

УДК 681.5.004

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.007

## Моделирование теплообмена при непрерывном прессовании

Солопко Ирина Владимировна, Любанова Анна Шоломовна, Капулин Денис

Владимирович

Сибирский федеральный университет,

Россия, Красноярск, *isolopko@sfu-kras.ru*

**Аннотация.** В работе предложена уточненная модель теплообмена при непрерывном прессовании способом Конформ с учетом технологических и энергосиловых параметров, и влияния теплообмена в инструменте, что позволяет использовать точное описание геометрии очага деформации, провести математическое и компьютерное моделирование распределения температуры металла. С применением информационных технологий проведены численные эксперименты, подтверждающие соответствие температурного поля распределению скоростей течения металла.

**Ключевые слова:** теплообмен, непрерывное прессование, Конформ, моделирование

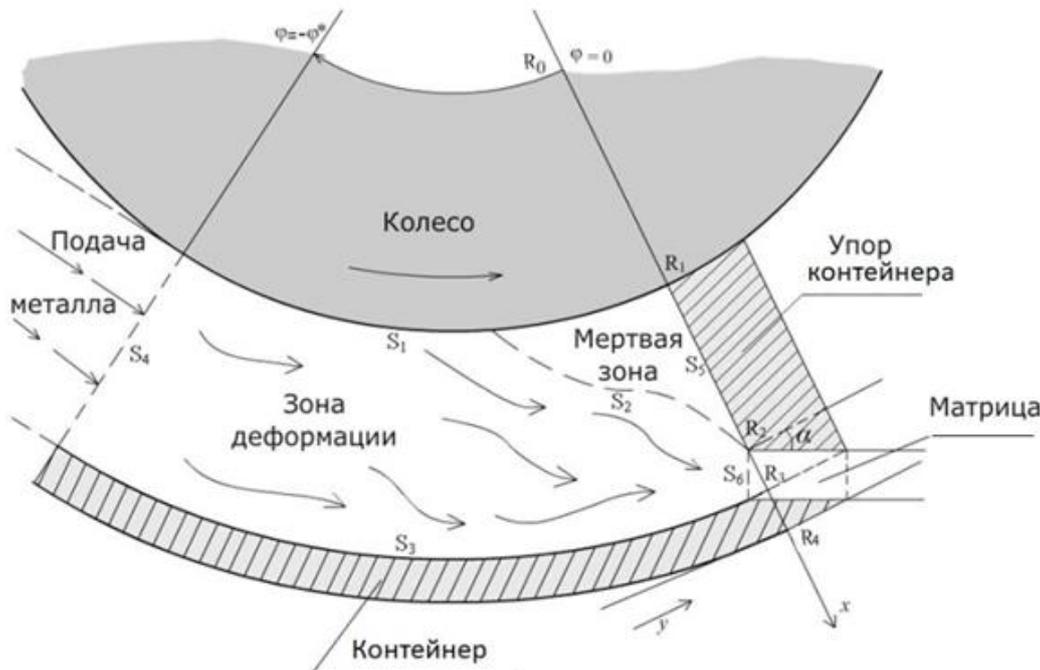
**Цитирование:** Солопко И.В. Моделирование теплообмена при непрерывном прессовании / И.В. Солопко, А.Ш. Любанова, Д.В. Капулин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 65-72. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.007.

**Введение.** В металлургической промышленности техника и технология производства пресс-изделий из цветных металлов и сплавов совершенствуется в направлении создания непрерывных процессов. Непрерывное прессование позволяет снизить затраты на трудовые ресурсы, уменьшить отходы материала и оптимизировать производственные процессы. Наибольшее предпочтение отдается совмещенным непрерывным процессам, которые позволяют повысить качество продукции, улучшить ее характеристики, увеличить производительность и снизить затраты на производство. Непрерывность процессов обеспечивает стабильность свойств изделий и возможность полной автоматизации технологического процесса от передачи расплава в кристаллизатор до упаковки готовой продукции. Такие процессы широко используются для создания различных изделий из металлических сплавов. В целом, метод прессования Конформ является гибким и эффективным решением для массового производства высококачественных изделий из различных металлов, обеспечивает высокую производительность и эффективность производства, благодаря непрерывности процесса, точность формирования и качество получаемой продукции. Благодаря ряду достоинств, широкое промышленное внедрение получили процессы непрерывного прессования, в которых сила трения между заготовкой и контейнером используется как рабочее усилие прессования.

