

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением

УДК 621.77

DOI: 10.14529/met200207

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЯМОГО ПРЕССОВАНИЯ ЛЕГКОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ

Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, В.Д. Лезин, А.Е. Сарафанов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

При прессовании легкоплавких материалов крайне важным является определение технологических параметров процесса. В настоящей работе разработана математическая модель прямого прессования проволоки и прутков из легкоплавких материалов, позволяющая определить энергосиловые параметры процесса. Проверку адекватности математической модели осуществляли в ходе лабораторного эксперимента на гидравлическом прессе. В лабораторных условиях измерялись и фиксировались усилие и скорость прессования с помощью установленной на нем системы сбора данных. Проверка адекватности проводилась при прессовании прутков $\varnothing 8,00$ и 15 мм и проволоки $\varnothing 2,00$ мм и показала высокую сходимость расчетов с экспериментальными замерами. Ошибка не превышала 10 %. Полученная математическая модель была использована для аналитических исследований технологических режимов прямого прессования прутков и проволоки из сплава ПОИн-52. Расчеты показали, что уменьшение диаметра готового прутка (проволоки) с $16,00$ до $2,00$ мм при сохранении размера заготовки $\varnothing 30,00$ мм приводит к увеличению усилия прессования с 86 кН до 131 кН в начальный момент прессования, так как существенно с 4 до 256 возрастает коэффициент вытяжки. Усилие при прессовании прутка $\varnothing 8,00$ мм с увеличением диаметра заготовки с $12,0$ до $40,0$ мм возрастает с 25 до 171 кН. Проведение аналитических исследований на модели показало, что возможно не только изучать процесс прессования с целью понимания механизмов формирования механических и эксплуатационных свойств готового прутка (проволоки), но и проектировать ресурсосберегающие режимы прессования для различного сортамента продукции, осуществлять обоснованный выбор требуемого оборудования и оснастки.

Ключевые слова: прессование проволоки, математическое моделирование, усилие прессование, припой, гидравлический пресс.

В последние годы достаточно активно ведутся работы, посвященные способам и технологиям пайки с использованием бессвинцовых припоев [1–6]. Вызвано это тем, что в 2006 г. 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 %. Эти ограничения установлены не от веса изделия, узла или компонента, а от каждого отдельного гомогенного материала [7].

Для решения этой проблемы за последние годы создан целый ряд бессвинцовых припоев систем Sn–Cu, Sn–Ag, Sn–Ag–Cu. Бессвинцовые технологии отличаются значительным

повышением температур пайки с 230 °С для ПОС-61 (температура плавления 183 °С) до $265...270$ °С для самого легкоплавкого, общепризнанного бессвинцового припоя Sn3Ag0,7–Cu (температура плавления 217 °С). Такая температурная нагрузка требует не только смены припоев, но и смены флюсов, базовых материалов печатных плат, обновления технологического оборудования, пересмотра удельных энергозатрат. Это приводит к необходимости инвестиций возобновления производства, использованию более дорогих термостойчивых материалов, перестройке технологий. Однако в последние годы были разработаны и нашли свое применение и припои с низкой температурой плавления. Это сплавы систем Sn–In, Sn–Bi.

Легкоплавкий припой ПОИп-52, состоящий из 51–53 % индия и олова – оставшиеся проценты, является одним из наиболее часто используемых по состоянию на 2016 г. (после введения ограничений на использование кадмия и свинца) в полупроводниковой технике.

Кафедра «Процессы и машины обработки металлов давлением» ЮУрГУс 2019 г. занимается разработкой и освоением технологии производства проволочного и пруткового припоя из сплава ПОИп-52 в условиях мелкосерийного производства [8, 9].

Целью настоящей работы является разработка математической модели прямого прессования припоя из легкоплавких материалов, позволяющей определять энергосиловые режимы прессования проволоки и прутков различного диаметра.

Математическое описание энергосилового режима прессования

На рис. 1 приведена схема очага деформации при прессовании. Энергия для прессования подводится к пресс-штемплю усилием F при этом полная работа процесса A является суммой работы пластической деформации $A_{\text{деф}}$ и работы сил трения $A_{\text{тр}}$:

$$A = A_{\text{деф}} + A_{\text{тр}}. \quad (1)$$

В известных работах [10, 11] энергозатраты на процесс прессования (при пренебрежении силами трения скольжения на контактной поверхности пресс-штемполя и контейнера) предлагается оценивать в виде суммы сил

$$F = F_{\text{деф}} + F_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{деф}}$ – усилие, осуществляющее формоизменение (пластическую деформацию); $F_{\text{тр}}$ – усилия, преодолевающие силы трения скольжения на контактной поверхности обрабатываемого металла с контейнером и с матрицей.

