

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ПРЕССОВАНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО И ПРУТКОВОГО ПРИПОЯ ПОИН-52

Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, Д.В. Громов, И.Н. Ердаков, О.О. Сиверин
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В любом процессе обработки металлов давлением имеет место внешнее трение на контакте инструмента и обрабатываемого материала. Под влиянием сил трения возрастает усилие деформации, разогревается и интенсивно изнашивается инструмент, увеличивается неравномерность деформации и, как следствие, возникает разнородность микроструктуры обрабатываемого металла, возникают растягивающие напряжения, которые иногда приводят к нарушению сплошности изделия. В настоящей работе исследуется влияние контактного трения на процесс прямого прессования прутков и проволоки из сплава ПОИН-52. С помощью математического моделирования исследовано влияние коэффициента трения на усилие в процессе прессования прутков $\varnothing 8,0$ и $15,0$ мм, а также проволоки $\varnothing 2,0$ мм. Показано, что с увеличением коэффициента трения на преодоление силы трения скольжения на контактной поверхности обрабатываемого металла с контейнером и с матрицей тратится до 60 % усилия, необходимого для прессования исследуемого сплава. В ходе экспериментальных исследований показано, что применение смазочных материалов, а именно графитовой (графит – С) и молибденовой (дисульфид молибдена – MoS_2) смазки, позволяет снизить коэффициент трения более чем в 10 раз. С определенной долей допущения можно говорить о том, что при прессовании припоя ПОИН-52 с использованием стального контейнера без применения смазки коэффициент трения равен 0,5, а при применении графитовой или молибденовой смазки коэффициент трения будет принимать значения, близкие к 0,05. С помощью результатов экспериментальных исследований путем подбора были определены показатели трения по законам Кулона, Зибеля и Леванова, которые могут быть применены для компьютерного моделирования в пакете Qform процесса прямого прессования припоя ПОИН-52 с использованием стального контейнера без применения смазки и с применением графитовой и молибденовой смазки. Учет достоверной величины показателя трения при компьютерном моделировании позволит существенно повысить точность расчетов.

Ключевые слова: прямое прессование, коэффициент трения, припой, проволока, пруток, усилие прессования, сила трения.

В любом процессе обработки металлов давлением, будь это прокатка, волочение или прессование, смещаемый объем деформируемого тела стремится к некоторому перемещению по поверхности инструмента. При этом возникают силы трения, затрудняющие это перемещение. Контактное или внешнее трение сказывается на энергосиловых параметрах процессов [1–5]. Под влиянием сил трения в ряде случаев усилие деформации возрастает в несколько раз по сравнению с тем усилием, которое обусловлено истинным сопротивлением металла деформации. Кроме того, действие сил трения приводит к неравномерной деформации металла, что является причиной разнородности его структуры, возникновению растягивающих напряжений, которые иногда приводят к нарушению сплошности изделия [6–8]. От характера и величины сил трения

зависит степень износа инструмента и качество поверхности изделия [9–11].

В прессовании для снижения влияния контактного трения на энергосиловые параметры процесса применяется метод обратного прессования. Это позволяет снизить энергосиловые параметры прессования и эффективно использовать мощности оборудования, но приводит к усложнению конструкции применяемого оборудования [12, 13].

Снижение коэффициента трения на контакте заготовка–контейнер при прямом прессовании позволяет не только снизить усилия, но и оказывает влияние на температуру и напряженно-деформированное состояние экструдированного металла [14–16].

Разработанный способ мелкосерийного производства пруткового и проволочного припоя из сплава ПОИН-52 показал его пер-

спективность [17], но, в свою очередь, при реализации и отработке технологии изготовления было выявлено, что предлагаемую технологию можно совершенствовать [16], что позволит дополнительно повысить эффективность процесса и качество готовой продукции.

Целью настоящей работы является исследование влияния контактного трения на процесс прямого прессования прутков и проволоки из сплава ПОИИ-52.

В работах [12–14] энергозатраты на процесс прессования (при пренебрежении силами трения скольжения на контактной поверхности пресс-штемпера 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.

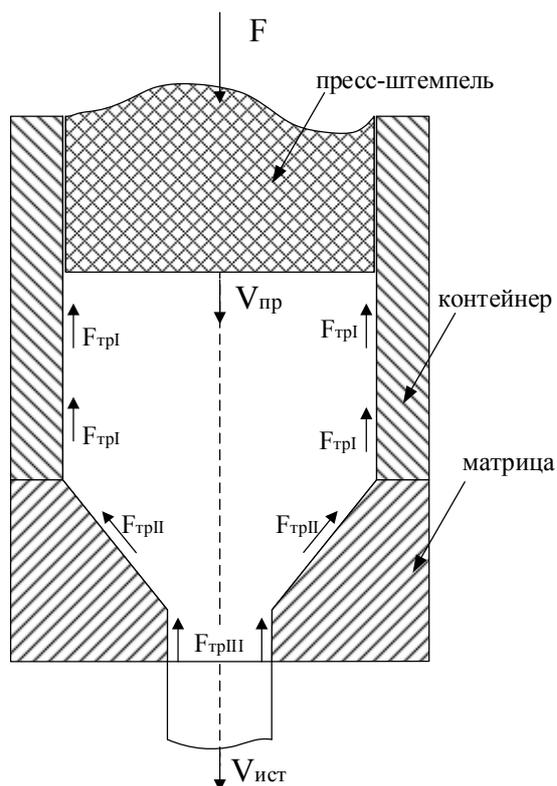


Рис. 1. Схема действия сил трения в очаге деформации при прямом прессовании

Сила трения $F_{\text{тр}}$ определяется особенно сильно геометрией очага деформации (рис. 1) и состоит из трех частей – усилия, направленного на преодоление трения скольжения обрабатываемого металла о контейнер $F_{\text{трI}}$, о по-

верхность матрицы $F_{\text{трII}}$ и о калибрующий поясок матрицы $F_{\text{трIII}}$:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{трI}} + F_{\text{трII}} + F_{\text{трIII}}. \quad (2)$$

Согласно закону трения Кулона, напряжение трения τ пропорционально нормальному напряжению на поверхности контактирующих тел σ_n и не зависит от сопротивления деформации металла σ_s , т. е.

$$\tau = f \cdot \sigma_n, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения, изменяющийся в пределах от 0,1 до 0,5.