При непрерывном прессовании способом Конформ металл подаётся в контейнер, состоящий из подвижной и неподвижной частей, деформируется и выдавливается в матрицу. В целом непрерывность прессования зависит от конструктивных и энергосиловых параметров устройства, напряженно-деформированного состояния металла с инструментом и температурно-скоростных режимов технологического процесса [1-4]. Пластическая деформация всегда сопровождается выделением тепла, поэтому отслеживание градиента температуры и скорости течения металла на входе в контейнер и выходе из матрицы способствует равномерности свойств и удовлетворительному качеству поверхности пресс-изделия [5]. В работе [6] рассматривалась математическая модель для расчета температуры в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом Конформ.

В настоящей работе, в отличие от [6], предложена уточненная модель теплообмена в полярных координатах с учетом технологических и энергосиловых параметров, и влияния теплообмена в инструменте, что позволяет использовать точное описание геометрии очага деформации, провести математическое и компьютерное моделирование распределения температуры металла при непрерывном прессовании способом Конформ [7, 8].

**1. Постановка задачи.** Целесообразность перехода к полярным координатам  $x = r \times \cos(\varphi)$ ,  $y = r \times \sin(\varphi)$  объясняется тем, что геометрическая форма очага деформации при непрерывном прессовании способом Конформ представляет собой сектор кольца (рис.1).



**Рис. 1.** Геометрическая модель очага деформации

Комментарии к рис. 1.  $S_1$  – внутренняя поверхность колеса,  $S_2$  – линия скольжения вдоль мертвой зоны,  $S_3$  – внутренняя поверхность кольцевой вставки, образующей контейнер,  $S_4$  – внутренняя поверхность входного сечения контейнера,  $S_5$  – внутренняя поверхность упора колеса,  $S_6$  – отверстие в матрице.

Уравнение теплообмена в полярных координатах имеет вид:

$$c\rho \left( \frac{\partial \theta}{\partial r} v_r + \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} v_\varphi \right) = \chi \left( \frac{\partial \theta}{\partial r} \frac{1}{r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} \frac{1}{r^2} \right) + \left( 2\mu + \frac{\tau_s}{|\tilde{D}|} \right) |\tilde{D}|^2, \quad (1)$$

где  $\theta$  – температура металла,  $c$  – коэффициент теплоемкости металла,  $\rho$  – плотность металла,  $\tau_s$  – предел текучести,  $\mu$  – вязкость металла,  $\chi$  – коэффициент теплопроводности металла,  $v = (v_r, v_\varphi)$  – скорость течения металла,  $|\tilde{D}|$  – модуль тензора скорости деформации, вычисляемый по формуле:

$$|\tilde{D}| = \left( \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \frac{(r^2 + 1)}{4r^2} \left( \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - v_\varphi + r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_r \right)^2 \right)^{1/2}$$

К уравнению (1) необходимо добавить краевые условия:

$$\begin{aligned} -\chi \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{S_1} &= k(\theta - T) \Big|_{S_1}, & \chi \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{S_3} &= k(\theta - T) \Big|_{S_3}, & \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \Big|_{S_4} &= 0, \\ \chi \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \Big|_{S_5} &= k(\theta - T) \Big|_{S_5}, & -\frac{\partial \theta}{\partial r} \frac{\varphi_B}{\sqrt{(R_3 - R_2)^2 + \varphi_B^2}} + \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \frac{R_3 - R_2}{\sqrt{(R_3 - R_2)^2 + \varphi_B^2}} \Big|_{S_6} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент теплообмена между металлом и инструментом,  $T$  – температура инструмента,  $\varphi_B = (R_1 - R_2) \operatorname{ctg} \alpha$ .

Необходимый температурный режим в очаге деформации поддерживается системой охлаждения устройства путем отъема тепла, образующегося за счет работы сил пластической деформации. Основной поток тепла через стенку контейнера и колесо направлен по радиальной составляющей  $r$ , поэтому теплопереносом вдоль тангенциальной составляющей  $\varphi$  можно пренебречь и считать, что распределение температуры в колесе и контейнере зависит только от  $r$ . Теплообмен в упоре контейнера удобнее моделировать в декартовых координатах. Аналогично можно считать, что распределение температуры в упоре контейнера зависит только от  $y$ .

