

УДК 621.777

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-67-78>

Научная статья

Research article



Применение моделирования при проектировании инструмента для прессования полых профилей из алюминиевых сплавов

С.Б. Сидельников, С.С. Колосков, Н.Н. Довженко, Ю.А. Горбунов, Д.С. Ворошилов

Сибирский федеральный университет

660025, Россия, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 95

✉ Денис Сергеевич Ворошилов (sibdrug@mail.ru)

Аннотация: Для моделирования процесса прессования полых профилей из алюминиевых сплавов использованы разработанные ранее алгоритмы проектирования прессового инструмента и программный комплекс «QForm». Целью проведенных исследований являлось повышение качества и снижение сроков проектирования прессового инструмента для промышленных условий производства профилей из алюминиевых сплавов. Предложены новая методика проектирования комбинированного инструмента и технологии для полунепрерывного прессования со сваркой полых профилей из алюминиевых сплавов с помощью программного комплекса «QForm», который позволяет в диалоговом режиме оперативно проводить многовариантные расчеты с последующей, если необходимо, корректировкой технологических параметров прессования и геометрии инструмента. Созданы алгоритм и процедуры проектирования, которые дают возможность выполнить чертеж полого профиля, осуществить технологические расчеты параметров прессования и выбор горизонтального гидравлического пресса, спроектировать матрицу и рассекатель, провести прочностные расчеты, определить силовую нагрузку оборудования и подготовить рабочие чертежи прессового инструмента. Для проверки работоспособности разработанной методики проектирования приведен пример ее реализации для одного из типовых полых профилей, изготавливаемого в промышленном производстве. Рассмотрено проектирование двух вариантов прессового инструмента. С помощью моделирования с использованием программы «QForm Extrusion», предназначенной для анализа процессов прессования, установлено, что первый вариант конструкции инструмента при заданных технологических параметрах и геометрии каналов рассекателя и матрицы приводит к неравномерности истечения различных элементов профиля из матрицы и равномерности распределения температур по его сечению. Промышленное опробование спроектированного инструмента на гидравлическом горизонтальном прессе с усилием 33 МН для прессования профиля из сплава 6063 показало, что существенной доработки матрицы и рассекателя не требуется. С применением предложенной конструкции прессового инструмента получены партии продукции, соответствующей требованиям действующих технических условий, при этом сроки проектирования прессового инструмента сокращены практически в 2 раза.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, полые профили, прессование, горизонтальный гидравлический пресс, комбинированный инструмент, технологические расчеты, методика и процедуры проектирования.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

Для цитирования: Сидельников С.Б., Колосков С.С., Довженко Н.Н., Горбунов Ю.А., Ворошилов Д.С. Применение моделирования при проектировании инструмента для прессования полых профилей из алюминиевых сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):67–78. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-67-78>

Using simulation to design tool for pressing of hollow profiles from aluminum alloys

S.B. Sidelnikov, S.S. Koloskov, N.N. Dovzhenko, Yu.A. Gorbunov, D.S. Voroshilov

Siberian Federal University

95 Krasnoyarskiy Rabochiy prosp., Krasnoyarsk, 660025, Russia

✉ Denis S. Voroshilov (sibdrug@mail.ru)

Abstract: In order to simulate the pressing of hollow profiles made from aluminum alloys, the previously developed design algorithms for the pressing tool and the QForm software were utilized. The objective of this study was to enhance the quality and decrease the design time

intervals for pressing tools used in the industrial production of aluminum alloy profiles. A novel design procedure for a combined tool, along with the technology of semi-continuous pressing with welded hollow profiles made from aluminum alloys, was proposed. This was achieved using the QForm software, which enables efficient calculations and adjustments of pressing parameters and tool geometry through a dialog interface. The developed algorithm and design procedures enable the drawing of hollow profiles, technological calculations of pressing parameters, selection of a suitable horizontal hydraulic press, matrix and splitter design, determination of strength parameters, assessment of equipment load, and preparation of working drawings for the pressing tool. In order to validate the effectiveness of the design procedure, it was applied to typical hollow profiles fabricated on a commercial scale. Two variations of the pressing tool design were examined. Simulation results obtained from QForm Extrusion software, specifically designed for pressing analysis, revealed that the initial design of the tool, with predetermined technological parameters and geometry of the splitter and matrix channels, resulted in uneven flow of profile elements and temperature distribution. However, by adjusting the tool parameters, it was possible to achieve a straight profile exit from the matrix and a uniform temperature distribution across its cross section. Industrial verification of the designed tool, utilizing a 33 MN hydraulic horizontal press for pressing profiles made from alloy 6063, demonstrated that significant modifications to the matrix and splitter were not necessary. By employing the proposed pressing tool design, batches of products were successfully manufactured in compliance with the required technical specifications, while reducing the design time intervals of the pressing tool by approximately 50 %.

Keywords: aluminum alloys, hollow profiles, pressing, horizontal hydraulic press, combined tool, technological calculations, design methods and procedures.

Acknowledgement: We acknowledge the support provided by the Governmental contract of Siberian Federal University, Project FSRZ-2020-0013.