При условии рассмотрения формирования сил трения по закону Зибеля напряжение трения τ пропорционально среднему по области пластической деформации сопротивлению деформации сдвига σ_τ и не зависит от приложенного нормального напряжения σ_n , т. е.

$$\tau = \psi \cdot \sigma_\tau, \quad (4)$$

где ψ , в отличие от кулоновского коэффициента трения, называют показателем трения, изменяющимся в пределах от 0,2 до 1.

Составляющие сил трения могут быть найдены:

$$F_{\text{трI}} = S_6 \cdot \tau = \pi \cdot D_{\text{кон}} \cdot L_{\text{рас}} \cdot f \cdot \sigma_{\text{твх}}, \quad (5)$$

$$F_{\text{трII}} = S_m \cdot \tau = \frac{\pi}{4 \cdot \sin \alpha} \cdot (D_{\text{кон}}^2 - D_{\text{вых}}^2) \cdot f \cdot \sigma_{\text{тср}}, \quad (6)$$

$$F_{\text{трIII}} = S_k \cdot \tau = \pi \cdot D_{\text{вых}} \cdot L_{\text{кп}} \cdot f \cdot \sigma_{\text{твых}}, \quad (7)$$

где f – коэффициент (показатель) трения; S_6 , S_m , S_k – площадь боковой поверхности втулки контейнера, матрицы и ее калибрующего пояска; $D_{\text{кон}}$ – диаметр контейнера; $D_{\text{вых}}$ – диаметр проволоки (прутка) на выходе из матрицы; $L_{\text{рас}}$ – длина распрессованной заготовки; $L_{\text{кп}}$ – длина калибрующего пояска матрицы; $\sigma_{\text{твх}}$, $\sigma_{\text{тср}}$, $\sigma_{\text{твых}}$ – сопротивление пластического сдвига заготовки в контейнере, матрице и в калибрующем пояске соответственно.

В работе [14] нами представлена математическая модель прямого прессования припоя из легкоплавких материалов, позволяющая определять энергосиловые режимы прессования проволоки и прутков различного диаметра. Результаты математического моделирования прессования прутков $\varnothing 8,0$ и $15,0$ мм, а также проволоки $\varnothing 2,0$ мм представлены в табл. 1. С помощью разработанной математической модели были проведены аналитические исследования влияния коэффициента трения на усилия в процессе прессования. Результаты исследований приведены на рис. 2–4. Как видно из графиков, приведенных на рис. 2–4, повышение коэффициента трения

Обработка металлов давлением...

существенно влияет на начальное усилие прессования. Площадь контакта заготовки с контейнером в начальный момент прессова-

ния наибольшая, и требуется усилие для преодоления сил трения $F_{трI}$. С уменьшением площади контакта заготовки с контейнером

Таблица 1

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 прутка (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 | ° | 33,5 | 40 | 18,4 |
| Длина калибрующего пояска, $L_{кп}$ | 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 | 51,3 | 71,9 |
| Усилия деформации, $F_{деф}$ | Н | 31 647 | 46 848 | 65 784 |
| Сила трения, $F_{тр}$ | Н | 61 171 | 59 168 | 39 384 |
| в контейнере $F_{трI}$ | Н | 57 432 | 55 637 | 36 297 |
| в матрице $F_{трII}$ | Н | 2621 | 2935 | 2938 |
| в калибр. пояске $F_{трIII}$ | Н | 1119 | 597 | 149 |

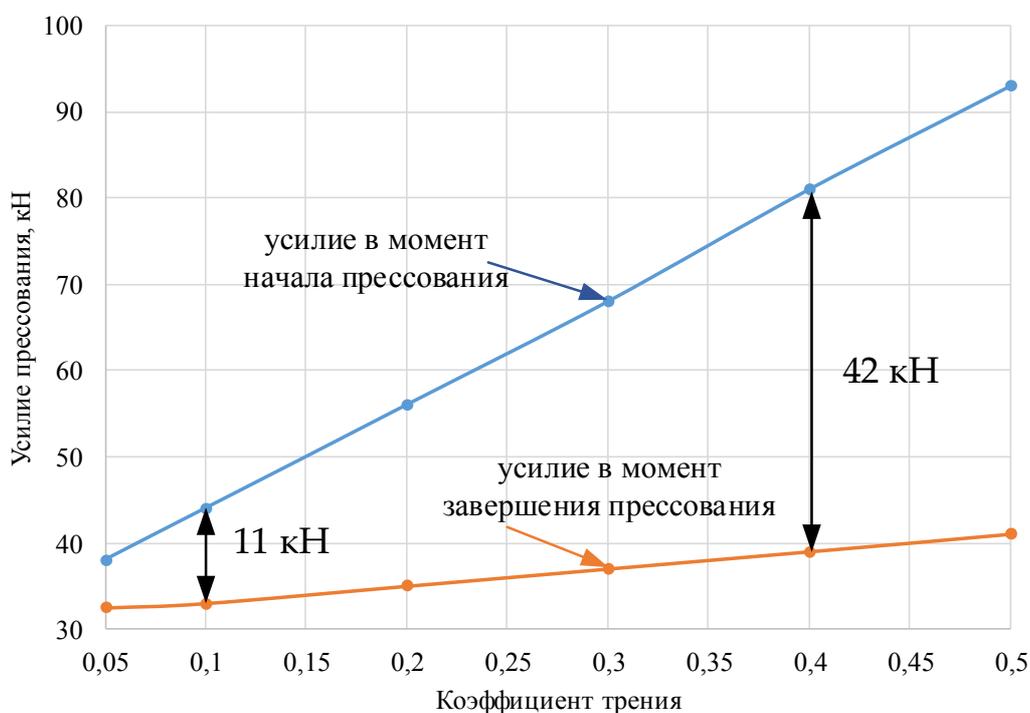


Рис. 2. Изменение усилия прессования проволоки $\varnothing 15,0$ мм в зависимости от коэффициента трения