**2. Математическая модель.** Теплообмен инструмента с системой охлаждения в полярных координатах при непрерывном прессовании моделируется следующим образом. Распределение температуры в контейнере  $T_1$  и колесе  $T_2$  описывается уравнением:

$$\frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} \right) = 0, \quad i = 1, 2.$$

Краевые условия для  $T_1$  задаются на поверхности контакта контейнера с хладагентом:

$$T_1|_{r=R_4} = C_1, \quad \frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_4} = \alpha_1 (C_1 - T_{охл}).$$

Решая эту задачу, получаем, что:

$$T_1(r) = \frac{\alpha_2 c_1 \rho_1 (C_1 - T_{охл}) R_4}{\chi_1} \ln \frac{R_4}{r} + C_1.$$

Краевые условия для  $T_2$  задаются на поверхности контакта колеса с хладагентом:

$$T_2|_{r=R_0} = C_2, \quad - \frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \alpha_1 (C_2 - T_{охл}).$$

Решение задачи теплообмена с этими краевыми условиями имеет вид:

$$T_2(r) = \frac{\alpha_1 c_1 \rho_1 (C_2 - T_{охл}) R_0}{\chi_1} \ln \frac{r}{R_0} + C_2.$$

Распределение температуры  $T_3$  в упоре контейнера является решением задачи для уравнения:

$$\frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} = 0$$

с краевыми условиями:

$$T_3|_{y=y_1} = C_3, \quad \frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=y_1} = \alpha_1 (C_3 - T_{охл})$$

и описывается формулой:

$$T_3(y) = \frac{\alpha_1 c_1 \rho_1 (C_3 - T_{охл})}{\chi_1} (y_1 - y) + C_3.$$

Здесь  $c_1$  – коэффициент теплоемкости материала, из которого сделан инструмент;  $\alpha_1$  – коэффициент теплообмена между хладагентом и инструментом;  $\rho_1$  – плотность материала, из которого сделан инструмент;  $\chi_1$  – коэффициент теплопроводности материала, из которого сделан инструмент;  $C_1, C_2, C_3$  – температура поверхности инструмента со стороны системы охлаждения;  $T_{охл}$  – температура хладагента;  $R_4$  – величина, равная сумме радиуса колеса,

высоты башмака и толщины башмака;  $R_0$  – величина, равная разности радиуса колеса и расстояния до системы охлаждения в колесе;  $U_1$  – ширина упора кольцевой вставки (контейнера).

**3. Численная реализация.** При решении задачи (1), (2) использовалась неравномерная сетка, состоящая из четырёх частей, что вызвано геометрическими особенностями области. Для численного решения задачи применялся метод конечных элементов. Выбор метода обусловлен тем, что градиент скорости течения металла может быть разрывен на некоторых линиях скольжения.

Температура определялась в виде линейной комбинации базисных функций  $N_{ij}(\varphi, r)$  с неизвестными коэффициентами  $\theta_{ij}$ , фактически равными значениям температуры в узле сетки с индексами  $i$  и  $j$ .

$$\theta(\varphi, r) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \theta_{ij} \cdot N_{ij}(\varphi, r), \quad (3)$$

Компоненты скорости так же представляются в виде линейных комбинаций базисных функций с известными коэффициентами  $a_{ij}$  и  $b_{ij}$  [9, 10].

$$v_\varphi = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} \cdot N_{ij}(\varphi, r), \quad v_r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot N_{ij}(\varphi, r), \quad (4)$$

где  $\theta_{ij}, a_{ij}, b_{ij}$  – узловые значения  $\theta, v_\varphi, v_r$  соответственно, а  $N_{ij}(\varphi, r)$  – базисные функции.