Вывод выражения для определения необходимого пластической деформации усилия может основываться на зависимости Финка для определения работы формоизменения металла, затрачиваемой на осуществление пластических деформаций, определяемых начальными и конечными размерами обрабатываемого металла (без учета особенностей условий пластической деформации):

$$A_{\text{ф}} = \theta \cdot \sigma_{\text{ср}} \cdot \ln \mu, \quad (3)$$

где θ – объем обработанного металла; μ – величина вытяжки

$$\mu = \frac{D_{\text{вх}}^2}{D_{\text{вых}}^2}; \quad (4)$$

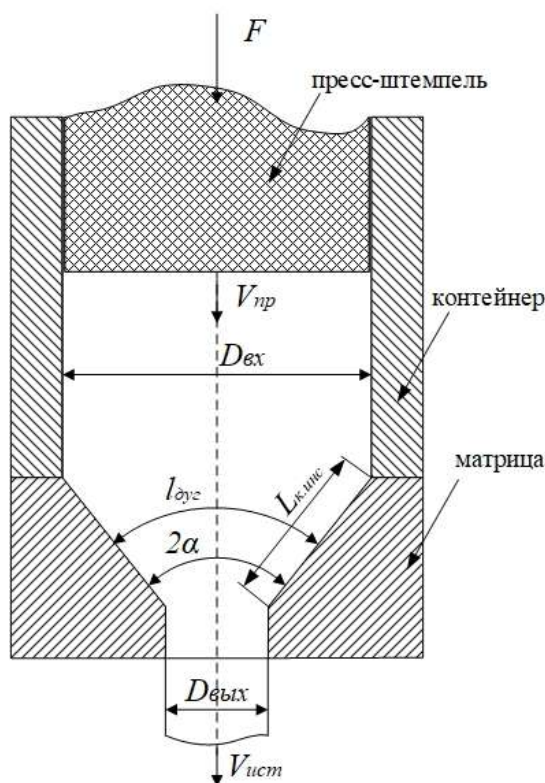


Рис. 1. Схема очага деформации при прессовании

$D_{вх} = D_{кон}$ – диаметр заготовки на входе в матрицу равный диаметру контейнера; $D_{вых}$ – диаметр проволоки (прутка) на выходе из матрицы; $\sigma_{ср}$ – среднее значение сопротивления деформации обрабатываемого металла, которое при допущении, что удельное сопротивление деформации металла заготовки равно среднему значению предела текучести, может быть определено как

$$\sigma_{ср} = \sqrt{\sigma \cdot \sigma_{вых}}; \quad (5)$$

σ – предел текучести материала заготовки; $\sigma_{вых}$ – предел текучести металла на выходе из матрицы.

Отличительной особенностью рассматриваемого процесса прессования является значение параметра формы очага деформации $\Delta_B = l_{дуг}/L_{мат} \ll 1$, где $l_{дуг}$ – длина дуги, перпендикулярной контактной линии инструмента посередине зоны деформации; $L_{к.инс}$ – длина контактной линии инструмента (см. рис. 1).

Величина Δ_B вычисляется по формуле [12]:

$$\Delta_B = \frac{\alpha}{\frac{\mu-1}{\mu} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\mu-1}{\mu}}\right)^2}, \quad (6)$$

где α – полуугол матрицы (волоки).

Параметр формы $\Delta_B \ll 1$, аналогично тому как это принято в листовой прокатке [13, 14], приводит к повышению энергосиловых условий, что следует учитывать при расчете работы, а именно:

$$A_{деф} = \frac{1}{\Delta_B} \cdot A_{ф} = \frac{1}{\Delta_B} \cdot \theta \cdot \sigma_{ср} \cdot l_{нм}; \quad (7)$$

С учетом того, что мощность деформации с одной стороны равна

$$N_{деф} = F_{деф} \cdot V_{пр}; \quad (8)$$

где $V_{пр}$ – скорость прессования (скорость перемещения пресс-штемпеля) с другой стороны может быть найдена как

$$N_{деф} = \frac{dA_{деф}}{dt} = \frac{1}{\Delta_B} \cdot \sigma_{ср} \cdot l_{нм} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\Delta_B} \cdot \sigma_{ср} \cdot l_{нм} \cdot S_{вх} \cdot V_{пр}, \quad (9)$$