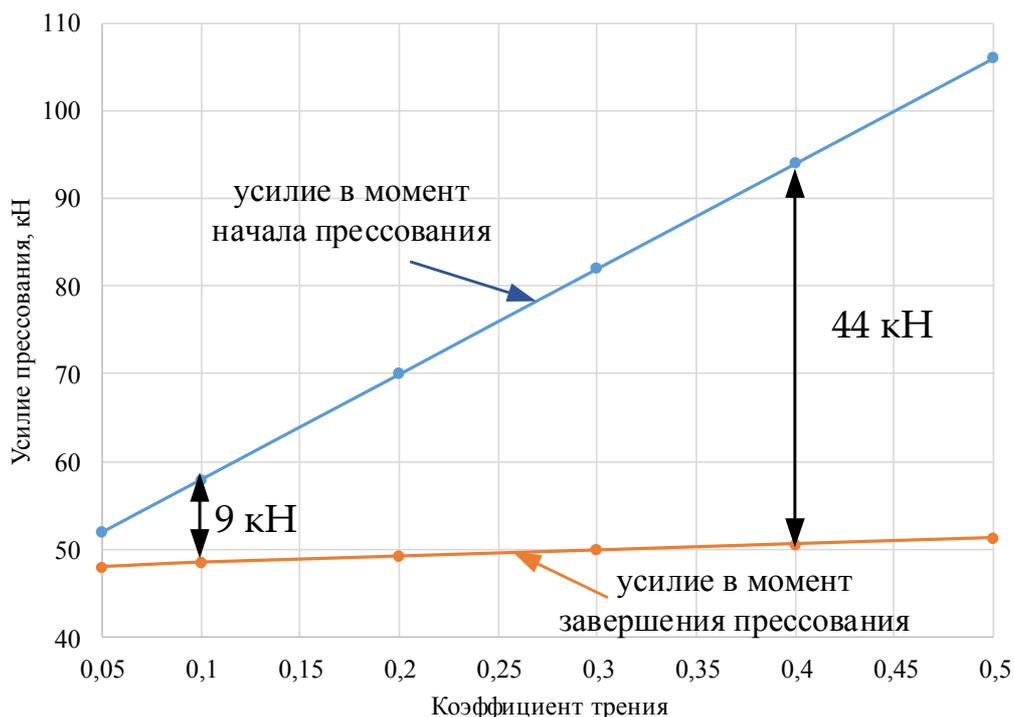


Рис. 3. Изменение усилия прессования проволоки Ø8,0 мм в зависимости от коэффициента трения

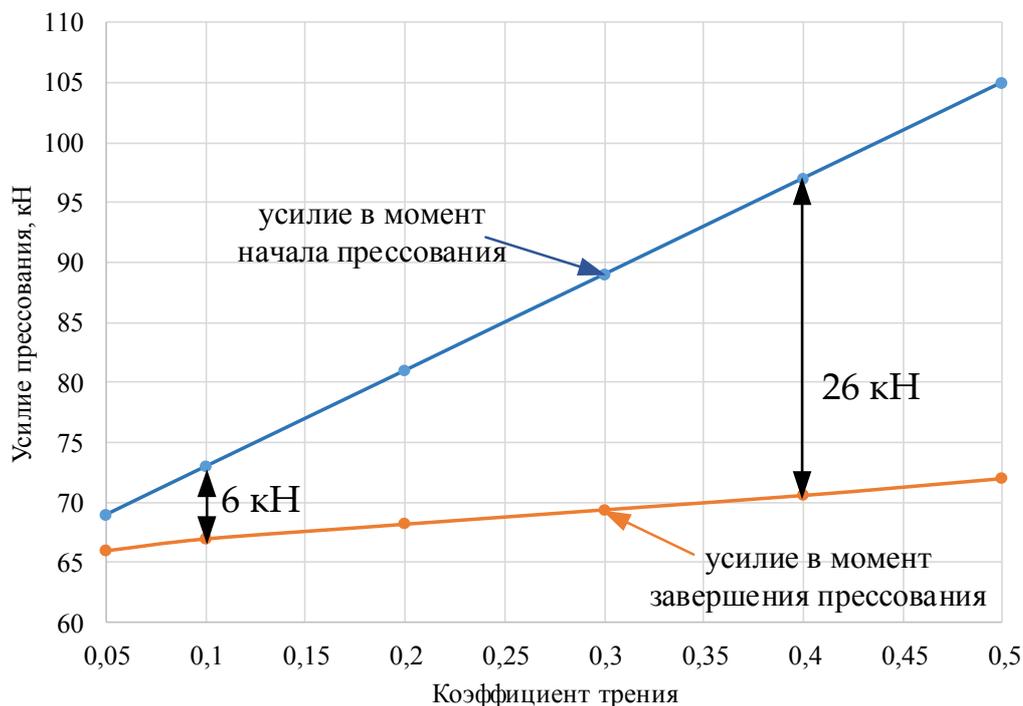


Рис. 4. Изменение усилия прессования проволоки Ø2,0 мм в зависимости от коэффициента трения

составляющая $F_{тр1}$ тоже уменьшается и разница между «усилием в момент начала прессования» и «усилием в момент завершения прессования» сокращается. Снижение значения коэффициента трения позволяет существ-

венно, а именно до 60 %, снизить усилие прессования, которое расходуется на преодоление сил трения и приводит к повышению температуры на контакте заготовки с контейнером.