В качестве базисных функций были выбраны линейные прямоугольные функции формы, которые строились на восьми узлах соседних по отношению к текущему узлу  $ij$ . График такой функции внутри прямоугольника представляет собой пирамиду. Вне прямоугольника  $N_{ij}(\varphi, r) = 0$ . Задача сводится к нахождению значений  $\theta_{i,j}$  в узлах сетки из системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} d_{i-1,j} \theta_{i-1,j} + d_{i+1,j} \theta_{i+1,j} + d_{i,j} \theta_{i,j} + d_{i,j-1} \theta_{i,j-1} + d_{i,j+1} \theta_{i,j+1} = E_{i,j}, \\ i = 1, \dots, 2N - 1, j = 1, \dots, 2N - 1, i + j < 3N; \\ c_{1,j} \theta_{1,j} + c_{0,j} \theta_{0,j} = 0, \quad j = 0, \dots, 2N; \\ c_{2N,j} \theta_{2N,j} + c_{2N-1,j} \theta_{2N-1,j} = H_{2N,j}, \quad j = 1, \dots, N - 1; \\ c_{i,1} \theta_{i,1} + c_{i,0} \theta_{i,0} = H_{i,0}, \quad i = 1, \dots, 2N; \\ c_{i,2N} \theta_{i,2N} + c_{i,2N-1} \theta_{i,2N-1} = H_{i,2N}, \quad i = 1, \dots, N; \\ c_{3N-i-1,i} \theta_{3N-i-1,i} + c_{3N-i,i} \theta_{3N-i,i} + c_{3N-i,i-1} \theta_{3N-i,i-1} = 0, \quad i = N + 1, \dots, 2N; \end{cases} \quad (5)$$

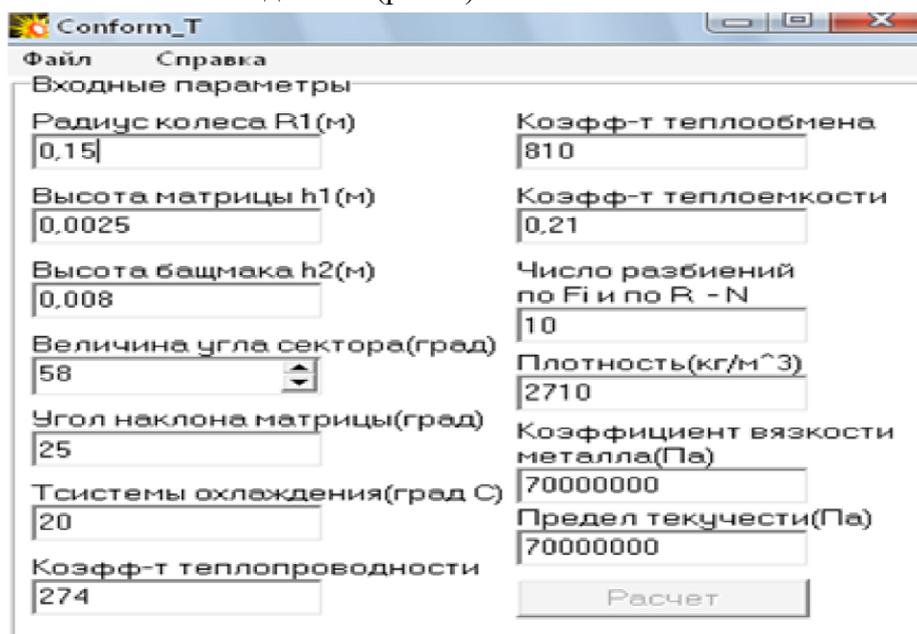
где  $E_{i,j}$  зависит от компонент скорости течения металла  $a_{ij}$  и  $b_{ij}$ . Система включает в себя уравнения, полученные после подстановки выражений (3), (4) для температуры и компонент скорости в уравнение теплообмена (1) и краевые условия (2). Система уравнений (5) решалась методом прогонки.

**4. Информационные технологии.** Для компьютерного моделирования распределения температуры в очаге деформации было создано программное приложение Conform\_T [11], созданное на языке C++ в среде программирования Borland C++ Builder. Данная среда программирования является мощным средством для быстрой и качественной разработки программ. Имеющаяся библиотека визуальных компонентов позволяет создать интерфейс за считанные минуты, а компонентный принцип позволяет создавать полноценные Windows приложения, написав минимальное количество строк кода.

