

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ПРЕССОВАНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА ПОИН-52 МЕТОДОМ ОБОБЩЕННОГО ПРИВЕДЕННОГО ГРАДИЕНТА

*Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, И.Н. Ердаков, А.В. Брык*

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

Основными параметрами при прямом прессовании проволочных и прутковых изделий, которые определяют его эффективность, являются усилие прессования и скорость истечения металла из матрицы. В настоящей работе методом обобщенного приведенного градиента решена задача по оптимизации процесса прессования проволоки из сплава ПОИН-52. Показано, что основным технологическим параметром, позволяющим существенно влиять на эффективность процесса прессования, является диаметр контейнера. Такие параметры процесса, как длина заготовки, коэффициент трения для снижения усилия прессования, должны находиться на минимальном значении, а полуугол волоки (матрицы) и скорость прессования – на максимальном значении, допустимом технологией процесса. Для проволоки диаметром 2,0 мм методом обобщенного приведенного градиента решена оптимизационная задача относительно безразмерного отношения  $V_{ист}^*/F^*$  ( $Y_1^*/Y_2^*$ ). Найденный оптимум ( $V_{ист}^{max} = 2000$  мм/с и  $F = 79\ 140$  Н) соответствует следующим параметрам технологии изготовления проволоки диаметром 2,0 мм ( $X_1$ ): длина заготовки  $L = 80$  мм ( $X_2$ ); диаметр контейнера  $D_{кон} = 24$  мм ( $X_3$ ); скорость прессования  $V_{пр} = 6$  мм/с ( $X_4$ ); полуугол волоки  $\alpha = 75^\circ$  ( $X_5$ ); коэффициент  $f = 0,3$  ( $X_6$ ). В ходе исследований выявлено, что достичь снижения усилия прессования с 161 640 до 38 001 Н без изменения скорости истечения ( $V_{ист}^{max} = 896$  мм/с) можно за счет уменьшения длины заготовки с 120 до 80 мм, уменьшения диаметра контейнера с 32 до 24 мм, увеличения скорости прессования с 3,5 до 6 мм/с и полуугла матрицы с 23 до 75° при постоянном диаметре готовой проволоки  $D_{БСХ} = 2$  мм и коэффициенте трения  $f = 0,3$ . Для выбора оптимального значения диаметра контейнера в зависимости от диаметра готовой проволоки построена номограмма.

*Ключевые слова:* прямое прессование, припой, проволока, метод обобщенного приведенного градиента, оптимизационная задача.

Прямое прессование – процесс обработки металлов давлением, который широко используется при изготовлении изделий из металлов как с низкими, так и высокими пластическими свойствами. Благодаря осуществлению трехосного сжатия, повышающего пластичность металла и позволяющего значительно деформировать его при прессовании, достигаются коэффициенты вытяжки до 1000. Прессование широко применяется при производстве изделий из алюминиевых, медных, магниевых, титановых, цинковых и других сплавов, а также стали.

В работах [1, 2] нами показано, что процесс прямого холодного прессования является весьма эффективным при производстве проволочного припоя из сплава ПОИН-52, который относится к низкотемпературным бесцинковым припоям. Предложенная технология производства пруткового и проволочного припоя различного типоразмера показала на практике [3] свою высокую рентабельность и

конкурентоспособность при мелкосерийном производстве, однако остается открытым вопрос об оптимальности применяемых технологических параметров процесса прессования.

Основными параметрами при прессовании, которые определяют его эффективность, являются усилие прессования и скорость истечения. При этом логично, что усилие прессования как показатель энергоэффективности процесса должно быть минимальным, а скорость истечения, которая определяет производительность – максимальным.

Оптимизации процессов обработки металлов давлением посвящено большое количество работ [3–7], связано это с необходимостью повышать конкурентоспособность металлопродукции, которая определяется качеством продукции при минимизации ресурсов на ее обеспечение. Процесс прессования в данном случае не является исключением, и вопросам его оптимизации посвящены такие работы, как [8–11].

Целью настоящей работы является оптимизация процесса прямого прессования проволоки и прутков различного типоразмера из легкоплавких материалов.

В работе [12] нами разработана математическая модель прямого прессования припоя из легкоплавких материалов, позволяющая определять энергосиловые режимы прессования проволоки и прутков различного диаметра. В модели энергосиловые параметры процесса прессования (при пренебрежении силами трения скольжения на контактной поверхности пресс-штемпеля и контейнера) предлагается оценивать в виде суммы сил

$$F = F_{\text{деф}} + F_{\text{тр}}, \quad (1)$$

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.

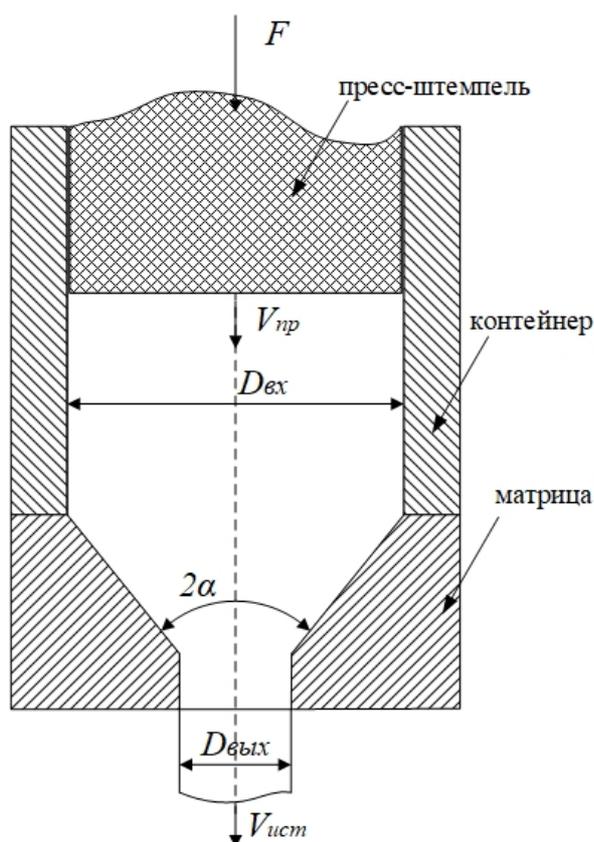


Рис. 1. Схема очага деформации при прессовании:  $D_{\text{вх}} = D_{\text{кон}}$  – диаметр заготовки на входе в матрицу равный диаметру контейнера;  $D_{\text{вых}}$  – диаметр проволоки (прутка) на выходе из матрицы;  $\alpha$  – полуугол матрицы (волоки);  $V_{\text{пр}}$  – скорость прессования (скорость перемещения пресс-штемпеля);  $V_{\text{ист}}$  – скорость истечения (скорость выхода металла из матрицы)

Факторами, влияющими на процесс прессования проволоки или прутка заданного размера, являются диаметр заготовки, полуугол матрицы, длина заготовки, скорость прессования (рис. 1). Варьируя этими факторами, можно снизить или увеличить скорость истечения и энергосиловые параметры процесса прессования. Эффективность процесса прессования определяется именно через эти два показателя, т. е. скорость истечения определяет производительность процесса, и она должна стремиться к максимуму, а энергосиловые параметры на объем произведенной продукции должны быть минимальными.