то при условии, что площадь круглой заготовки

$$S_{вх} = \frac{\pi \cdot D_{вх}^2}{4}, \quad (10)$$

выражение для расчета силы деформации запишется в виде:

$$F_{деф} = \frac{\pi \cdot D_{вх}^2}{4} \cdot \frac{1}{\Delta_B} \cdot \sigma_{ср} \cdot l_{нм}. \quad (11)$$

Сила трения $F_{тр}$ определяется особенностью геометрии очага деформации (см. рис. 1) и состоит из трех частей – усилия, направленного

на преодоление трения скольжения обрабатываемого металла о контейнер $F_{трI}$, о поверхность матрицы $F_{трII}$, и о калибрующий поясок матрицы $F_{трIII}$

$$F_{тр} = F_{трI} + F_{трII} + F_{трIII}. \quad (12)$$

При условии рассмотрения формирования сил трения по закону Зибеля

$$\tau = f \cdot \sigma. \quad (13)$$

составляющие сил трения могут быть найдены:

$$F_{трI} = S_{б} \cdot \tau = \pi \cdot D_{кон} \cdot L_{рас} \cdot f \cdot \sigma; \quad (14)$$

$$F_{трII} = S_{м} \cdot \tau = \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \times (D_{кон}^2 - D_{вых}^2) \cdot f \cdot \sigma_{\tau}; \quad (15)$$

$$F_{трIII} = S_{к} \cdot \tau = \pi \cdot D_{вых} \cdot L_{кп} \cdot f \cdot \sigma_{вых}, \quad (16)$$

где f – коэффициент трения; $S_{б}$, $S_{м}$, $S_{к}$ – площадь боковой поверхности втулки контейнера, матрицы и ее калибрующего пояска; $D_{кон}$ – диаметр контейнера; σ_{τ} – сопротивление пластического сдвига

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{ср}}{2} = \frac{\sqrt{\sigma \cdot \sigma_{вых}}}{2}, \quad (17)$$

$L_{рас}$ – длина распрессованной заготовки; $L_{кп}$ – длина калибрующего пояска матрицы.

Математическая модель прямого прессования реализована в математической таблице Excel. Пример расчета энергосиловых условий прессования прутков $\varnothing 2,00$; 8,00 и 15,00 мм из сплава ПОИн-52 приведен в табл. 1.

Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности математической модели был проведен эксперимент в условиях лаборатории кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением» на гидравлическом прессе модели Д2428, оснащенной системой сбора и хранения данных (рис. 2). После модернизации, которая включала в себя замену маслостанции (8) и оснащения ее датчиками давления, а штока (2) датчиками перемещения, пресс позволяет определять скорость и усилие прессования. Пресс может работать как с включенной системой сбора данных (10), выводя на монитор (9) график прессования (рис. 3) и записывая результаты измерений в базу данных, так и без нее. При выключенной системе сбора данных, управление прессом осуществляется с пульта управления (5), а изменение давления можно наблюдать на манометре (6).

В ходе эксперимента из литых заготовок получали проволоку (прутки) в соответствии с условиями, представленными в табл. 2.

Результаты расчета на математической модели

Параметр	Размерность	Величина		
		эксп. 1	эксп. 2	эксп. 3
Исходные данные				
Диаметр заготовки (прутка), $D_{вх}$	мм	30	30	20
Диаметр готовой проволоки, $D_{вых}$	мм	15	8	2
Длина заготовки, L	мм	120	120	120
Диаметр контейнера, $D_{кон}$	мм	31	32	21,8
Скорость прессования, $V_{пр}$	мм/с	12	3,5	0,5
Сопротивление деформации заготовки, σ	МПа	10,5	10,5	10,5
Полуугол матрицы, α	град.	33,5	40	18,4
Длина калибрующего пояска, $L_{кл}$	мм	5	5	5
Коэффициент трения, f	–	0,5	0,5	0,5
Результаты расчета				
Коэффициент вытяжки, μ	–	4,3	16,0	118,8
Скорость истечения, $V_{ист}$	мм/с	51	56	59
Усилие в момент начала прессования, F_n	кН	92,8	106	105
Усилие в момент завершения прессования, F_k	кН	41,0	55,6	71,9