Программа Conform\_T включает в себя три основных модуля:

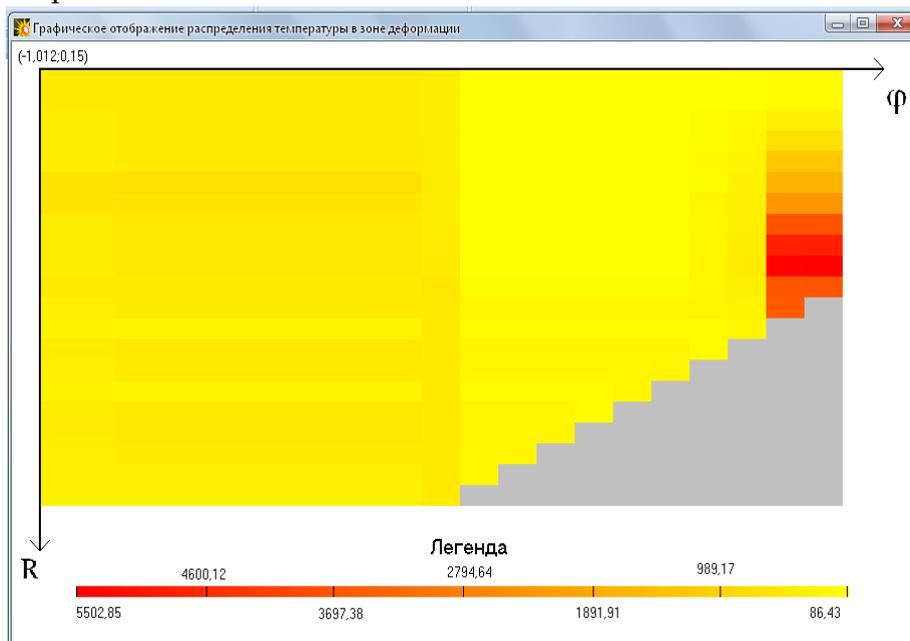
- главный модуль, содержащий интерфейс программы, процедуры ввода исходных данных, расчета температуры в очаге деформации и сохранения полученных результатов в текстовый файл;
- модуль отображения результатов вычислений, включающий графическое изображение распределения температуры в зоне деформации и вывод значений температуры в узлах сетки;
- модуль справки.

В ходе работы был проведён ряд численных экспериментов для алюминиевого сплава при реальных технологических данных (рис. 2).



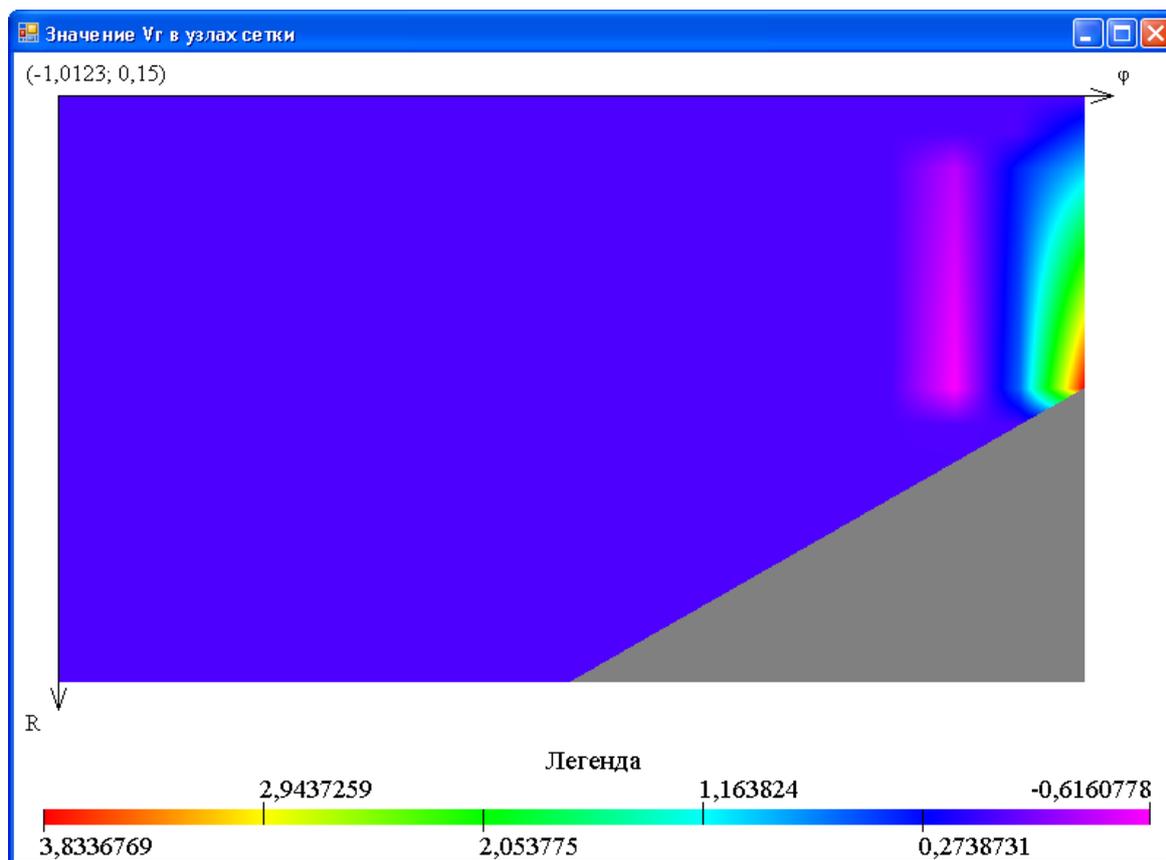
**Рис. 2.** Исходные конструктивные и реологические параметры