For citation: Sidelnikov S.B., Koloskov S.S., Dovzhenko N.N., Gorbunov Yu.A., Voroshilov D.S. Using simulation to design tool for pressing of hollow profiles from aluminum alloys. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):67–78.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-67-78>

Введение

Основным методом получения полых алюминиевых профилей в настоящее время является процесс полунепрерывного прессования с применением комбинированного инструмента [1–7]. Прессование профилей со сваркой в очаге деформации ведут через комбинированный инструмент, состоящий из матрицы, формирующей наружный контур профиля, и рассекателя, который непосредственно формирует его внутренний контур. По ходу прессования заготовка, помещенная в контейнер, разделяется с помощью рассекателя на несколько потоков металла, которые направляются в сварную камеру и после ее заполнения свариваются под действием высоких температур и давления в полый профиль требуемого сечения.

В процессе прессования равномерность скоростей истечения различных элементов профиля из матрицы имеет большое значение для получения качественного пресс-изделия. Если скорости перемещения элементов профиля существенно различаются, то могут наблюдаться такие дефекты, как скручивание, волна, прогиб, бочка, которые иногда невозможно устранить даже последующей правкой растяжением. Поэтому одной из важных задач при проектировании прессового инструмента является такое расположение профиля на зеркале матрицы и правильное назначение рабочих поясков торможения на различных участках, которые обеспечивали бы прямолинейный выход пресс-изделия из матрицы. Наряду с задачей

повышения качества профилей из алюминиевых сплавов необходимо решать и вопросы повышения производительности их производства. Наиболее перспективным направлением для повышения производительности остается уменьшение сроков реализации заказов посредством сокращения простоев и времени на всех производственных операциях, быстрой переналадки и запуска повторных операций.

Исследованиям в области прессования посвящены многие работы [8–20]. Однако до сих пор нет работоспособной методики и программного обеспечения для проектирования инструмента и технологии полунепрерывного прессования полых профилей из алюминиевых сплавов с использованием комбинированного инструмента.

Анализ научно-технической литературы показал, что наиболее приближенной к практическому применению является программа САПР INPRESS [21], представляющая собой пакет из 4 подсистем, каждая из которых включает комплекс процедур расчета и проектирования, обеспечивающих подготовку документации для реализации выбранного технологического процесса. При этом наряду с подсистемой проектирования сплошных профилей из алюминиевых сплавов, которая позволяет рассчитать калибрующие пояски и подготовить чертежи матриц, форкамер, подкладок и других видов прессового инструмента, а также определить силовые условия и выбрать оборудование для полунепрерывного прессования алюминиевых спла-

вов, имеется подсистема проектирования прессового инструмента и технологии для получения полых профилей. Однако она не нашла широкого использования из-за необходимости выполнения сложных процедур при проектировании матрицы и рассекателя, которые невозможно формализовать и перевести в автоматизированный вариант реализации. Поэтому до сих пор для проектирования комбинированного инструмента на заводах применяют интерактивный подход, основанный на опыте специалистов (конструкторов и технологов) в этой области [22–25].

Вместе с тем в последнее время для моделирования процессов прессования появилась программа «QForm Extrusion» [26] (компания «Кванторформ», г. Москва), которая базируется на методе конечных элементов. Ее преимуществами является то, что она позволяет промоделировать течение металла при прессовании и оценить качество профилей [27; 28], учесть влияние деформации инструмента на характер истечения профиля, а также ускорить процесс расчетов по сравнению с другими известными комплексами (например, DEFORM 3D). Это дает возможность оперативно провести несколько вариантов расчета и значительно сократить время на проектирование и освоение инструмента.

Целью работы являлось повышение качества и снижение сроков проектирования прессового инструмента для промышленных условий производства профилей из алюминиевых сплавов с использованием программного комплекса «QForm».

Методика проектирования

В целом, методика проектирования и расчет технологии прессования полых профилей идентичны методике проектирования для сплошных профилей [21] и включают следующие процедуры:

- 1) формирование чертежа нормали профиля:
 - создание чертежа нормали профиля;

- проведение типовых расчетов (периметра, площади, диаметра описанной окружности и т.п.);

- согласование чертежа нормали с заказчиком;

- 2) технологические расчеты и выбор основных параметров прессования:

- назначение коэффициента вытяжки;

- предварительный расчет силы прессования и выбор гидравлического пресса и количества каналов;

- расчет длины заготовки;

- 3) проектирование матричного комплекта:

- назначение припусков на размеры профиля;

- размещение профиля на зеркале матрицы;

- 4) проектирование рассекателя (карманов, языка, входной области на рассекателе и др.);

- 5) проектирование матрицы (сварочной камеры, предкамеры, назначение подрезки и угла выходной зоны и др.);

- 6) поверочный прочностной расчет и расчет консольных элементов инструмента;

- 7) назначение калибрующих поясков матрицы и рассекателя;

- 8) проектирование подкладки, спецподкладки и др.;

- 9) подготовка рабочих чертежей прессового инструмента;

- 10) расчет силы прессования и выбор пресса.

Применение данной методики позволяет существенно снизить сроки подготовки производства и объем металла, идущего на доработку прессового инструмента (рис. 1), и, в конечном счете, уменьшить себестоимость готовой продукции.

