., Faizov S.S. [Solder POIN-52: process research and development of technology for small-scale wire production]. *Magnitogorsk Rolling Practice 2019: materials of the IV youth scientific-practical conference. Ed. A.G. Korchunov*. Magnitogorsk, Publishing house of Nosov MSTU, 2019, pp. 54–56. (in Russ.)
11. 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, vol. 20, no. 2, pp. 71–79. (in Russ.) DOI: 10.145–29/met200207
12. Al-Khuzai A.S.O., Shirokov V.V., Vydrin A.V. Determination of the Range of Variation of the Parameters of the Stress-Strain State of the Metal during Continuous Pipe Rolling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 74–79. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190109
13. Torgonin K.S., Shirokov V.V., Chaplygin B.A., Chernobrovin V.P., Plastinin B.G., Kozlov A.V., Dukmasov V.G. Modeling of Pressure Shaping during Manufacturing of Stamp-Welded Pipe Joints. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 109–120. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180412
14. Kharitonov V.A., Yamteeva E.R. [Calculation of preformation parameters based on modeling in the DEFORM 3D software package]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2013, no. 56 (10), pp. 47–48. (in Russ.) DOI: 10.17073/0368-0797-2013-10-47-48
15. Strugov S.S., Ivanov V.A., Sherkunov V.G. Comparison of Methods of Stress-Strain State Estimation in the Upset of a Cylindrical Workpiece. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 140–146. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160416
16. Lyakishev N.P. (Ed.) *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: sprav.* [Diagrams of state of double metal systems]. Vol. 3, book. 1. Moscow. Mechanical Engineering Publ., 2001. 872 p.

**Received 13 August 2020**

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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

### FOR CITATION

Radionova L.V., Faizov S.R., Gromov D.V., Erda-  
kov I.N. Computer Modelling of Low-Melting-Point  
Materials Semicontinuous Direct Extrusion Temperature  
Conditions. *Bulletin of the South Ural State University.  
Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 30–38. (in Russ.)  
DOI: 10.14529/met200404