Распределение температурных параметров в очаге деформации, рассчитанных на сетке  $21 \times 21$  при одинаковом расположении матрицы под углом  $\alpha = 25^\circ$  и воздушном охлаждении, представлено на рис. 3.



**Рис. 3.** Распределение температуры

Распределение скорости было рассчитано ранее в работе [9,10] (рис. 4).



**Рис. 4.** Распределение радиальной составляющей скорости

**Заключение.** Таким образом, из результатов расчета температуры видно, что распределение зон самой высокой и самой низкой температуры соответствует распределению скорости течения металла, что свидетельствует об адекватности полученного распределения температуры в очаге деформации реальному процессу.

В дальнейшем разработанная модель будет применяться для построения системы автоматизация управления процессом непрерывного прессования методом Конформ.

#### Список источников

1. Довженко Н.Н. Моделирование процесса непрерывного прессования методом Конформ в инженерном программном комплексе DEFORM 3D / Н.Н. Довженко, И.Ю. Губанов, И.В. Солопко // Труды Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2011», 2011. – С. 81-86.
2. Горохов Ю.В. Программное обеспечение расчета технологических параметров непрерывного прессования методом Конформ / Ю.В. Горохов, Ю.В. Губанов, И.В. Солопко // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии. III Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 30-летию кафедры «Информационные технологии в металлургии», под редакцией С.П. Мочалова, В.П. Цымбала. 2011. – С. 151-156.
3. Горохов Ю.В. Особенности пластического течения материала заготовки в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом «Конформ» / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Суслов, М.А. Крылов // Цветные металлы, 2010. – №12. – С. 69-71.
4. Горохов Ю.В. Снижение энергозатрат при непрерывном прессовании металла способом Конформ путем оптимизации формы размеров инструмента / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, 2010. – № 1 (29). – С. 52-55.
5. Горохов Ю.В. Расчет параметров деформационной зоны при непрерывном прессовании / Ю.В. Горохов, Н.Н. Загиров, И.Ю. Губанов // Металлы, 2004. – № 4. – С. 113-116.
6. Горохов Ю.В. Расчет температурных полей деформационной зоны при непрерывном прессовании металлов методом Конформ / Ю.В. Горохов, В.В. Осипов, И.В. Солопко, В.П. Катрюк // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2012. – №1 (37). – С. 31-34.
7. Солопко И.В. Моделирование теплопереноса при непрерывном прессовании / Солопко И.В., Любанова А.Ш. // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и

инновации в науке и производстве». Редколлегия: Т.Н. Гвоздкова (отв. редактор), С.О. Макаров и др. Междуреченск, 2023. – С. 453.1-453.3.