Результаты и их обсуждение

Покажем использование предлагаемой методики проектирования прессового инструмента на примере одного из типовых профилей из алюми-

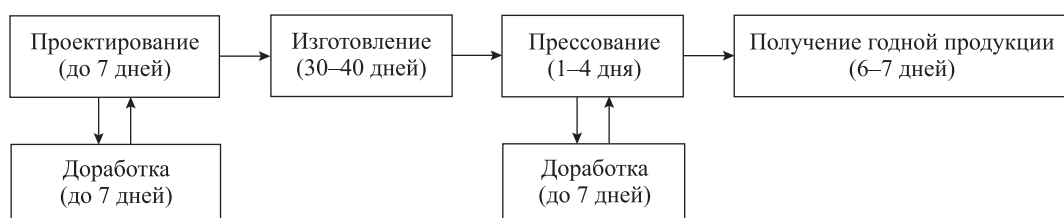


Рис. 1. Схема последовательности процедур проектирования инструмента с применением программы компьютерного моделирования «QForm Extrusion»

Fig. 1. Sequence of design procedures of the tool using QForm Extrusion simulation software

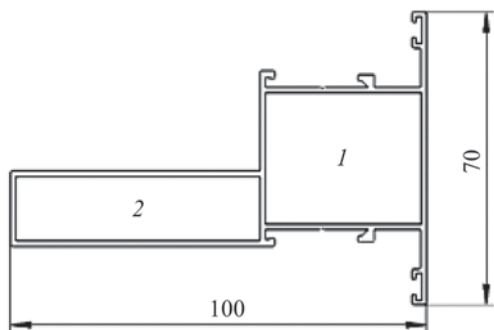


Рис. 2. Общий вид профиля из сплава 6063

Fig. 2. General view of profile from alloy 6063

ниевое сплава 6063, общий вид которого представлен на рис. 2. Профиль имеет две полости: квадратную 1 (первая часть) и прямоугольную 2 (вторая часть), толщина стенки равна 1,25 мм по всему периметру, а площадь поперечного сечения составляет 450 мм².

После создания чертежа нормали для прессования был выбран пресс усилием 33 МН, при этом коэффициент вытяжки составил 106. В качестве начальных геометрических параметров и технологических условий для моделирования процесса прессования были заданы следующие: диаметр контейнера 247 мм; диаметр заготовки (слитка) 242 мм; ее длина 1000 мм; температура заготовки 450 °С; температура матричного комплекта 480 °С; температура контейнера 430 °С; скорость прессования 2 мм/с.

В качестве граничных условий для расчета напряжений трения на контакте металла с инструментом использовали формулу А.Н. Леванова [26; 27]. Реологические и теплотехнические характеристики сплава 6063 были импортированы из библиотеки программного комплекса «QForm Extrusion».

Материалом прессового инструмента была выбрана сталь 4X5МФС повышенной теплостойкости в соответствии с требованиями к нему технических условий горячего прессования, при этом твердость составляла $HRC = 55\div 58$.

На рис. 3 показаны 3D-модели инструмента для выбранного профиля: первая использовалась для моделирования в качестве исходной (рис. 3, а), а вторая (рис. 3, б) — после корректировки по результатам моделирования.

Диаметр комплектов составлял 340 мм, у каждого раскатателя было по 6 карманов, разделяющих сплошную заготовку на 6 потоков металла, которые далее по ходу движения соединялись в

сварной камере и сваривались вокруг языка раскатателя с образованием 7 швов протяженностью по всей длине профиля. У второй конструкции для обеспечения одинакового количества металла, проходящего через карманы в единицу времени, общая площадь карманов раскатателя на входе в него составила 11416 мм². Вытяжка на входе в раскататель была снижена до 4,2 ед., что привело к увеличению стойкости инструмента и снижению силы прессования.

Создав 3D-модель в «QExDD», проводили построение сетки для расчетной области и инструмента в программе «QShape» (рис. 4). Модели описывали фигурами треугольной формы, количество которых для первой конструкции составило 825 тыс. элементов, а для второй — 900 тыс. После построения сетки модели переместили в программу «QForm Extrusion», где задавали основные технологические параметры процесса, реологические и теплотехнические свойства сплава 6063, граничные условия трения и проводили расчеты.

На рис. 5 представлено распределение скоростей на различных элементах профиля, полученное с помощью программы «QForm Extrusion» с применением первой конструкции инструмента. Видно, что скорость квадратной части профиля (части 1) равна 220 мм/с, при этом нет отклонения от прямолинейности. Однако скорость прямоугольного участка профиля (части 2) практически в 2 раза меньше, что приводит к браку.

При анализе температуры металла по элементам профиля (рис. 6) установлено, что в ходе прессования с применением первого варианта конструкции прессового инструмента температура распределена неравномерно и изменяется от 520 до 570 °С. Это может привести к термической де-

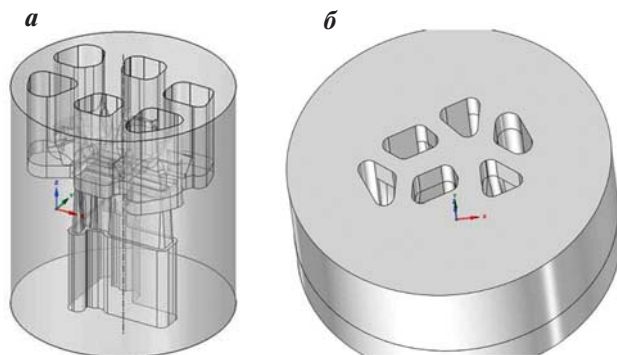


Рис. 3. 3D-модели прессового инструмента
а — первый вариант; б — второй вариант

Fig. 3. 3D models of pressing tool
а — the initial variant; б — the second variant