Диаметр готовой продукции в нашем случае колеблется от 2,0 до 15,0 мм, и его определяет заказчик, следовательно, его в процессе оптимизации принимаем за постоянную величину, а вот диаметр заготовки остается на усмотрение производителя продукции, и его мы можем выбирать с целью получения оптимальных условий процесса прессования. Нужно отметить, что диаметр заготовки все же имеет ограничения по максимальному значению и связано это с технологическими ограничениями: стабильность процесса, мощность используемого гидравлического пресса, прочностные свойства применяемой оснасти. Из этих соображений ограничим максимальный диаметр заготовки для исследуемого процесса величиной 50 мм, а длину – величиной 150 мм. Для теоретических оптимизационных расчетов полуугол матрицы рассмотрим в диапазоне  $2...75^\circ$ , скорость прессования от 1 до 6 мм/с, а коэффициент трения будем варьировать в пределах 0,3...0,6.

Составим математическую модель задачи оптимизации процесса прямого прессования проволоки и прутков из легкоплавкого сплава ПОИИ-52.

Анализ математической модели показал, что задачу следует отнести к классу задач нелинейного программирования. Поэтому в качестве инструмента для оптимизационных расчетов выберем метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ), который часто используется на практике и широко распространен во многих программных пакетах [13–15]. В частности, будем использовать надстройку «Поиск решения» из группы команд анализа данных MS Excel [16].

Метод обобщенного приведенного градиента представляет обобщенную версию метода приведенного градиента и тоже базируется

на сокращении размерности оптимизационной задачи за счет представления зависимых переменных через множество независимых путем применения приведенного градиента для определения направления поиска оптимума и в качестве целевой функции. Данный подход используется для задач выпуклого программирования, но в случае с ОПГ оптимум функции  $f(x)$  ищется при нелинейных ограничениях  $h_i(x)$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $L_j \leq x_j \leq u_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ , где  $x_i$  и  $x_j$  – элементы подмножества базисных ( $x_B = \{x_i\}$ ,  $i \in I$ ) и небазисных ( $x_N = \{x_j\}$ ,  $j \notin I$ ) переменных, соответственно. При этом  $I = \{1, 2, \dots, m\}$ , а  $J = \{m+1, m+2, \dots, n\}$ . Тогда, с учетом обозначений

$$H = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ \vdots \\ h_m(x) \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_i} \\ \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_i} \end{bmatrix}; i \in I; \quad (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_j} \end{bmatrix}; j \in J; \quad (4)$$

$$\nabla_B f(x)^T = \left[ \frac{\partial f(x)}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f(x)}{\partial x_m} \right] = \left[ \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \right], i \in I; \quad (5)$$

$$\nabla_H f(x)^T = \left[ \frac{\partial f(x)}{\partial x_{m+1}}, \dots, \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \right] = \left[ \frac{\partial f(x)}{\partial x_j} \right], j \in J; \quad (6)$$

ОПГ вычисляется по выражению

$$\begin{aligned} r^T &= \frac{df(x)}{dx_N} = \\ &= \nabla_N f(x)^T - \nabla_B f(x)^T \left[ \frac{\partial H}{\partial x_B} \right]^{-1} \frac{\partial H}{\partial x_N}. \end{aligned} \quad (7)$$

Итак, определим целевую функцию и назначим ограничения оптимизационной задачи. В случае многокритериального поиска необходимо сформулировать понятие эффективного или оптимального решения по Парето.

Исходя из условий рассматриваемая задача двухкритериальная, так как эффективность процесса прессования оценивается усилием, которое стремится к минимуму, и скоростью истечения, которая должна быть максимальной.

Через  $X$  обозначим множество допустимых решений в нашей задаче,  $x \in X$  – допустимое решение. Каждое решение  $x \in X$  оценивается по двум критериям. Через  $H(x)$ ,  $x \in X$  обозначим вещественную функцию, значениями которой являются оценки решения  $x \in X$  по критерию  $i$ ,  $i = \overline{1, 2}$ . Тогда век-

тор  $H(x) = (H_1(x), H_2(x))$ ,  $x \in X$  – набор оценок решения  $x \in X$  по двум критериям. В нашем случае степень предпочтительности решения  $x \in X$  возрастает с уменьшением первой и увеличением второй компонент вектора  $H$ , т. е. чем меньше значение  $H_1(x)$  и больше значение  $H_2(x)$ , тем лучше решение  $x$  по двум критериям. Решение  $x^* \in X$  называется парето-оптимальным (оптимальным по Парето, эффективным), если не существует другого решения  $x \in X$ , для которого

$$H_1(x) \leq H_1(x^*); \quad (8)$$

$$H_2(x) \geq H_2(x^*). \quad (9)$$

Если множество возможных оценок  $H(x)$  представить некоторой областью ОАВ на координатной плоскости  $(H_1, H_2)$  (рис. 2), то эффективной границей этого множества с недоменирующими оценками будет кривая ОА.

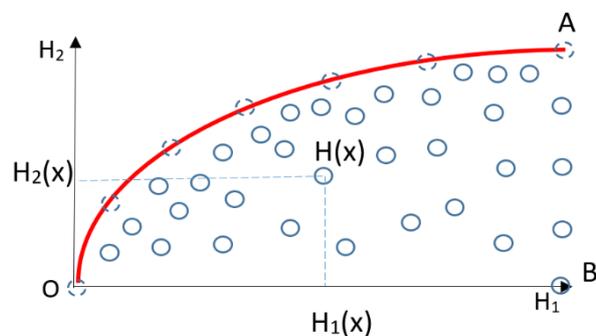


Рис. 2. Гипотетическое множество возможных оценок  $H(x)$ , представленное областью ОАВ на координатной плоскости критерия  $H_1$  и  $H_2$

Применительно к процедуре «Поиск решения» целевая функция должна быть одна, поэтому преобразуем нашу задачу. Вместо двух будем улучшать один критерий – отношение скорости истечения заготовки к усилию прессования. Естественно, критерии будем использовать в нормализованном (безразмерном) виде.