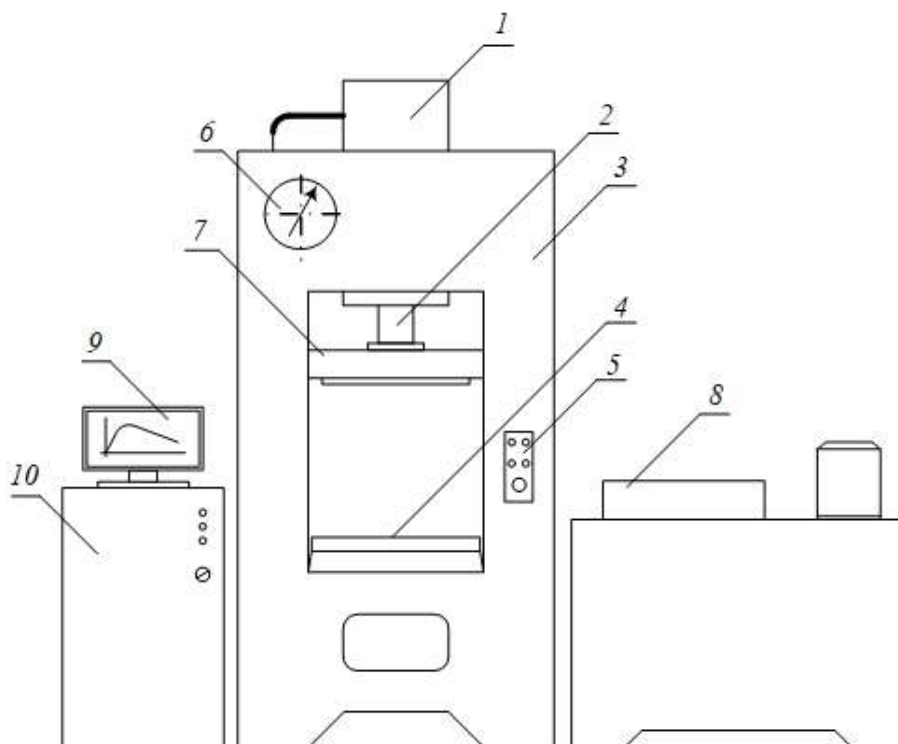


Рис. 2. Схема лабораторного гидравлического пресса: 1 – главный цилиндр; 2 – шток; 3 – станина; 4 – рабочий стол; 5 – пульт управления; 6 – манометр; 7 – ползун; 8 – маслостанция; 9 – монитор; 10 – блок управления и сбора данных

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Параметр	Размерность	Величина		
		эксп. 1	эксп. 2	эксп. 3
Усилие в момент начала прессования, F_n	кН	85	116	100
Усилие в момент завершения прессования, F_k	кН	42	61,5	70