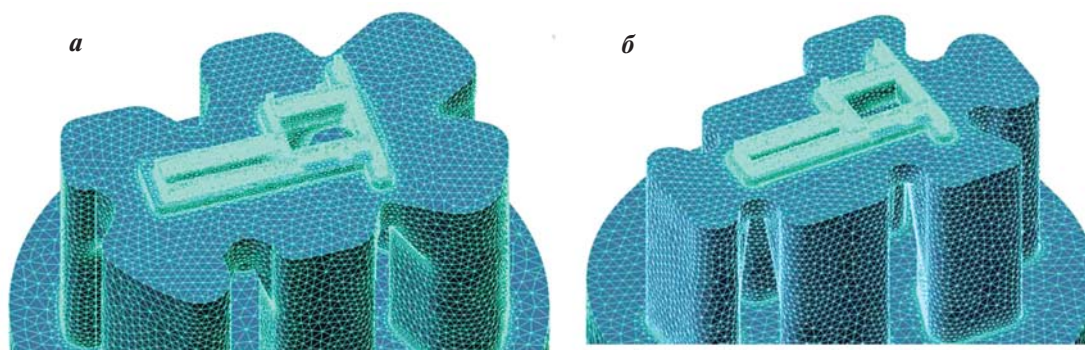


Рис. 4. Разбиение расчетной области на конечные элементы
a – для первого варианта конструкции инструмента; *б* – для второго варианта

Fig. 4. Subdivision of calculated region into finite elements
a – for the initial design of the tool; *б*– for the second design of the tool

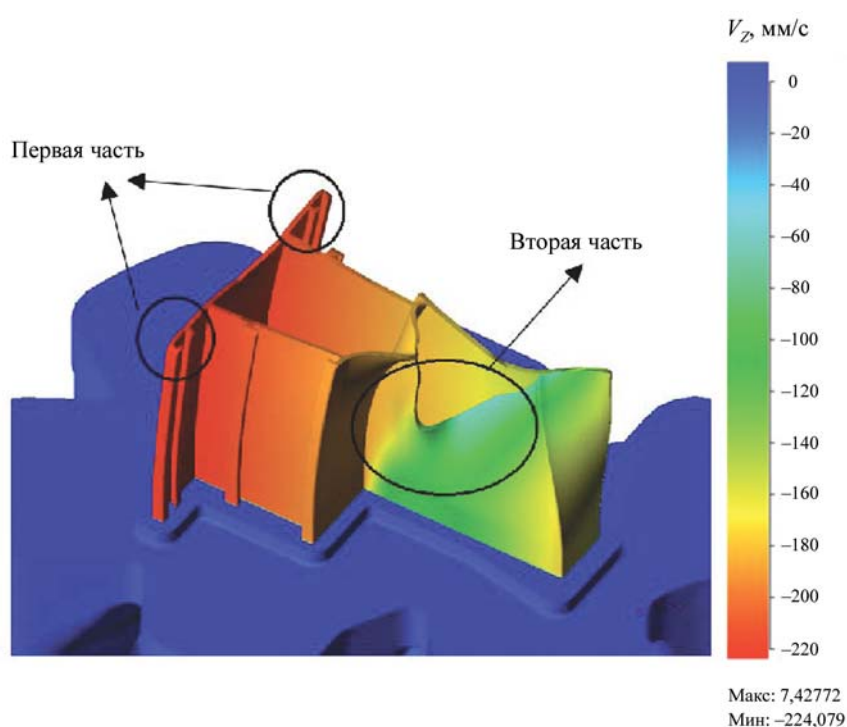


Рис. 5. Распределение скоростей по сечению профиля для первого варианта конструкции инструмента

Fig. 5. Velocity distribution over the profile cross section for the initial tool design

формации профиля, а при высоких температурах на отдельных его участках — к перегреву металла и появлению термических трещин.

Расчеты напряженно-деформированного состояния показали, что упругая деформация инструмента достигает 1 мм по оси прессования, а прогиб рабочих поясков — до $\pm 0,5$ град. Все эти факторы могут привести к быстрому выходу из строя матричного комплекта за счет износа рабочих поясков, появления трещин и т.п. Попытки

доработать первоначальную конструкцию инструмента путем моделирования за счет изменения высоты рабочего пояска, создания дополнительных притоков металла и т.п. не принесли результата. Поэтому было принято решение об использовании для моделирования второго варианта конструкции инструмента (см. рис. 3, б).

Радиус описанной окружности по входным карманам рассекателя также был равен 210 мм при диаметре контейнера 247 мм, тем самым дефекты и