Исходя из практики производства данной проволоки, в качестве норм возьмём максимальную скорость истечения проволоки  $V_{ист}^{max} = 2000$  мм/с и максимальное усилие прессования  $F^{max} = 280\,000$  Н. После деления фактических значений критериев на их максимальные получим нормализованные  $V_{ист}^*$  и  $F^*$ , т. е. значения будут находиться в интервале  $[0; 1]$ .

Представим разработанную нами ранее [1, 12] математическую модель в виде электронной таблицы и определим ограничения. Из четырнадцати параметров восемь будут

зафиксированы (табл. 1). Варьироваться будут только шесть:

диаметр готовой проволоки  $D_{BSX} = 2 \dots 15$  мм ( $X_1$ );

длина заготовки  $L = 80 \dots 150$  мм ( $X_2$ );

диаметр контейнера  $D_{кон} = 20 \dots 50$  мм ( $X_3$ );

скорость прессования  $V_{пр} = 1 \dots 6$  мм/с ( $X_4$ );

полуугол матрицы (волоки)  $\alpha = 2 \dots 75^\circ$  ( $X_5$ );

коэффициент  $f = 0,3 \dots 0,6$  ( $X_6$ ).

Из всех расчетных параметров нас будут интересовать только два –  $V_{ист}$  ( $Y_1$ ) и  $F$  ( $Y_2$ ) (табл. 2), которые в оптимизационной задаче будут представлены одним безразмерным отношением  $V_{ист}^*/F^*$  ( $Y_1^*/Y_2^*$ ) с пятью предельными вариантами (табл. 3):

$$V_{ист}^{max} = 2000 \text{ мм/с};$$

$$V_{ист}^{max} = 1500 \text{ мм/с};$$

$$V_{ист}^{max} = 1000 \text{ мм/с};$$

$$V_{ист}^{max} = 500 \text{ мм/с};$$

$$V_{ист}^{max} = 1,8 \text{ мм/с}.$$

В качестве граничных условий зададим требование, чтобы все параметры модели имели неотрицательные значения.

После настройки и запуска процедуры «Поиск решения» получим пять вариантов расчетов, соответствующих предельным скоростям истечения проволоки (рис. 3). По данным табл. 3 (см. рис. 3) видно, что от первого варианта к пятому значение отношений критериев оптимизации увеличивается. Наибольшее отношение  $Y_1^*/Y_2^* = 3,545$  достига-

Таблица 1  
Входные параметры математической модели прямого прессования  
проволоки (прутков) из сплава ПОИН-52

Параметр	Размерность	Величина	Диапазон значений	Фактор
Диаметр заготовки (прутка), $D_{вх}$	мм	43,64	const	-
Диаметр готовой проволоки, $D_{BSX}$	мм	2,5	2...15	$X_1$
Длина заготовки, $L$	мм	80	80...150	$X_2$
Длина распрессованной заготовки, $L$	мм	73,1	const	-
Диаметр контейнера, $D_{кон}$	мм	45,64	20...50	$X_3$
Скорость прессования, $V_{пр}$	мм/с	6	1...6	$X_4$
Сопrotивление деформации заготовки, $\sigma$	МПа	10,5	const	-
Сопrotивление деформации в зоне калибр. пояска, $\sigma_{кл}$	МПа	9,5	const	-
Теплоемкость, $c$	Дж/(кг·К)	230	const	-
Плотность, $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	7 300	const	-
Теплопроводность	Вт/ммК	86	const	-
Полуугол волоки, $\alpha$	°	75	2...75	$X_5$
Коэффициент, $f$	-	0,3	0,3...0,6	$X_6$
Длина калибрующего пояска, $L_{кл}$	мм	5	const	-

Таблица 2  
Выходные параметры математической модели прямого прессования  
проволоки (прутка) из сплава ПОИН-52

Параметр	Размерность	Величина	Функция отклика
Коэффициент вытяжки, $\mu$	-	333,3	
Сопrotивление деформации	МПа	9,99	
Скорость истечения, $V_{ист}$	мм/с	2000,0	$Y_1$
Параметр формы по Бэкофену	-	0,8	
Сила деформации, $F_{деф}$	Н	80 649	
Сила трения, $F_{тр}$	Н	35 665	
в контейнере $F_{трI}$	Н	33 021	
в матрице $F_{трII}$	Н	2 532	
в калибр. пояске $F_{трIII}$	Н	112	
Усилие в момент начала прессования, $F$	Н	116 314	$Y_2$
Усилие в момент завершения прессования, $F$	Н	87 807	

Параметры модели прессования проволоки Ø2,0 мм из сплава ПОИн-52 для пяти предельных скоростей истечения

$Y1^*/Y2^*$	Вариант	Параметры модели прессования проволоки									
		$Y1^*$	$Y2^*$	$Y1$	$Y2$	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$	$X6$
0,016235	1	0,0009	0,055437	1,8	15555,77	15	80	20	1,0125	75	0,3
2,664662	2	0,25	0,093821	500	26326,23	2,1909	80	20	6	75	0,3
3,34603	3	0,5	0,149431	1000	41930,59	2	80	25,82	6	75	0,3
3,472146	4	0,75	0,216005	1500	60611,35	2	80	31,623	6	75	0,3
3,545636	5	1	0,282037	2000	79140,1	2	80	36,515	6	75	0,3

ется в пятом варианте, следовательно, в этом случае имеет место оптимум:  $V_{ист} = 2000$  мм/с;  $F = 79\ 140$  Н;  $D_{BSX} = 2$  мм; длина заготовки  $L = 80$  мм; диаметр контейнера  $D_{кон} = 36$  мм; скорость прессования  $V_{пр} = 6$  мм/с; полуугол матрицы (волокни)  $\alpha = 75^\circ$ ; коэффициент  $f = 0,3$ .