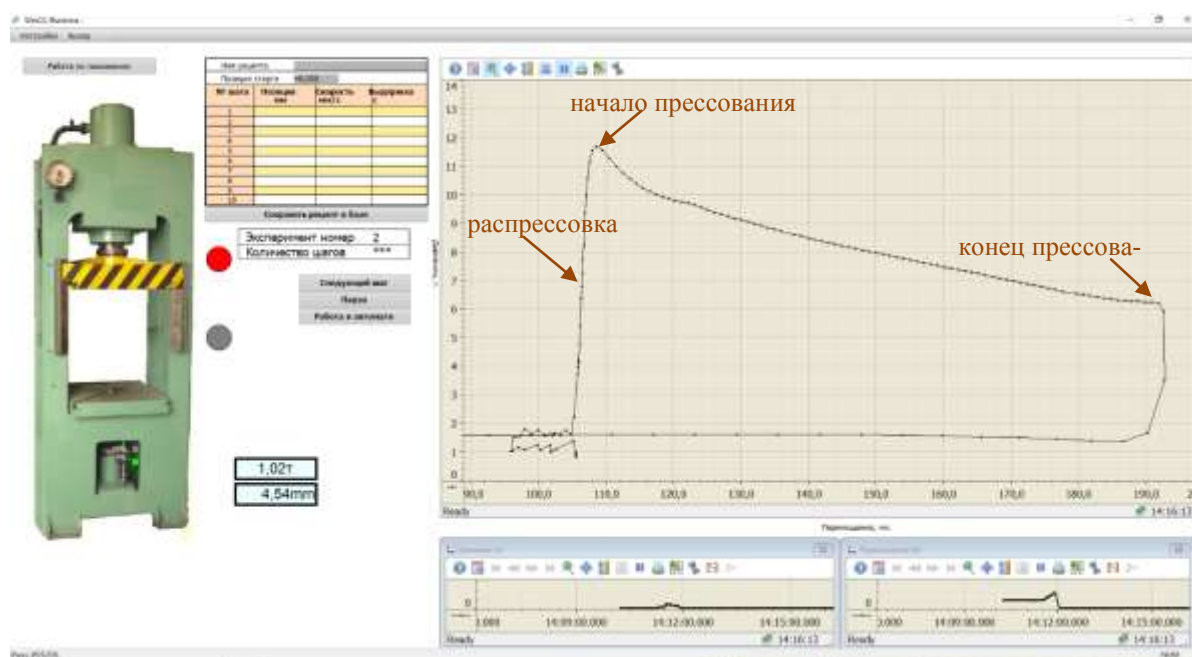


Рис. 3. Скрин экрана с результатами замера усилия прессования прутка Ø8,00 мм из сплава ПОИн-52

На рис. 3 приведены результаты замера усилия прессования заготовки Ø 30,00 мм из сплава ПОИн-52 в пруток Ø8,00 мм. Усилие прессования уменьшается по мере уменьшения длины заготовки в контейнере. Связано это с уменьшением площади контактной поверхности между заготовкой и контейнером и, как следствие, снижением потерь на преодоление сил трения.

Сходимость расчетных энергосиловых параметров (см. табл. 1) и экспериментальных результатов (см. табл. 2) достаточно высокая, ошибка не превышает 10 %, что позволяет сделать вывод об адекватности составленной математической модели и возможности ее

дальнейшего использования для проведения аналитических исследований процесса прямого прессования прутков и проволоки.

Аналитические исследования

Разработанная математическая модель может быть использована для оперативного расчета и выбора режимов прессования проволоки и прутков различного сортамента.

В качестве примера рассмотрим, как изменяются энергосиловые показатели при прессовании прутка различного диаметра из заготовки Ø30,00 мм со скоростью прессования $V_{пр} = 3,5$ мм/с. Результаты моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты математического моделирования энергосиловых параметров прессования прутка (проволоки) различного диаметра из заготовки Ø30,00 мм

Диаметр готовой продукции d, мм	Коэффициент вытяжки, μ	Скорость истечения $V_{ист}$, м/с	Усилие в момент начала прессования F_n , Н	Усилие в момент окончания прессования F_k , Н
16,00	4,0	0,14	86163	35801
14,00	5,22	0,18	91078	40717
12,00	7,11	0,25	95986	45625
10,00	10,24	0,36	100919	50557
8,00	16	0,56	106017	55655
6,00	28,44	1,00	111648	61287
4,00	64	2,24	118783	68422
2,00	256	8,96	130831	80469

Таблица 4

Результаты математического моделирования энергосиловых параметров прессования прутка (проволоки) Ø8,00 мм из заготовки разного диаметра

Диаметр заготовки D, мм	Коэффициент вытяжки, μ	Скорость истечения V ист, м/с	Усилие в момент начала прессования Fн, Н	Усилие в момент окончания прессования Fк, Н
40,00	27,6	0,97	171162	102725
36,00	22,6	0,79	143270	82067
32,00	18,1	0,63	117833	63859
28,00	14,1	0,49	94791	48040
24,00	10,6	0,37	74083	34544
20,00	7,6	0,27	55647	23307
16,00	5,1	0,18	39437	14269
12,00	3,1	0,11	25457	7418

Из табл. 3 следует, что уменьшение диаметра готового прутка (проволоки) с 16,00 до 2,00 мм при сохранении размера заготовки приводит к увеличению усилия прессования с 86 кН до 131 кН в начальный момент прессования, так как существенно (с 4 до 256) возрастает коэффициент вытяжки.

В свою очередь расчеты усилия прессования прутка Ø8,00 при изменении диаметра заготовки ($V_{пр} = 3,5$ мм/с) представлены в табл. 4.