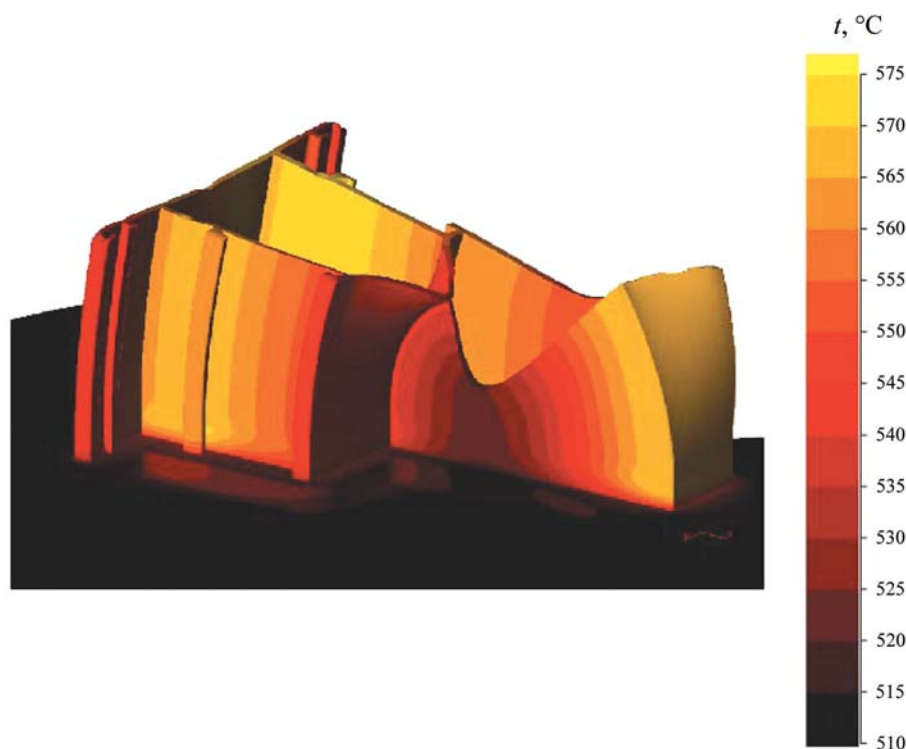


Рис. 6. Распределение температур по элементам профиля для первого варианта конструкции инструмента

Fig. 6. Temperature distribution over profile elements for the initial variant of the tool design

неоднородность химического состава [29; 30], которые наблюдаются в периферийных слоях слитка, не попадают в профиль, а остаются в мертвых зонах контейнера (рис. 7). Высота языка рассекателя была уменьшена до 16,5 мм, поэтому увеличилась жесткость конструкции, за счет уменьшения плеча снизился момент силы. Перепад рабочих поясков между матрицей и рассекателем составил 0,5 мм. Сварная камера и предкамера строились по такому же алгоритму, что и для первой конструкции инструмента, при этом высота сварной камеры и предкамеры составила 12 и 5 мм соответственно. Так как сварная камера после перепроектирования имела меньшую площадь, можно было ожидать, что с изменением формы карманов рассекателя увеличилась стойкость инструмента. Подрезку и выходную часть матрицы оставили такую же, как и у первоначальной конструкции инструмента. Рабочие пояски матрицы и рассекателя (рис. 8) были скорректированы с учетом новой конструкции карманов рассекателя и фактической геометрии профиля, полученной при использовании первой конструкции инструмента.

Результаты моделирования процесса прессования с теми же технологическими параметрами

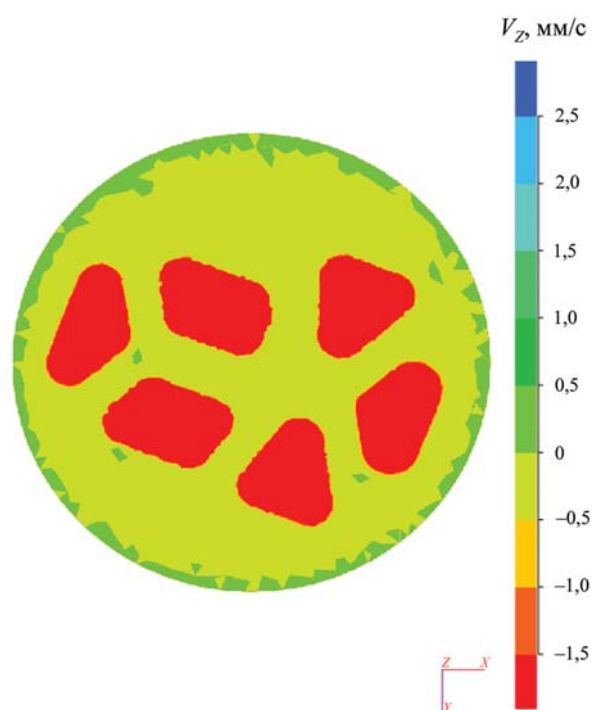


Рис. 7. Схема формирования мертвых зон в контейнере перед входом в карманы рассекателя

Fig. 7. Schematic view of formation of dead zones in container in front of input to splitter boxes

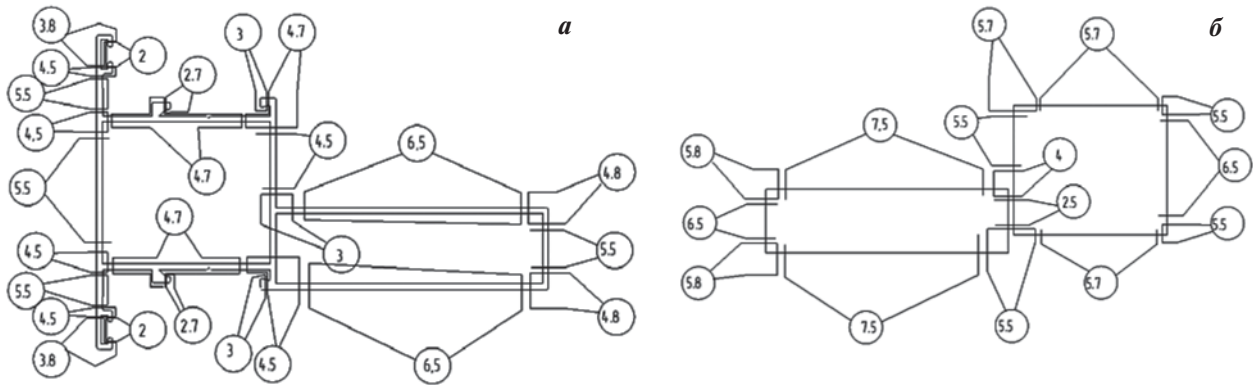


Рис. 8. Рабочие пояски матрицы (а) и расщепителя (б)