Анализируя табличные данные (см. табл. 3), можно выявить следующую тенденцию. По ме-

ре увеличения значения отношений критериев  $Y1^*/Y2^*$  поиск методом обобщенного приведенного градиента сводится к отысканию оптимального диаметра контейнера  $D_{кон}$ , т. е. поиск начинается с 20 мм и заканчивается 36,515 мм. Вариант 5 является оптимальным, так как в этом случае имеет место максимальное отношение критериев  $Y1^*/Y2^* = 3,545$ .

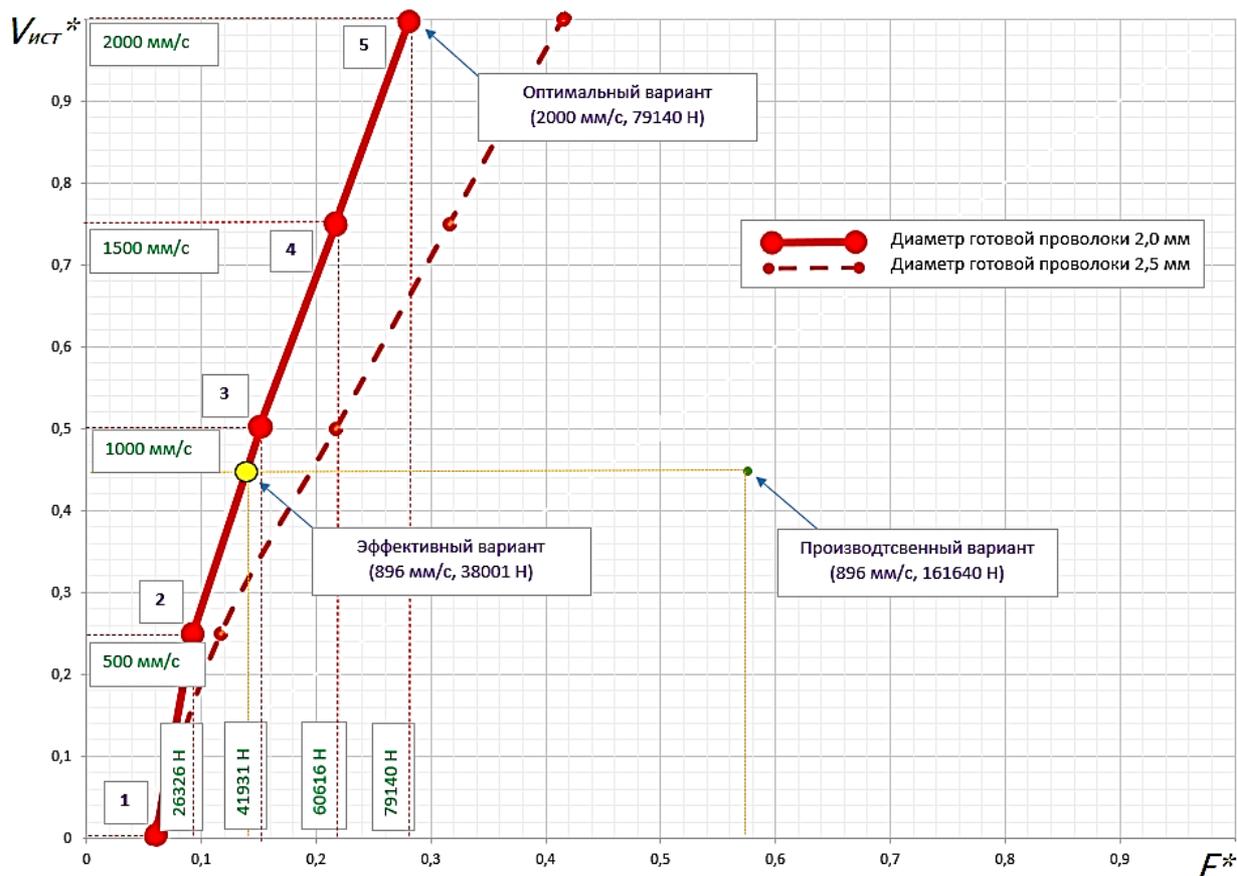


Рис. 3. Фронт Парето по пяти точкам для критерия  $V_{ист}^*$  и  $F^*$  при прямом прессовании проволоки из сплава ПОИн-52: 1–5 – варианты расчета оптимизационной задачи, сплошная красная линия фронта соответствует случаю выпуска готовой проволоки 2,0 мм; пунктирная красная линия фронта соответствует случаю выпуска готовой проволоки 2,5 мм; зеленая точка соответствует интуитивно разработанному производственному варианту процесса, а желтая – его эффективному варианту

Остальные параметры принимают граничные значения: диаметр готовой проволоки  $D_{BSX} = \min$ ; длина заготовки  $L = \max$ ; скорость прессования  $V_{пр} = \max$ ; полуугол волоки  $\alpha = \max$ ; коэффициент  $f = \min$ .

Если указанные пять точек нанесем на плоскость возможных оценок для критериев  $V_{ист}^*$  и  $F^*$ , соединим их красной жирной линией, то получим фронт Парето рассматриваемой задачи (рис. 3).

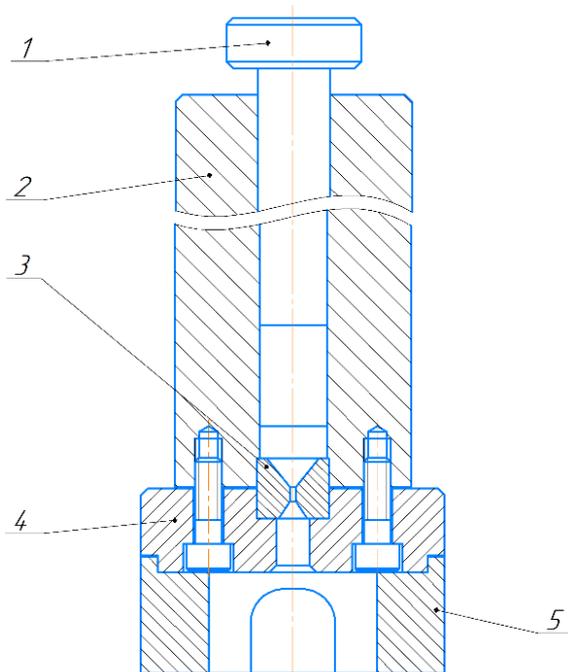


Рис. 4. Эскиз оснастки: 1 – пуансон; 2 – контейнер; 3 – матрица (волока); 4 – прижим; 5 – седло

Ранее интуитивным путем была спроектирована и изготовлена технологическая оснастка для прямого прессования данной проволоки (рис. 4). Конструктивные параметры оснастки при практическом применении обеспечивали скорость истечения сплава из матрицы (волоки) 896 мм/с, при этом усилие прессования в начальном моменте составляло 161 640 Н [3].