Обработка металлов давлением...

Для подтверждения результатов аналитических исследований, а также определения коэффициента трения экспериментальным путем были проведены лабораторные исследования процесса прессования при различных условиях трения. Гидравлический пресс Д2428, на котором осуществлялся процесс прессования, оснащен системой измерения усилия прессования и хранения полученных данных [14]. Экспериментальные исследования проводились при прессовании прутков $\varnothing 8,0$ мм из заготовки $\varnothing 30,0$ мм при одинаковой скорости прессования. Результаты замера усилий прессования прутков $\varnothing 8,0$ мм при различных условиях трения представлены на рис. 5–7.

Для определения фактического усилия прессования нужно от полученных значений отнять поправочную величину 15 кН. Связано это с особенностями тарировки гидравлического пресса. При прессовании заготовки $\varnothing 30,0$ мм в пруток $\varnothing 8,0$ мм без смазки усилие в момент начала прессования составляет 105 кН, а в момент завершения прессования – 47 кН. Согласно рис. 3 такие значения усилий прессования, с небольшой погрешностью, соответствуют коэффициенту трения 0,5. Применение смазочных материалов, а именно графитовой (графит – С) и молибденовой (дисульфид молибдена – MoS_2) смазки, которые используются при холодном волочении [18],

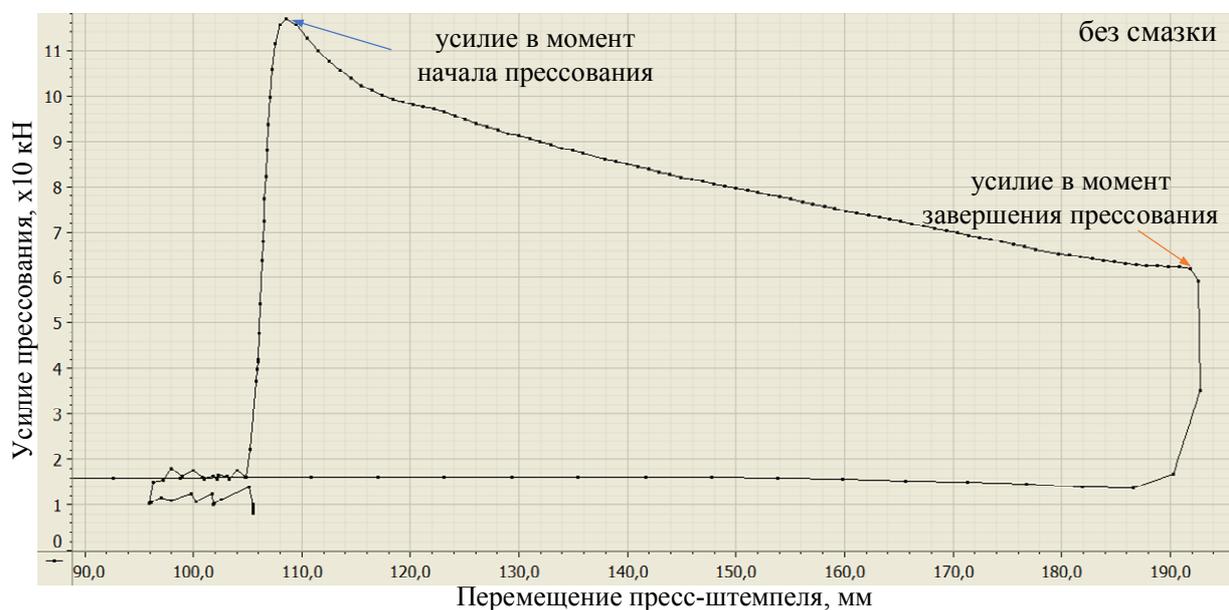


Рис. 5. Усилие в процессе прессования прутка $\varnothing 8,0$ мм без применения смазки