Fig. 8. Working bands of matrix (a) and splitter (b)

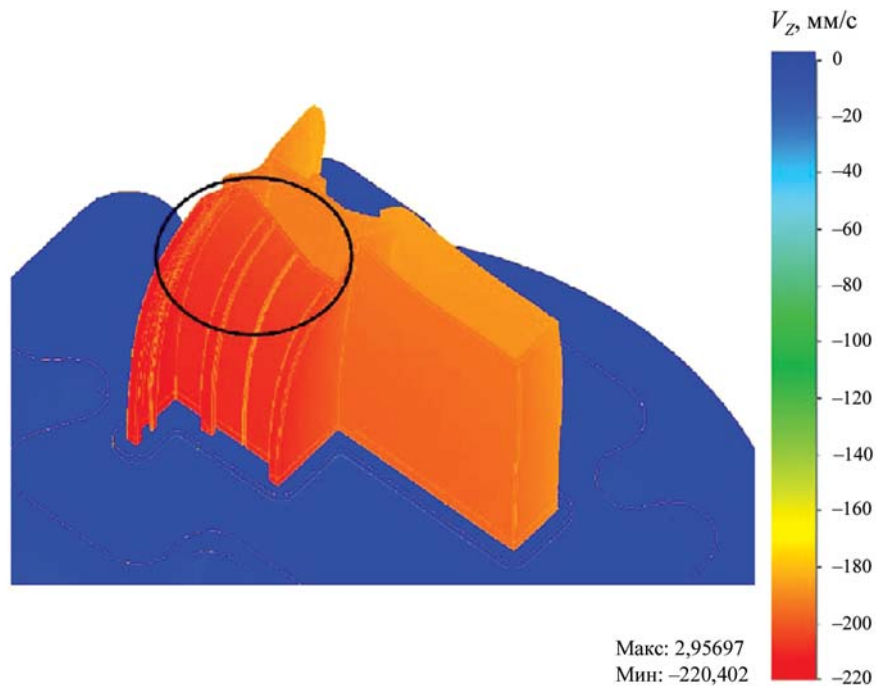


Рис. 9. Распределение скоростей по сечению профиля для второго варианта конструкции инструмента

Fig. 9. Velocity distribution over the profile cross section for the second variant of the tool design

для второго варианта конструкции прессового инструмента представлены на рис. 9, 10.

Анализ результатов моделирования свидетельствует, что применение новой конструкции инструмента значительно улучшает равномерность истечения профиля, однако скорость металла первой части профиля несколько выше средней скорости профиля (см. рис. 9). Поэтому при последующем моделировании уменьшили площадь квадратной полости кармана (на 10 %) и высоту рабочего пояска. Моделирование течения металла при прессовании с использованием последней кон-

струкции инструмента (см. рис. 10) показало, что распределение скоростей по всему сечению профиля равномерно (скорость составляет 212 мм/с), а эффективность ее применения была подтверждена полученным распределением температур (рис. 11). Видно, что разброс температур не превышает 10 °С, а средняя температура профиля составляет 550 °С, что соответствует технологическим требованиям реализации процесса полунепрерывного прессования полых профилей из сплава 6063. Для проверки результатов моделирования в промышленных условиях одного из металлургических заводов РФ

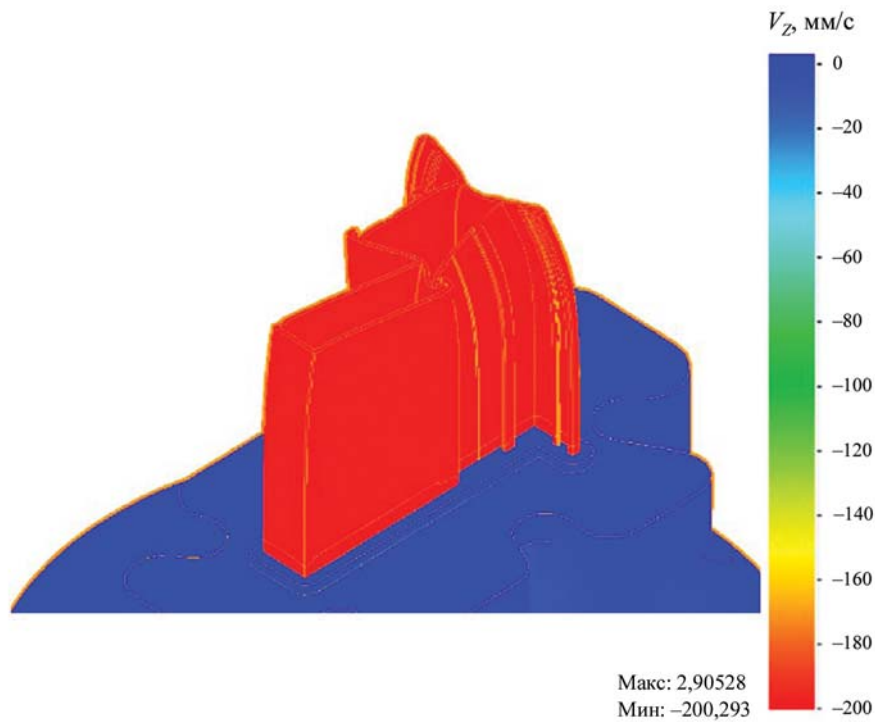


Рис. 10. Распределение скоростей по сечению профиля для второго варианта конструкции инструмента после ее доработки