8. Любанова А.Ш. Моделирование теплообмена в процессе непрерывного литья-прессования / Любанова А.Ш., Солопко И.В. // Сборник тезисов докладов VII Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения». Институт вычислительного моделирования СО РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Сибирский федеральный университет, 2020. – С. 148-149.
9. Любанова А.Ш. Задача вязкопластической деформации металла / А.Ш. Любанова, Ф.Ю. Непомнящий // Вычислительные технологии, 2008. – Т. 13. – С. 327-332.
10. Любанова А.Ш. Оптимизация равномерности течения металла при непрерывном прессовании способом Conform / А.Ш. Любанова, Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, А.Ю. Зиборов // Металлы, 2010. – № 2. – С. 28-33.
11. Солопко И.В. Conform\_T / И.В. Солопко, А.Ш. Любанова // Свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ №2023613159 от 13.02.2023. Заявка № 2023611292 от 20.01.2023.

**Солопко Ирина Владимировна.** Старший преподаватель кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет, *iSolopko@sfu-kras.ru*, 660074, Россия, Красноярск, ул. ак. Киренского, 26к1, 3-18.

**Любанова Анна Шоломовна.** канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет, *ALyubanova@sfu-kras.ru*, 660074, Россия, Красноярск, ул. ак. Киренского, 26к1, 3-18.

**Капулин Денис Владимирович.** канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент базовой кафедры информационных технологий в радиоэлектронном производстве, Сибирский федеральный университет, *dKapulin@sfu-kras.ru*, 660074, Россия, Красноярск, ул. ак. Киренского, 26к1, 3-18.

UDC 681.5.004

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.007

## Modeling of heat transfer under continuous extrusion

**Irina V. Solopko, Anna Sh. Lubanova, Denis V. Kapulin**

Siberian federal university,

Russia, Krasnoyarsk, *iSolopko@sfu-kras.ru*

**Abstract.** The paper proposes a refined model of heat transfer during continuous extrusion by the Conform method, taking into account technological and energy-power parameters, and the influence of heat transfer in the tool, which allows using an accurate description of the geometry of the deformation zone, and conducting mathematical and computer modeling of the metal temperature distribution. Numerical experiments have been carried out confirming the correspondence of the temperature field to the distribution of metal flow velocities.

**Keywords:** heat transfer, continuous extrusion, Conform, modeling

### References

1. Dovzhenko N.N., Gubanov I.Yu., Solopko I.V. Modelirovaniye protsessa nepreryvnogo pressovaniya metodom Konform v inzhenernom programmnom komplekse DEFORM 3D [Modeling of the continuous pressing process by the Conform method in an engineering software package DEFORM 3D]. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Inzhenernyye sistemy – 2011" [Proceedings of the International scientific and practical conference "Engineering systems – 2011"], 2011, pp. 81-86.
2. Gorokhov Yu.V., Gubanov I.Yu., Solopko I.V. Programmnoye obespecheniye rascheta tekhnologicheskikh parametrov nepreryvnogo pressovaniya metodom Konform [Software for calculating the technological parameters of continuous pressing by the method Conform]. Modelirovaniye, programmnoye obespecheniye i naukoymkiye tekhnologii v metallurgii. III Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 30-letiyu kafedry "Informatsionnyye tekhnologii v metallurgii", pod redaktsiyey S. P. Mochalova, V. P. Tsymbala. [Modeling, software and high-tech technologies in metallurgy/ III All-Russian scientific and practical conference dedicated to