Если решить оптимизационную задачу для предельной скорости  $V_{ист}^{\max} = 896$  мм/с, то можно снизить усилие прессования с 161 640 до 38 001 Н за счет уменьшения длины заготовки с 120 до 80 мм, уменьшения диаметра контейнера с 32 до 24 мм, увеличения полуугла матрицы (волоки) с 23 до 75°. При этом скорость прессования возрастет с 3,5 до 6 мм/с при постоянном диаметре готовой проволоки  $D_{BSX} = 2$  мм и коэффициенте трения  $f = 0,3$ . В результате чего производство проволоки станет эффективнее. Параметры трех процессов – оптимального, производственного и эффективного показаны в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что по критерию  $Y_1^*/Y_2^*$  эффективность производственной технологии увеличена в 4,2 раза и только на 8% уступает оптимальному варианту. На рис. 3 с фронтом Парето производственному варианту соответствует зеленая точка, а эффективному – желтая.

В случае выпуска готовой продукции большего диаметра фронт Парето будет изгибаться в правую сторону, как показано на рис. 3. Пунктирная линия соответствует случаю  $D_{BSX} = 2,5$  мм. Пять вариантов расчета координат характерных точек для новой кривой представлены в табл. 5.

Сравнительный анализ 5-го и 10-го оптимальных вариантов (см. табл. 3 и 5) позволил выявить следующую закономерность. Производство проволоки большего диаметра снижает эффективность в 1,4 раза (оценено по отношению  $Y_1^*/Y_2^*$ ), что отражается в увеличении усилия прессования с 79 140 до 116 314 Н. Связано это с необходимостью увеличения диаметра контейнера с 36 до 45 мм. Таким образом, повышение эффективности процесса прессования в большей степени зависит от диаметра контейнера и для изготовления проволоки увеличенного диаметра требуется большая по размерам оснастка.

Дальнейшее увеличение размера выпускаемой проволоки искажает нелинейный фронт

Таблица 4

Параметры модели прессования проволоки из сплава ПОИИ-52 для оптимального (вариант 5), производственного и эффективного вариантов

$Y_1^*/Y_2^*$	Вариант	Параметры модели прессования проволоки									
3,545636	5	$Y_1^*$	$Y_2^*$	$Y_1$	$Y_2$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
		1	0,282037	2000	79140,1	2	80	36,515	6	75	0,3
0,777778	Производный	$Y_1^*$	$Y_2^*$	$Y_1$	$Y_2$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
		0,448	0,576	896	161640,5	2	120	32	3,5	23	0,3
3,308017	Эффективный	$Y_1^*$	$Y_2^*$	$Y_1$	$Y_2$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
		0,448	0,135429	896	38001,53	2	80	24,44	6	75	0,3

Параметры модели прессования проволоки из сплава ПОИн-52 для пяти предельных скоростей истечения и условия выпуска проволоки диаметром 2,5 мм

Y1*/Y2*	Вариант	Параметры модели прессования проволоки									
		Y1*	Y2*	Y1	Y2	X1	X2	X3	X4	X5	X6
0,0162	6	0,0009	0,0554	1,8	15556	15	80	20	1,0125	75	0,3
2,1516	7	0,25	0,1162	500	32604	2,5	80	22,822	6	75	0,3
2,3079	8	0,5	0,2166	1000	60791	2,5	80	32,275	6	75	0,3
2,3763	9	0,75	0,3156	1500	88562	2,5	80	39,528	6	75	0,3
2,4125	10	1	0,4145	2000	116314	2,5	80	45,644	6	75	0,3