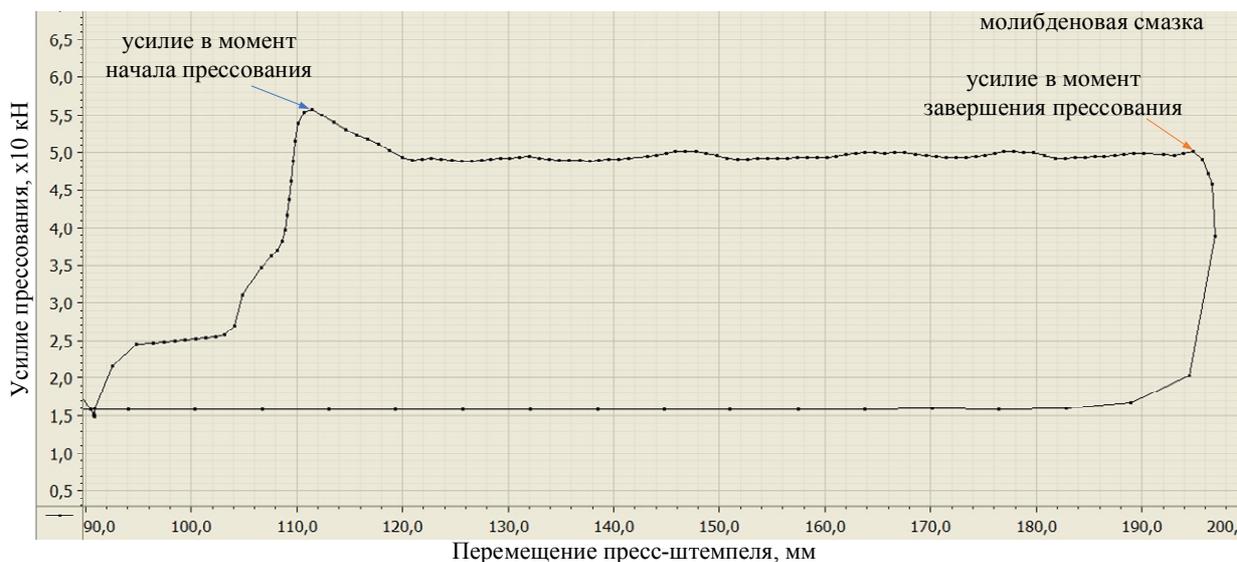


Рис. 6. Усилие в процессе прессования прутка $\varnothing 8,0$ мм с применением молибденовой смазки

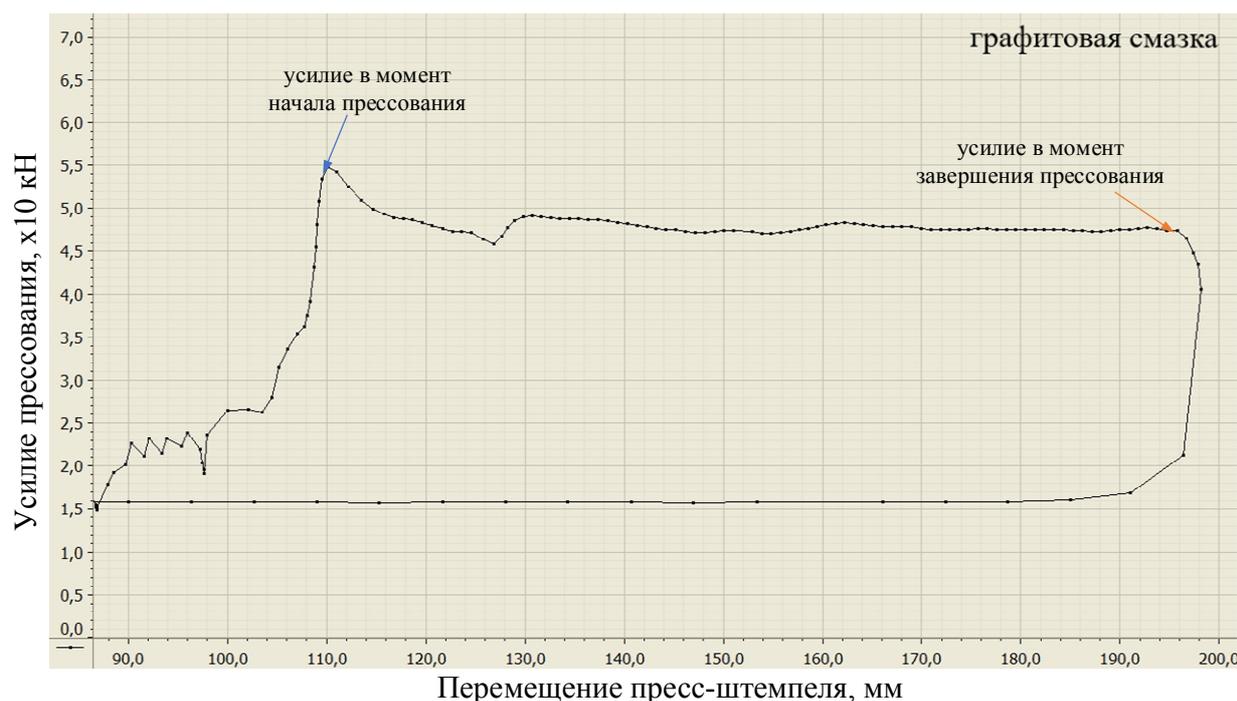


Рис. 7. Усилие в процессе прессования прутка $\varnothing 8,0$ мм с применением графитовой смазки

привело к существенному падению усилия прессования в начальный момент и изменению значительной части графика с наклонного на горизонтальный на стадии установившегося течения (см. рис. 6 и 7).

Сравнение результатов экспериментального определения усилия прессования прутка $\varnothing 8,0$ мм без применения смазки (см. рис. 5) и результатов математического моделирования (см. рис. 3) позволяет установить, что коэффициент трения соответствует значению 0,5. Усилие прессования в начальный момент при расчете и при экспериментальном определении равно 105 кН, а вот в момент завершения прессования расчетное значение равно 51 кН, а экспериментальное – 47 кН. Расхождение между расчетным и экспериментальными значениями в данном случае составляет 7 %.

Применение смазочных материалов приводит к падению усилия в момент начала прессования с 105 до 40 кН (см. рис. 5–7). Усилие прессования в 40 кН соответствует коэффициенту трения менее 0,05, т. е. коэффициент трения уменьшился более чем в 10 раз (см. рис. 3). При этом стоит отметить, что на стадии установившегося течения усилие прессования ниже на 2–3 кН при применении графитовой смазки по сравнению с молибденовой. Разница между теоретическим усилием в начале прессования и в конце прессования

составляет 4 кН, а при экспериментальных исследованиях – 5 кН.

Наличие пика на кривой зависимости усилия от хода пресс-штемпеля (см. рис. 5–7) объясняется рядом причин: в первую очередь, переходом от контактного трения покоя к трению скольжения, а во-вторую – переходом от упругой к пластической деформации [19–20].

С определенной долей допущения можно говорить о том, что при прессовании припоя ПОИп-52 с использованием стального контейнера без применения смазки коэффициент трения равен 0,5, а при применении графитовой или молибденовой смазки коэффициент трения будет принимать значение 0,05.