- the 30<sup>th</sup> anniversary of the department of information technology in metallurgy, edit by S.P. Mochalova, V.P. Tsybala], 2011, pp. 151-156
3. Gorokhov Yu.V., Solopko I.V., Suslov V.P., Krylov M.A. Osobennosti plasticheskogo techeniya materiala zagotovki v deformatsionnoy zone pri nepreryvnom pressovanii sposobom "Konform" [Features of the plastic flow of billet materials in the deformation zone during continuous pressing by the "Conform" method]. Tsvetnyye metally [Non-ferrous metals], 2010, no. 12, pp. 69-71.
  4. Gorokhov Yu.V., Solopko I.V. Snizheniye energozatrat pri nepreryvnom pressovanii metalla sposobom Konform putem optimizatsii formy razmerov instrumenta [Reduction of energy consumption during continuous pressing of metal with a special Conform by optimizing the shape and dimensions of the tool]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova [Bulletin of Magnitogorsk state university named after G.I. Nosova], 2010, no. 1 (29), pp. 52-55.
  5. Gorokhov, Yu.V., Zagirov N.N., Gubanov I.Yu. Raschet parametrov deformatsionnoy zony pri nepreryvnom pressovanii [Calculation of the parameters of the deformation zone during continuous pressing]. Metally [Metals], 2004, no. 4, pp. 113-116.
  6. Gorokhov Yu.V., Osipov V.V., Solopko I.V., Katryuk V.P. Raschet temperaturnykh poley deformatsionnoy zony pri nepreryvnom pressovanii metallov metodom Konform [Calculation of the temperature fields of the deformation zone during continuous pressing of metals by the Conform method]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Bulletin of the Magnitogorsk state technical university. G.I. Nosova], 2012, no. 1 (37), pp. 31-34.
  7. Solopko I.V., Lyubanova A.Sh. Modelirovaniye teploperenosa pri nepreryvnom pressovanii [Modeling of heat transfer during continuous pressing]. Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennyye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve" [Materials XII of the international scientific and practical conference "Current trends and innovations in science and production"], Mezhdurechensk, 2023, pp. 453.1- 453,3.
  8. Lyubanova A.Sh., Solopko I.V. Modelirovaniye teploobmena v protsesse nepreryvnogo lit'ya-pressovaniya [Modeling of heat transfer in the process of continuous casting-pressing]. Sbornik tezisov dokladov VII Vserossiyskoy konferentsii s uchastiyem zarubezhnykh uchenykh "Zadachi so svobodnymi granitsami: teoriya, eksperiment i prilozheniya". Institut vychislitel'nogo modelirovaniya SO RAN, Institut gidrodinamiki im. M.A. Lavrent'yeva, Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, Sibirskiy federal'nyy universitet [Collection of abstracts of the VII All-Russian conference with the participation of foreign scientists "Problems with free boundaries: theory, experiment and applications". Institute of computational modeling SB RAS, M.A. Lavrentiev Institute of hydrodynamics SB RAS, S.S. Kutateladze Institute of thermophysics SB RAS, Siberian federal university], 2020, pp. 148-149.
  9. Lyubanova A.Sh., Nepomnyashchy F.Yu. Zadacha vyazkoplasticheskoy deformatsii metalla [Problem of viscoplastic deformation of metal]. Vychislitel'nyye tekhnologii [Computing technologies], 2008, vol. 13, pp. 327-332.
  10. Lyubanova A.Sh., Gorokhov Yu.V., Solopko I.V., Ziborov A.Yu. Optimizatsiya ravnomernosti techeniya metalla pri nepreryvnom pressovanii sposobom Conform [Optimization of the uniformity of metal flow during continuous pressing by the Conform method]. Metally [Metals], 2010, no. 2, pp. 28-33.
  11. Solopko I.V., Lyubanova A.Sh. Conform\_T. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii v Reyestre programm dlya EVM №2023613159 ot 13.02.2023 [Certificate of state registration in the register of computer programs No. 2023613159 dated 02/13/2023]. Application No. 2023611292 dated 01/20/2023.

**Solopko Irina Vladimirovna.** Assistant professor of the Department of automation systems, automated control and design, Siberian federal university, iSolopko@sfu-kras.ru, 660074, Russia, Krasnoyarsk, academics Kirensky, 26 k1, 3-18.

**Lubanov Anna Sholomovna.** Docent, candidate of physical and mathematical science, associate professor, associate professor of the Department of automation systems, automated control and design, Siberian federal university, ALyubanova@sfu-kras.ru, 660074, Russia, Krasnoyarsk, academics Kirensky, 26 k1, 3-18.

**Kapulin Denis Vladimirovich.** Candidate of technical science, associate professor, associate professor of the Basic department of information technologies in radioelectronic production, Siberian federal university, dKapulin@sfu-kras.ru, 660074, Russia, Krasnoyarsk, academics Kirensky, 26 k1, 3-07.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 02/12/2024; approved after reviewing 12/12/2024; accepted for publication 12/17/2024.