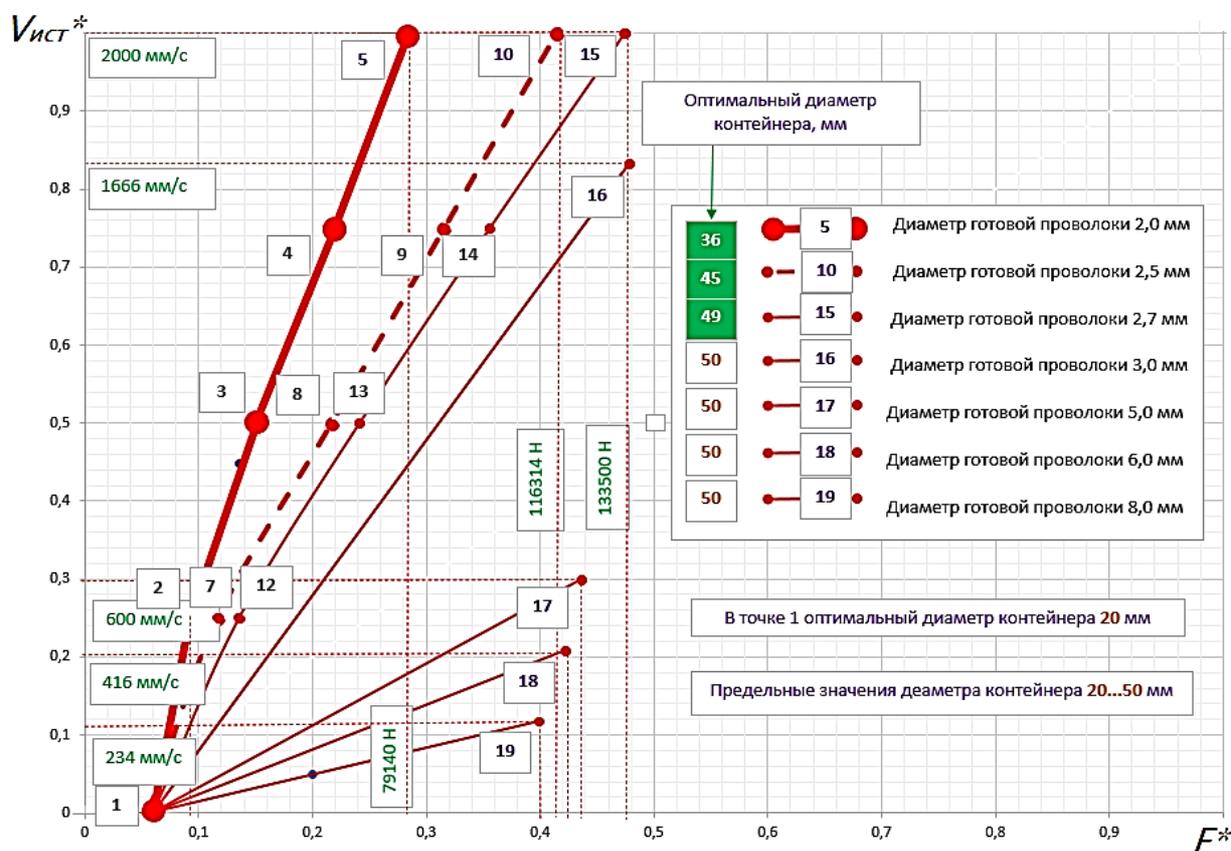


Рис. 5. Семейство кривых Парето для проволоки диаметром от 2,0 до 8,0 мм

Парето, смещая его вправо (рис. 5), а при достижении диаметра проволоки в 3,0 мм линии фронта перемещаются в нижнюю часть координатной плоскости, что связано с достижением верхней предельной границы параметра  $D_{кон} = 50$  мм.

Рассматривая графические зависимости (см. рис. 5) можно обнаружить, что область эффективных процессов прямого прессования находится в верхнем левом квадранте коор-

динатной плоскости. Характерной особенностью этой области также является и то, что в ней выполняется условие  $V_{ист}^* > 0,5$  и  $F^* < 0,5$ .

Дальнейший анализ оптимальных решений позволил установить наиболее важный параметр. Оказалось, что наибольшее влияние на эффективность прессования оказывает диаметр контейнера. Именно его размеры главным образом определяют усилие прессования и скорость истечения сплава из матрицы.

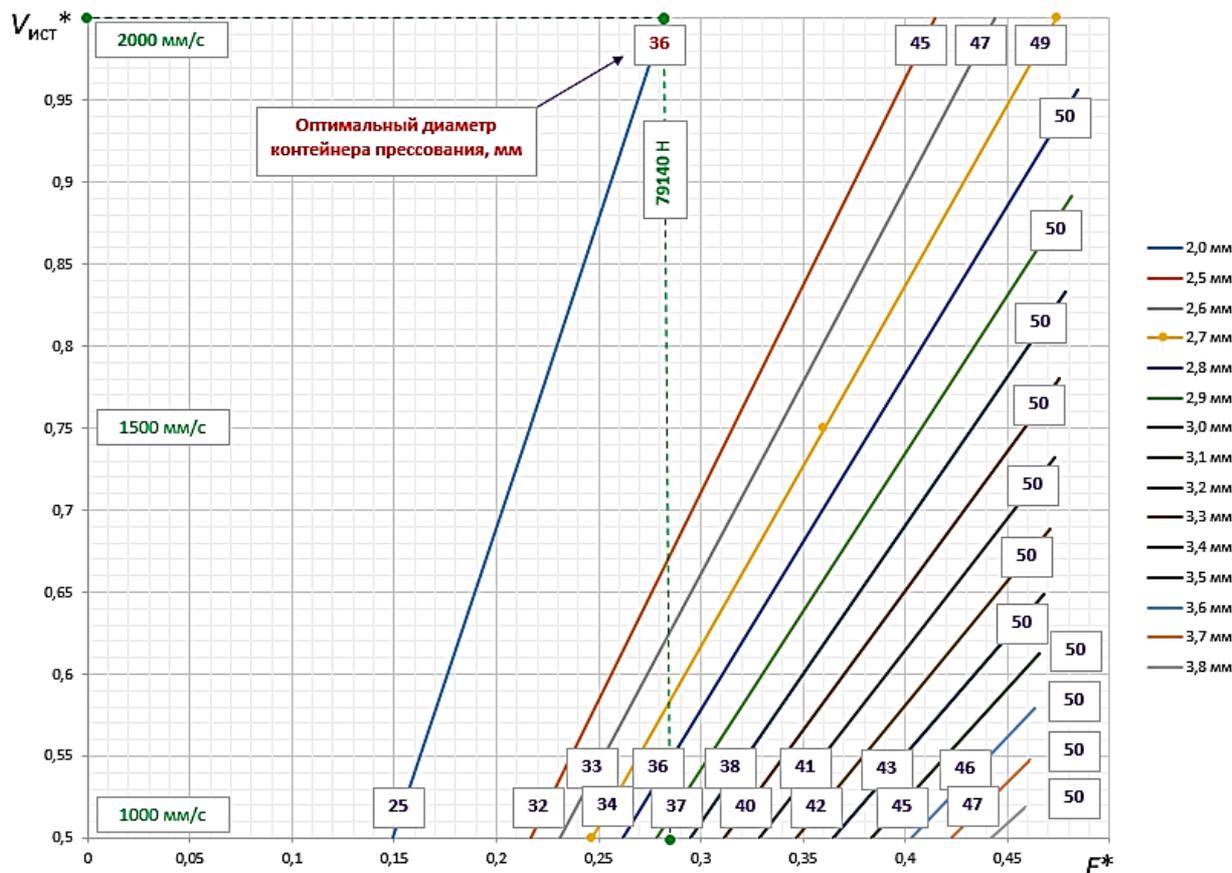


Рис. 6. Номограмма для определения оптимального диаметра контейнера прессования ( $D_{кон}$ ) в зависимости от скорости истечения ( $V_{ист}^*$ ) и заданного диаметра готовой продукции ( $D_{БСХ}$ )

Целесообразно построить номограмму, позволяющую определять оптимальный диаметр контейнера прессования в зависимости от скорости истечения и заданного размера выпускаемой продукции (рис. 6). На горизонтальной оси указаны значения нормализованного критерия усилия прессования  $F^*$ , чем меньше его значение, тем ниже усилие прессования. По вертикальной оси приведены значения нормализованного критерия скорости истечения  $V_{ист}^*$ , соответственно, чем выше его значение, тем больше скорость истечения сплава из матрицы и производительнее процесс. Семейство линий показывает оптимальный диаметр контейнера для проволоки от 2,0 до 3,8 мм в зависимости от скорости истечения или усилия прессования. Например, при производстве проволоки диаметром 2,0 мм оптимальный диаметр контейнера будет соответствовать 36 мм, а усилие прессования составит 79 140 Н при скорости истечения 2000 мм/с. Также можно обратить внимание и на то, что, начиная с диаметра проволоки 2,8 мм, оптимальным будет диаметр контейнера 50 мм

(максимально допустимый условиями поставленной задачи  $F^{max} = 280\ 000$  Н).