Пакет для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением Qform [21], в основе которого лежит метод конечных элементов, позволяет учитывать трение по законам Кулона, Зибеля и Леванова. Используя результаты экспериментальных исследований, путем подбора определили показатели трения.

На рис. 8 приведены результаты компьютерного моделирования в пакете Qform процесса прессования заготовки $\varnothing 30,0$ мм в пруток $\varnothing 8,0$ мм без смазки и с применением смазки в сравнении с результатами экспериментальных исследований.

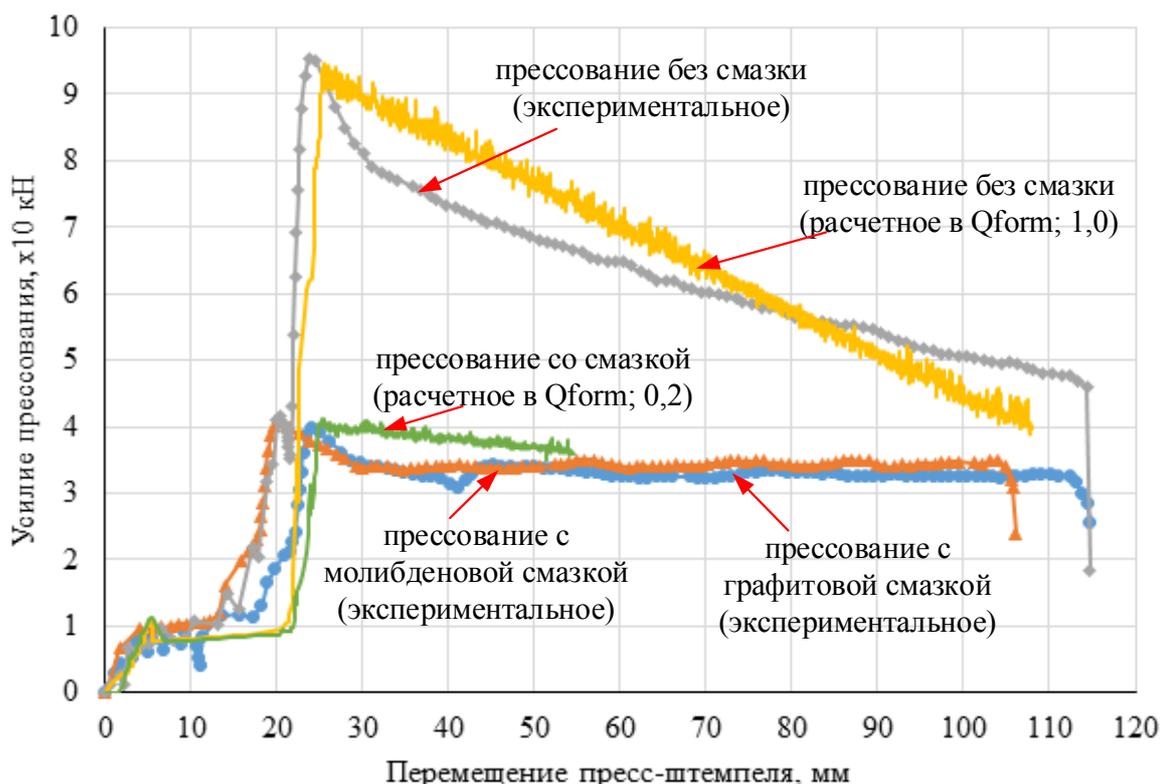


Рис. 8. Сравнение изменения усилия прессования при различных условиях контактного трения, полученного экспериментальным путем и при компьютерном моделировании в Qform

Таблица 2
Показатели (коэффициенты) трения для моделирования прямого прессования припоя ПОИп-52 с использованием стального контейнера

| Условия трения | Кулон | Зибель | Леванов |
|---------------------|-------|--------|---------|
| Без смазки | 0,5 | 1,0 | 1,0 |
| Молибденовая смазка | 0,05 | 0,2 | 0,2 |
| Графитовая смазка | 0,05 | 0,2 | 0,2 |

В табл. 2 приведены показатели трения, рекомендуемые для использования при моделировании процесса прямого прессования припоя ПОИп-52 с использованием стального контейнера.

Коэффициент трения оказывает существенное влияние на температурные условия процесса прессования, следовательно, учет его достоверной величины при компьютерном моделировании позволит существенно повысить точность расчетов.

Заключение

С помощью математического моделирования исследовано влияние коэффициента трения на усилие в процессе прессования прутков $\varnothing 8,0$ и $15,0$ мм, а также проволоки $\varnothing 2,0$ мм. Установлено, что с увеличением коэффициента трения на преодоление силы тре-

ния скольжения на контактной поверхности обрабатываемого металла с контейнером и с матрицей тратится до 60 % усилия, необходимого для прессования исследуемого сплава. В ходе экспериментальных исследований показано, что применение смазочных материалов, а именно графитовой (графит – С) и молибденовой (дисульфид молибдена – MoS_2) смазки, позволяет снизить коэффициент трения более чем в 10 раз. С определенной долей допущения установлено, что при прессовании припоя ПОИп-52 с использованием стального контейнера без применения смазки коэффициент трения равен 0,5, а при применении графитовой или молибденовой смазки коэффициент трения принимает значения, близкие к 0,05. Используя результаты экспериментальных исследований, путем подбора определили показатели трения по законам

Кулона, Зибеля и Леванова, которые могут быть применены для компьютерного моделирования в пакете Qform процесса прямого прессования припоя ПОИн-52 с использованием стального контейнера без применения

смазки и с применением графитовой и молибденовой смазки. Учет достоверной величины показателя трения при компьютерном моделировании позволит существенно повысить точность получаемых результатов.