Fig. 10. Velocity distribution over the profile cross section for the second variant of the tool design after its modification

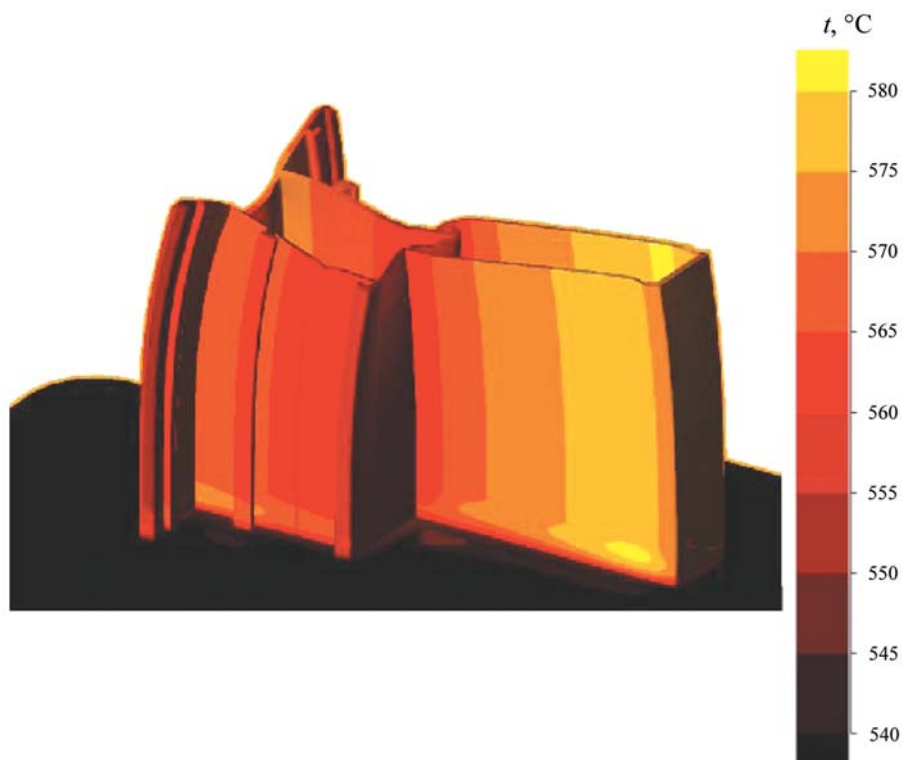


Рис. 11. Распределение температуры по элементам профиля для второго варианта конструкции инструмента

Fig. 11. Temperature distribution over the profile elements for the second variant of the tool design

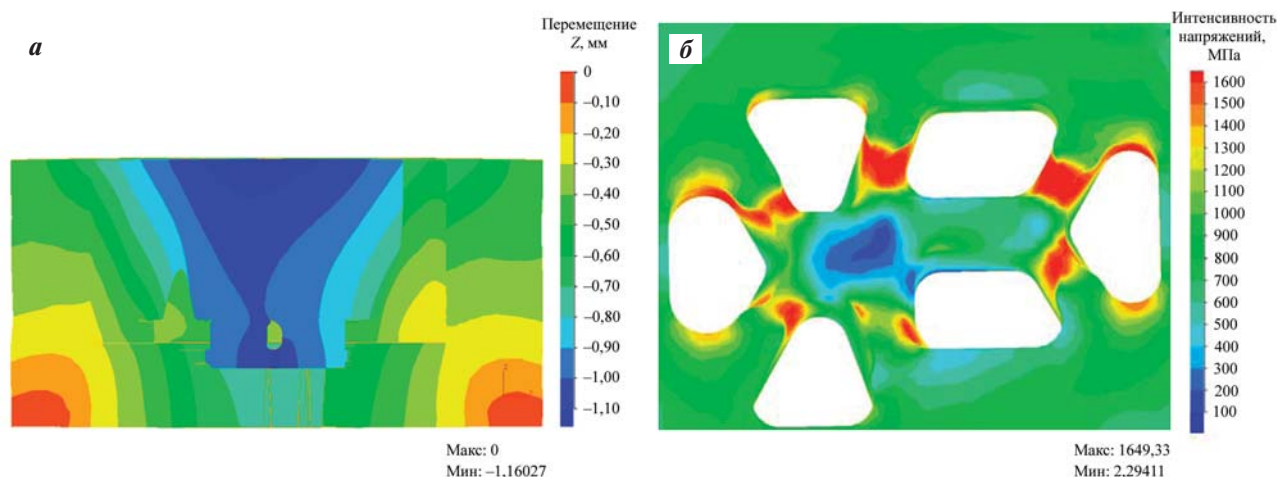


Рис. 12. Деформация инструмента (а) и интенсивность напряжений (б)

Fig. 12. Tool deformation (а) and stress intensity (б)

на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 33 МН проводили опытное прессование полых профилей указанных выше размеров из сплава 6063. При этом установлено, что сроки проектирования комбинированного прессового инструмента и его освоения снижены практически в 2 раза, а с использованием предложенной конструкции прессового инструмента получены профили требуемого качества.