Из результатов расчетов следует, что усилие прессования с увеличением диаметра заготовки с 12,0 до 40,0 мм возрастает, это вполне предсказуемо и без применения модели, но для того чтобы оценить количественное значение этого увеличения необходима математическая модель. Наличие адекватной математической модели позволяет не только обоснованно выбрать оборудование для производства в зависимости от планируемого сортамента, но и оптимизировать конструкцию оснастки для процесса прессования. Так мы видим, что для получения прутка Ø8,00 мм можно использовать даже 10-тонный пресс. Однако это возможно только при заготовке диаметром менее 28,00 мм.

Заключение

Разработана математическая модель прямого прессования легкоплавких материалов, которая позволяет определять энергосиловые параметры процесса. Проверка адекватности математической модели в условиях лаборатории кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением» ЮУрГУ на гидравличе-

ском прессе, оснащенном системой сбора и хранения данных, показала высокую сходимость. Ошибка как по усилию прессования, так и по температуре металла на выходе из матрицы не превышала 10 %, что вполне приемлемо для аналитических исследований процесса и выбора технологических режимов прессования.

Проведение аналитических исследований по модели показало, что можно не только изучать процесс прессования с целью понимания механизмов формирования механических и эксплуатационных свойств готового прутка (проволоки), но и подбирать ресурсосберегающие режимы прессования для различного сортамента продукции, осуществлять обоснованный выбор требуемого оборудования и оснастки.

Литература

1. Медведев, А.М. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? / А.М. Медведев // *Электронные компоненты*. – 2004. – № 11.
2. Медведев, А.М. Электронные компоненты и монтажные площадки / А.М. Медведев // *Компоненты и технологии*. – 2006. – № 12.
3. Григорьев, В. Бессвинцовые технологии – требование времени или прихоть законодателей от экологии? / В. Григорьев // *Электронные компоненты*. – 2001. – № 6.
4. Бессвинцовые припои в технологии производства изделий микроэлектроники / В.В. Зенин, В.Н. Беляев, Ю.Е. Сегал, А.А. Кол-

бенков // Микроэлектроника. – 2003. – Т. 32, № 4.

5. Пайка без свинца. Bleifreiloten: SilberundKupferstattBlei. Krempelsauer // Elektor (BRD). – 2000. – № 5.

6. Шапиро, Л. Использование бессвинцовых технологий не избежать / Л. Шапиро // Вестник электроники. – 2007. – № 2.

7. Шапиро, Л. Внедрение европейской директивы RoHS / Л. Шапиро // Электронные компоненты. – 2006. – № 1.

8. Глебов, Л.А. Припой ПОИИ-52: исследование процесса и разработка технологии мелкосерийного производства проволоки / Л.А. Глебов, Л.В. Радионова, С.С. Фаизов; под ред. А.Г. Корчунова // MagnitogorskRolling-Practice 2019: материалы IV молодежной научно-практической конференции. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – С. 54–56.

9. Радионова, Л.В. Развитие методологии проектирования технологий производства проволоки / Л.В. Радионова; под ред. С.А. Спирина, Т.Н. Думчевой // Труды XII Кон-

гресса прокатчиков: сборник статей. – М.: Грин Принт, 2019. – Т. 1. – С. 76–79.

10. Теория и технология прессования алюминиевых сплавов: учеб. пособие / В.Р. Каргин, А.Ф. Гречникова, Я.А. Ерисов, Ю.С. Старостин. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 80 с.

11. Логинов, Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов: учебное пособие / Ю.Н. Логинов. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 156 с. – ISBN 978-5-7996-1623-6. – <https://e.lanbook.com/book/99055>.

12. Бэкофен, В. Процессы деформации / В. Бэкофен; пер. с англ. В.С. Берковского, Ф.И. Рузанова; под ред. С.Е. Рокотяна. – М.: Металлургия, 1977. – 288 с.

13. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

14. Полухин, П.И. Тонколистовая прокатка и служба валков / Ю.Д. Железнов, В.П. Полухин. – М.: Металлургия, 1967. – 388 с.

Радионова Людмила Владимировна, канд. техн. наук, 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, аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; faizovsergey@gmail.com; ORCID ID 0000-0001-6644-1173.

Лезин Вячеслав Дмитриевич, студент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vyacheslavlezin@gmail.com; ORCID ID 0000-0002-7568-2005.

Сарафанов Александр Евгеньевич, заведующий учебной лабораторией, старший преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sarafanovae@susu.ru.

Поступила в редакцию 15 апреля 2020 г.