Литература

1. Петров, А.Н. Теория обработки металлов давлением: штампы, износ и смазочные материалы: учеб. пособие для вузов / А.Н. Петров, П.А. Петров, М.А. Петров. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2020. – 130 с. – (Высшее образование) // ЭБС Юрайт [сайт]. – <https://urait.ru/bcode/446675> (дата обращения: 10.07.2021).

2. Воронцов, А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие: в 2 т. / А.Л. Воронцов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – Т. 2. – 441 с.

3. Каргин, В.Р. Теория обработки металлов давлением: учеб. пособие / В.Р. Каргин. – Самара: СамГУ, 2019. – 112 с. // Лань: электронно-библиотечная система. – <https://e.lanbook.com/book/148619> (дата обращения: 10.07.2021).

4. О возможности снижения мощности, расходуемой на процесс прокатки проволоки на совмещенном прокатно-волочильном стане / А.А. Радионова, Л.В. Радионова, В.А. Харитонов, О.С. Малахов // Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – № 10. – С. 63–70.

5. New technological lubricants for steel wire drawing / L.V. Radionova, V.A. Kharitonov, V.I. Zyuzin, L.D. Rol'shchikov // Steel in Translation. – 2001. – No. 12. – P. 49–50.

6. Радионова, Л.В. Разработка технологии производства высокопрочной проволоки с повышенными пластическими свойствами из углеродистых сталей: дис. ... канд. техн. наук / Л.В. Радионова. – Магнитогорск, 2001. – 137 с.

7. Харитонов, В.А. Проектирование ресурсосберегающих технологий производства высокопрочной углеродистой проволоки на основе моделирования: моногр. / В.А. Харитонов, Л.В. Радионова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 171 с.

8. Неравномерность и локализация пластической деформации в процессах обработки металлов давлением / Г.С. Бурханов, В.С. Юсупов, А.Е. Шелест и др. // Металлы. – 2012. – № 4. – С. 39–46.

9. Чулкин, С.Г. Анализ современных представлений и подходов при оценке износостойкости и долговечности материалов в различных условиях внешнего трения / С.Г. Чулкин // Трение, износ, смазка. – 1999. – Т. 1, № 2. – С. 47–51.

10. Совершенствование геометрии волочильного канала с целью повышения стойкости инструмента и качества полос из нихрома / А.И. Снигирев, Л.М. Железняк, Н.А. Снигирев, В.Л. Дымяков // Производство проката. – 2014. – № 12. – С. 24–28.

11. Добров, И.В. Механика процесса внешнего трения при волочении полосы в монолитной волоке / Добров И.В. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3. № 2. – С. 32–39.

12. 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.

13. Логинов, Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов: учеб. пособие / Ю.Н. Логинов. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 156 с. // Лань: электронно-библиотечная система. – <https://e.lanbook.com/book/99055> (дата обращения: 06.05.2020).

14. 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

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

16. 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 //

Обработка металлов давлением...

Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 54–65. DOI: 10.14529/met210106

17. 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 Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – С. 54–56.*

18. Харитонов, В.А. Ресурсосбережение при производстве проволоки / В.А. Харитонов, В.И. Зюзин, А.К. Белан. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – 194 с.

19. *Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme / A. Korbel, W. Bochniak, P. Ostachowski et al. // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2011. – Vol. 42. – P. 2881–2897. DOI: 10.1007/s11661-011-0688-x*

20. Григорьев, А.А. Расчет технологических параметров экструзии брикетов порошков алюминия / А.А. Григорьев, А.И. Дмитрюк // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 53–61. DOI: 10.18721/JEST.26105*

21. Стебунов, С.А. 25 лет программе моделирования процессов обработки металлов давлением *QForm* / С.А. Стебунов // *КШП. ОМД. – 2016. – № 11. – С. 3–4.*

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@susu.ru, ORCID ID: 0000-0001-6644-1173.

Громов Дмитрий Владимирович, магистрант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gromov111999@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6036-3784.

Ердаков Иван Николаевич, канд. техн. наук, доцент, заместитель директора Политехнического института по направлению материаловедения и технологий, доцент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; erdakovin@susu.ru.

Сиверин Олег Олегович, старший преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; siverinoo@susu.ru.

Поступила в редакцию 14 июня 2021 г.

DOI: 10.14529/met210307

FRICITION COEFFICIENT IN THE PROCESS OF DIRECT EXTRUSION OF WIRE AND BAR SOLDER FROM 52In-48Sn ALLOY

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

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

D.V. Gromov, gromov111999@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6036-3784

I.N. Erdakov, erdakovin@susu.ru, ORCID ID: 0000-0003-2005-4439,

O.O. Siverin, siverinoo@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In any metal forming process, there is external friction at the contact between the tool and the material being processed. Under the influence of friction forces, the deformation force increases, the tool heats up and intensively wears out, the deformation unevenness increases and, as a result,

the microstructure of the metal being processed becomes heterogeneous, tensile stresses arise, which sometimes lead to disruption of the product continuity. This article examines contact friction during the direct extrusion 52In–48Sn alloy bars and wires. Using mathematical modeling, the influence of the friction coefficient on the force during extrusion of bars $\varnothing 8.0$ and 15.0 mm, as well as wire $\varnothing 2.0$ mm, was investigated. It is shown that with an increase in the coefficient of friction to overcome the sliding friction force on the contact surface of the metal with the container and with the matrix, up to 60% of the effort required for extruding the alloy under study is spent. Experimental studies have shown that the use of lubricants, namely graphite (graphite – C) and molybdenum (molybdenum disulfide – MoS₂) lubricants, can reduce the friction coefficient by more than 10 times. With a certain degree of assumption, we can say that when extruding 52In–48Sn alloy solder using a steel container without the use of lubricant, the friction coefficient is 0.5, and when using graphite or molybdenum grease, the friction coefficient will take values close to 0.05. Using the results of experimental studies, by the selection, the friction coefficient was determined according to the laws of Coulomb, Siebel and Levanov, which can be used for computer modeling in the Qform package for direct extrusion 52In–48Sn alloy solder using a steel container without lubrication and using graphite and molybdenum lubricants. Considering the reliable value of the friction coefficient in computer simulation will significantly increase the accuracy of calculations.