Номограмма позволяет не только определить оптимальные условия изготовления проволоки заданного диаметра, но и выбрать эффективный режим прессования при имеющемся типоразмере контейнера путем определения эффективной скорости прессования и истечения материала.

На основании проведенного математического анализа сформулированы следующие выводы.

1. Впервые изучен процесс прямого прессования проволоки из сплава ПОИН-52, учитывающий повышение его эффективности по двум критериям: скорость истечения сплава из матрицы  $V_{ист}$  и усилие прессования  $F$ .

2. Методом обобщенного приведенного градиента найден оптимум при максимальной скорости истечения и минимальном усилии прессования ( $V_{ист}^{max} = 2000$  мм/с и  $F = 79\ 140$  Н) технологии изготовления проволоки диаметром 2,0 мм ( $X_1$ ) из сплава ПОИН-52 с параметрами: длина заготовки  $L = 80$  мм ( $X_2$ ); диаметр

контейнера  $D_{\text{кон}} = 24$  ( $X_3$ ); скорость прессования  $V_{\text{пр}} = 6$  мм/с ( $X_4$ ); полуугол матрицы (волоки)  $\alpha = 75^\circ$  ( $X_5$ ); коэффициент  $f = 0,3$  ( $X_6$ ).

3. Достичь снижения усилия прессования с 161 640 Н до 38 001 Н без изменения скорости истечения ( $V_{\text{ист}}^{\text{max}} = 896$  мм/с) можно за счет уменьшения длины заготовки с 120 до 80 мм, уменьшения диаметра контейнера с 32 до 24 мм, увеличения скорости прессования с 3,5 до 6 мм/с и полуугла матрицы (волоки) с 23 до  $75^\circ$  при постоянном диаметре готовой проволоки  $D_{\text{БСХ}} = 2$  мм и коэффициенте трения  $f = 0,3$ .

4. Технологическим параметром, относительно которого можно оптимизировать про-

цесс прессования, является диаметр контейнера. Такие параметры процесса, как длина заготовки, коэффициент трения для снижения усилия прессования, должны находиться на минимальном значении, а полуугол волоки (матрицы) и скорость прессования – на максимальном значении, допустимом технологией процесса. При этом диаметр готовой проволоки (прутка), как правило, жестко задается заказчиком.

5. С целью выбора оптимального значения диаметра контейнера в зависимости от диаметра готовой проволоки построена номограмма.

### Литература

1. 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

2. Компьютерное моделирование температурных режимов при полунепрерывном прямом прессовании легкоплавких материалов / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, Д.В. Громов, И.Н. Ердиков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 30–38. DOI: 10.14529/met200404

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

4. Саранча, С.Ю. Применение информационных технологий в металлургическом производстве: оптимизация технологии прокатки и раскроя готовой продукции в сортопрокатном производстве / С.Ю. Саранча, А.Б. Моллер // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2014. – Т. 1. – С. 139–143.

5. Температурно-деформационный критерий оптимизации маршрутов волочения тонкой высокоуглеродистой проволоки / Ю.Л. Бобарикин, С.В. Авсейков, А.В. Веденеев, И.Н. Радькова // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (66). – С. 205–208.

6. Резников, Ю.Н. Расчёт и оптимизация процессов объёмной штамповки / Ю.Н. Резников, А.В. Вовченко // Вестник Донского государственного технического университета. – 2007. – Т. 7, № 1 (32). – С. 3–24.

7. Барбаев, В.И. Оптимизация технологииковки крупных слитков с целью снижения энергозатрат / В.И. Барбаев, Е.П. Большая // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – 2008. – Т. 4, № 4. – С. 65–70.

8. Плешивцева, Ю.Э. Оптимизация процесса изотермического прессования слитков из алюминиевых сплавов с предварительным градиентным нагревом / Ю.Э. Плешивцева, А.А. Афиногентов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. – 2016. – № 2. – С. 49–57. DOI: 10.17073/0021-3438-2016-2-49-57

9. Бережной, В.Л. О развитии методов исследования трения для оптимизации прессования на базе экспериментально-промышленного модуля / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. – 2009. – № 4. – С. 62–72.

10. Найзабеков, А.Б. Исследование и оптимизация процесса прессования заготовок в равноканальной угловой матрице с роликами / А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев // Труды Университета. – 2007. – № 3 (28). – С. 40–43.

11. Рахманов, С.Р. Оптимизация процесса прессования и калибровки матрицы трубопрофильного пресса путем моделирования / С.Р. Рахманов // Сталь. – 2015. – № 10. – С. 43–49.

12. Radionova, L.V. *Mathematical Modelling of Low Temperature Solder Direct Extrusion* / L.V. Radionova, S.R. Faizov, A.E. Sarafanov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – 969 (1). – 012107.

13. Оптимизация распределительных процессов на основе аналитических методов и эвристических алгоритмов / А.А. Золотарев, Н.Н. Венцов, О.И. Агибалов, А.С. Деева // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. – 2016. – № 1. – С. 1–8.

14. Леоненков, А.В. *Решение задач оптимизации в среде MS Excel* / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 704 с.

15. Соболев, Б.В. *Методы оптимизации: практикум* / Б.В. Соболев, Б.Ч. Месхи, Г.И. Каныгин. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 380 с.

16. Барышев, А.В. *К вопросу использования надстройки Excel «поиск решения» в задачах линейного программирования* / А.В. Барышев, Е.Л. Федотова // *Интернет-журнал «Наукоедение»*. – 2015. – № 3. – <http://naukovedenie.ru/PDF/54TVN315.pdf> (дата обращения: 06.02.2021).

**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**, аспирант, преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; faizovsr@usu.ru, ORCID ID: 0000-0001-6644-1173.

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

**Брык Анастасия Владимировна**, аспирант, инженер отдела «Материаловедение», инженер-исследователь кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; asp20bav433@susu.ru, ORCID ID 0000-0003-2266-4599.