MATHEMATICAL MODELING OF DIRECT EXTRUSION POWER PARAMETERS OF LOW-MELTING MATERIALS

L.V. Radionova, radionovalv@susu.ru,
S.R. Faizov, faizovsergey@gmail.com,
V.D. Lezin, vyacheslavlezin@gmail.com,
A.E. Sarafanov, sarafanovae@susu.ru,

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

It is extremely important to determine the technological parameters of the process when extrusion low-melting materials. We developed a mathematical model of wire and rods direct extrusion from low-melting materials, which allows us to determine the energy-power process parameters. The mathematical model adequacy was checked during a laboratory experiment on a hydraulic press. The force and speed of extrusion were measured and recorded in laboratory conditions using the data collection system installed on press. The adequacy check was carried out by extrusion $\varnothing 8.00$ and 15 mm rods and $\varnothing 2.00$ mm wire. Result showed a high precision of calculations with experimental measurements. The error did not exceed 10 %. The obtained mathematical model was used for analytical studies of rods and wire direct extrusion technological modes of from POIn-52¹ alloy. Calculations showed that a decrease in the diameter of the finished bar (wire) from 16.00 to 2.00 mm while keeping a workpiece size of $\varnothing 30.00$ mm leads to an increase in the extrusion force from 86 kN to 131 kN at the initial moment of extrusion, since it is significant from 4 up to 256 increases the drawing ratio. The force when extrusion a bar of $\varnothing 8.00$ mm with an increase in the diameter of the workpiece from 12.0 to 40.0 mm increases from 25 to 171 kN. Conducting analytical studies on the model showed that it is possible not only to study the extrusion process in order to understand the mechanisms of formation of the mechanical and operational properties of the finished rod (wire), but also to design resource-saving extrusion modes for different final products, make an reasoned choice of the required equipment and tools.

Keywords: wire extrusion, mathematical modeling, pressing force, solder, fluid-actuated press.

References

1. Medvedev A.M. [Lead-free mounting brazing technology. What awaits us?] *Electronic components*, 2004, no. 11.
2. Medvedev A.M. [Electronic components and installation sites]. *Components and Technologies*, 2006, no. 12.
3. Grigoriev V. [Lead-free technologies - the demand of the times or the whim of lawmakers from the environment?] *Electronic components*, 2001, no. 6.
4. Zenin V.V., Belyaev V.N., Segal Yu.E., Kolbenkov A.A. [Lead-free solders in the technology of production of microelectronics products] *Microelectronics*, 2003, vol. 32, no. 4.
5. Bleifreiloten: Silber und Kupfer statt Blei. Krempelsauer. *Elektor (BRD)*, 2000, no. 5.
6. Shapiro L. [The use of lead-free technologies cannot be avoided] *Bulletin of Electronics*, 2007, no. 2.
7. Shapiro L. [Implementation of the European directive RoHS] *Electronic components*, 2006, no. 1.
8. Glebov LA, Radionova LV, Faizov S.S. [POIN-52 Solder: process research and development of small-scale wire production technology] *Magnitogorsk Rolling Practice 2019: materials of the IV youth scientific-practical conference*. A.G. Korchunov (Ed.). Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2019. p. 54–56.

¹ Chemical composition: In — 52 %; pollutant < 0,06 %; Sn – rest.

9. Radionova L.V. [Development of a methodology for designing wire production technologies] *Proceedings of the XII Congress of distributors (Volume I). Collection of articles* Spirin S.A., Dumcheva T.N. (Ed.), Moscow: Green Print, 2019. p. 76–79.
10. Kargin V.R. [Theory and technology of extrusion of aluminum alloys: textbook. Allowance] / V.R. Kargin, A.F. Grechnikova, Y.A. Erisov, Yu.S. Starostin. - Samara: Publishing House of SSAU, 2015. 80 p.
11. Loginov Y. N. [Pressing as a method of intense deformation of metals and alloys: a training manual], Yekaterinburg: UrFU, 2016, 156 p. – <https://e.lanbook.com/book/99055>.
12. Backofen W. Deformation processes. Moskow: Metallurgy Publ., 1977. 288 p.
13. Tselikov, A.I. [Rolling theory]. / A.I. Tselikov, A.D. Tomlenov, V.I. Zyuzin et al. – Moskow, Metallurgy Publ., 1982. 335 p.
14. Y.D. Zheleznov, Polukhin P.I. [Sheet rolling and roll service], Moskow, Metallurgy Publ., 1967. 388 p.

Received 15 April 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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

FOR CITATION

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