Keywords: direct extrusion, friction coefficient, solder, wire, bar, pressing force, friction force.

References

1. Petrov A.N., Petrov P.A., Petrov M.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem: shtampy, iznos i smazochnyye materialy: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Theory of metal pressure processing: stamps, wear and lubricants]. 2nd ed. Moscow, Yurayt Publishing House, 2020. 130 p. Available at: <https://urait.ru/bcode/446675> (accessed 10.07.2021).
2. Vorontsov A.L. *Teoriya i raschety protsessov obrabotki metallov davleniyem: ucheb. posobiye: v 2 t.* [Theory and calculations of metal processing processes by pressure]. Moscow, Publishing house of MSTU, 2014, vol. 2. 441 p.
3. Kargin, V.R. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem: ucheb. posobiye* [Theory of metal pressure processing]. Samara, SamSU Publ., 2019. 112 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/148619> (accessed 10.07.2021).
4. Radionov A.A., Radionova L.V., Kharitonov V.A., Malakhov O.S. [On the possibility of reducing the power spent on the process of wire rolling on a combined rolling-drawing mill]. *Electrical systems and complexes*. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2005, no. 10, pp. 63–70. (in Russ.)
5. Radionova L.V., Kharitonov V.A., Zyuzin V.I., Rol'shchikov L.D. New technological lubricants for steel wire drawing. *Steel in Translation*, 2001, no. 12, pp. 49–50.
6. Radionova L.V. *Razrabotka tekhnologii proizvodstva vysokoprochnoy provoloki s povyshennymi plasticheskimi svoystvami iz uglerodistykh staley: dis. kand. tekhn. nauk* [Development of technology for the production of high-strength wire with increased plastic properties from carbon steels. Cand. sci. diss.]. Magnitogorsk, 2001. 137 p.
7. Kharitonov V.A., Radionova L.V. *Proyektirovaniye resursosberegayushchikh tekhnologiy proizvodstva vysokoprochnoy uglerodistoy provoloki na osnove modelirovaniya: monogr.* [Designing resource-saving technologies for the production of high-strength carbon wire based on modeling. Monograph]. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2008. 171 p.
8. Burkhanov G.S., Yusupov V.S., Shelest A.E., Sheftel E.N., Lazarenko G.Yu. [Irregularity and localization of plastic deformation in metal forming processes]. *Metally*, 2012, no. 4, pp. 39–46. (in Russ.)
9. Chulkin S.G. [Analysis of modern concepts and approaches in assessing wear resistance and durability of materials under various conditions of external friction]. *Friction, wear, lubrication*, 1999, vol. 1, no. 2, pp. 47–51. (in Russ.)
10. Snigirev A.I., Zheleznyak L.M., Snigirev N.A., Dymshakov V.L. [Improvement of the geometry of the drawing channel in order to increase the tool life and the quality of strips from nichrome]. *Proizvodstvo prokata*, 2014, no. 12, pp. 24–28. (in Russ.)
11. Dobrov I.V. [Mechanics of the process of external friction when drawing a strip in a monolithic die]. *Mechanical engineering: network electronic scientific journal*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 32–39. (in Russ.)

12. Kargin V.R., Kargin V.R., Grechnikova A.F., Erisov Ya.A., Starostin Yu.S. *Teoriya i tekhnologiya pressovaniya alyuminiyevykh splavov: ucheb. posobiye* [Theory and technology of pressing aluminum alloys]. Samara, SSAU Publ., 2015. 80 p.

13. Loginov, Yu. N. *Pressovaniye kak metod intensivnoy deformatsii metallov i splavov: ucheb. posobiye* [Pressing as a method of intensive deformation of metals and alloys]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2016. 156 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/99055> (accessed 06.05.2020).

14. 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: 10.14529/met200207

15. 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

16. 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

17. Glebov L.A., Radionova L.V., Faizov S.S. [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, MSTU Publ., 2019, pp. 54–56. (in Russ.)

18. Kharitonov V.A., Zyuzin V.I., Belan A.K. *Resursosberezheniye pri proizvodstve provoloki* [Resource saving in wire production]. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2003. 194 p.

19. Korbel A., Bochniak W., Ostachowski P. et al. Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme. *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 2011, vol. 42, pp. 2881–2897. DOI: 10.1007/s11661-011-0688-x

20. Grigoriev A.A., Dmitriuk A.I. [Calculation of technological parameters of extrusion of aluminum powder briquettes]. *Scientific and technical statements of SPbPU. Natural and engineering sciences*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 53–61. (in Russ.) DOI: 10.18721/JEST.26105

21. Stebunov S.A. [25 years of the QForm program for modeling the processes of metal pressure processing]. *KShP. OMD*, 2016, no. 11, pp. 3–4. (in Russ.)

Received 14 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Определение показателя трения в процессе прямого прессования проволочного и пруткового припоя ПОИн-52 / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, Д.В. Громов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 56–66. DOI: 10.14529/met210307

FOR CITATION

Radionova L.V., Faizov S.R., Gromov D.V., Erdakov I.N., Siverin O.O. Friction Coefficient in the Process of Direct Extrusion of Wire and Bar Solder from 52In–48Sn Alloy. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 56–66. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210307