*Поступила в редакцию 20 декабря 2020 г.*

DOI: 10.14529/met210106

## OPTIMIZATION OF THE WIRE EXTRUSION PROCESS FROM 52In–48Sn ALLOY BY THE GENERALIZED REDUCED GRADIENT METHOD

L.V. Radionova, radionovalv@susu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9587-2925,

S.R. Faizov, faizovsr@usu.ru, ORCID ID: 0000-0001-6644-1173,

I.N. Erdakov, erdakovin@susu.ru,

A.V. Bryk, asp20bav433@susu.ru, ORCID ID: 0000-0003-2266-4599

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The main parameters in the extrusion of wire and bar products, which determine its efficiency, are the extrusion force and the flow rate of metal from the die. In this work, the generalized reduced gradient method is used to optimize the process of extrusion of wire from an alloy 52In–48Sn. It is shown that the main technological parameter that can significantly affect the efficiency of the extrusion process is the diameter of the container. To reduce the extrusion force, such process parameters as the billet length, the coefficient of friction should be at a minimum value, and the die half-angle and extrusion speed at the maximum value allowed by the process technology. For a wire with a diameter of 2.0 mm, the generalized reduced gradient method is used to solve the optimization problem

concerning the dimensionless ratio  $V_{ext}^*/F^* (Y_1^*/Y_2^*)$ . The generalized reduced gradient method is used to solve the optimization problem concerning the dimensionless ratio  $V_{ext}^*/F^* (Y_1^*/Y_2^*)$  for a wire of 2.0 mm in diameter. The obtained optimum ( $V_{ext} = 2000$  mm/s and  $F = 79140$  N) corresponds to the following parameters of the technology for manufacturing a wire with a diameter of 2.0 mm ( $X_1$ ): billet length  $L = 80$  mm ( $X_2$ ); container diameter  $D_{con} = 24$  ( $X_3$ ); pressing speed  $V_{pr}^{max} = 6$  mm/s ( $X_4$ ); die half-angle  $\alpha = 75^\circ$  ( $X_5$ ); friction coefficient  $f = 0.3$  ( $X_6$ ). In the course of the research, it has been shown that it is possible to reduce the extrusion force from 161640 to 38001 N without changing the flow rate ( $V_{ext} = 896$  mm/s) by reducing the billet length from 120 to 80 mm, reducing the diameter of the container from 32 to 24 mm, increasing the speed pressing from 3.5 to 6 mm/s and half-angle of the die from 23 to 75° with constant finished wire diameter  $D_{BSX} = 2$  mm and friction coefficient  $f = 0.3$ . A nomogram has been built for choosing the optimal value of the container diameter depending on the diameter of the finished wire.

*Keywords:* extrusion, solder, 52In–48Sn, wire, generalized reduced gradient method, optimization problem.

### References

1. 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
2. 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, vol. 20, no. 4, pp. 30–38. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200404
3. Glebov L.A., Radionova L.V., Faizov S.S.; ed. A.G. Korchunov [Solder POIN-52: research of the process and development of technology for small-scale production of wire]. *Magnitogorsk Rolling Practice 2019: Materials of the IV Youth Scientific and Practical Conference*. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2019, pp. 54–56. (in Russ.)
4. Sarancha S.Yu., Moller A.B. [Application of information technologies in metallurgical production: optimization of rolling technology and cutting of finished products in section rolling production]. *Actual problems of modern science, technology and education*, 2014, vol. 1, pp. 139–143. (in Russ.)
5. Bobarikin Yu.L., Avseikov SV, Vedenev AV, Rad'kova I.N. [Temperature-deformation criterion for optimizing the routes of drawing a thin high-carbon wire]. *Casting and metallurgy*, 2012, no. 3 (66), pp. 205–208. (in Russ.)
6. Reznikov Yu.N., Vovchenko A.V. [Calculation and optimization of bulk stamping processes]. *Bulletin of the Don State Technical University*, 2007, vol. 7, no. 1 (32), pp. 3–24. (in Russ.)
7. Barbaev V.I., Bolshina E.P. [Optimization of technology for forging large ingots in order to reduce energy consumption]. *Collection of scientific papers based on the materials of the international scientific and practical conference*, 2008, vol. 4, no. 4, pp. 65–70. (in Russ.)
8. Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A. [Optimization of the process of isothermal pressing of ingots from aluminum alloys with preliminary gradient heating]. *Izvestiya Vuzov. Non-ferrous metallurgy*, 2016, no. 2, pp. 49–57. (in Russ.) DOI: 10.17073/0021-3438-2016-2-49-57
9. Berezhnoy V.L. [About the development of methods for the study of friction for optimization of pressing on the basis of the experimental-industrial module]. *Technology of light alloys*, 2009, no. 4, pp. 62–72. (in Russ.)
10. Nayzabekov A.B., Lezhnev S.N. [Research and optimization of the process of pressing blanks in an equal-channel angular matrix with rollers]. *Proceedings of the University*, 2007, no. 3 (28), pp. 40–43. (in Russ.)
11. Rakhmanov S.R. [Optimization of the process of pressing and calibrating the matrix of a pipe-profile press by modeling]. *Steel*, 2015, no. 10, pp. 43–49. (in Russ.)
12. Radionova L.V., Faizov S.R., Sarafanov A.E. Mathematical Modelling of Low Temperature Solder Direct Extrusion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 969 (1), 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/969/1/012107
13. Zolotarev A.A., Ventsov N.N., Agibalov O.I., Deeva A.S. [Optimization of distribution processes based on analytical methods and heuristic algorithms]. *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia*, 2016, no. 1, pp. 1–8. (in Russ.)

14. Leonenkov A.V. *Resheniye zadach optimizatsii v srede MS Excel* [Solving optimization problems in MS Excel]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2005. 704 p.

15. Sobol B.V., Meskhi B.Ch., Kanygin G.I. *Metody optimizatsii: praktikum* [Optimization methods: workshop]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2009. 380 p.

16. Baryshev A.V., Fedotova E.L. [On the question of using the Excel add-in “search for a solution” in linear programming problems]. *Internet-journal “Science Science”*, 2015, no. 3. (in Russ.) Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/54TVN315.pdf> (accessed 06.02.2021).

*Received 20 December 2020*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Оптимизация процесса прямого прессования проволоки из сплава ПОИп-52 методом обобщенного приведенного градиента / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, И.Н. Ердаков, А.В. Брык // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 54–65. DOI: 10.14529/met210106

**FOR CITATION**

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, vol. 21, no. 1, pp. 54–65. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210106

---