Результаты расчета упругой деформации и интенсивности напряжений, полученные с помощью «QForm Extrusion», показаны на рис. 12. Видно, что инструмент подвергается значительной упругой деформации во время прессования и прогибается на 1 мм по оси прессования, из-за чего при высокой интенсивности напряжений в нем могут появиться дефекты типа трещин.

На основании анализа этих данных моделирования было принято решение перепроектировать камеру на входе в рассекатель и увеличить радиусы скругления рассекателя, что привело к уменьшению нагрузок на инструмент и силы прессования.

Заклучение

Таким образом, выполнено моделирование процесса прессования полых профилей из алюминиевых сплавов с помощью предложенной методики проектирования прессового инструмента с использованием программного комплекса «QForm Extrusion», что позволило исключить повторные доработки новых матричных комплектов из-за пробного прессования после их изготовления и сократить, тем самым, сроки запуска новой но-

менклатуры профилей в производство. Для проверки результатов моделирования в промышленных условиях одного из металлургических заводов РФ на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 33 МН проведено опытное прессование полых профилей из сплава 6063 (см. рис. 2). Установлено, что существенной доработки матрицы и рассекателя не требуется, а с применением предложенной конструкции прессового инструмента получена промышленная продукция, соответствующая требованиям действующих технических условий.

Список литературы/References

- Саха П.К. Технология прессования алюминия. М.: НП АПРАЛ, 2015. 352 с.
- Баузер М., Зауер К., Зигерт Г. Прессование: Справ. руководство. Пер. с нем. по лицензии издательства «Aluminium Verlag Marketing & Kommunikation GmbH». М.: Алюсил МВ и Т, 2009. 922 с.
- Логинов Ю.Н., Инатович Ю.В. Инструмент для прессования металлов: Учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. 224 с.
- Щерба В.Н. Прессование алюминиевых сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 768 с.
- Qiang Li, Chris Harris, Mark R. Jolly. Finite element modelling simulation of transverse welding phenomenon in aluminium extrusion process. *Materials & Design*. 2003;24(7):493–496.
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00123-7](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00123-7)
- Barbara Reggiani, Antonio Segatori, Lorenzo Donati, Luca Tomesani. Prediction of charge welds in hollow

- profiles extrusion by FEM simulations and experimental validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;(69):1855–1872. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5143-2>
7. Longchang Tong, Christoph Becker, Pavel Hora. High efficiency in the simulation of complex extrusion processes using an advanced simulation method. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2(10):4726–4731. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.10.005>
 8. Kim K.J., Lee C.H., Yang D.Y. Investigation into the improvement of welding strength in three dimensional extrusion of tubes using porthole dies. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;(130):426–431. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00717-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00717-3)
 9. Xiaochen Lu, Junquan Yu, Jianguo Lin, Zhusheng Shi. Investigation of material flow behaviour and microstructure during differential velocity sideways extrusion. *Procedia Manufacturing*. 2020;(50):226–230. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.042>
 10. Колосков С.С., Сидельников С.Б., Берсенева А.С., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Катрюк В.П. Исследование технологии прессования труб из алюминиевых сплавов с применением программ компьютерного моделирования. *Производство проката*. 2019;(12):23–28. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2019-0-12-23-28>
Koloskov S.S., Sidelnikov S.B., Berseneva A.S., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Katryuk V.P. Technology study of aluminum alloys pipe pressing with use of computer simulation programs. *Proizvodstvo Prokata*. 2019;(12):23–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2019-0-12-23-28>
 11. Junquan Yu, Guoqun Zhao. Interfacial structure and bonding mechanism of weld seams during porthole die extrusion of aluminum alloy profiles. *Materials Characterization*. 2018;(138):56–66. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.052>
 12. Crosio Michele, Hora David, Becker Christoph, Hora Pavel. Realistic representation and investigation of charge weld evolution during direct porthole die extrusion processes through FE-analysis. *Procedia Manufacturing*. 2018;(15):232–239. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.214>
 13. Junquan Yu, Guoqun Zhao. Study on welding quality in the porthole die extrusion process of aluminum alloy profiles. *Procedia Engineering*. 2017;(207):401–406. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.795>
 14. Junquan Yu, Guoqun Zhao, Weichao Cuib, Cunsheng Zhanga, Liang Chen. Microstructural evolution and mechanical properties of welding seams in aluminum alloy profiles extruded by a porthole die under different billet heating temperatures and extrusion speeds. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;(247):214–222. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.04.030>
 15. Bakker A.J.D., Katgerman L., Zwaag S.V.D. Analysis of the structure and resulting mechanical properties of aluminium extrusions containing a charge weld interface. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;(229):9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.013>
 16. Bingol Sedat, Bozaci Atilla. Experimental and numerical study on the strength of aluminum extrusion welding. *Materials*. 2015;8(7):4389–4399. <https://doi.org/10.3390/ma8074389>
 17. Mahmoodkhani Y., Wells M., Parson N., Poole W.J. Numerical modelling of the material flow during extrusion of aluminium alloys and transverse weld formation. *Journal of Material Processing Technology*. 2014;(214):688–700. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.028>
 18. Stebunov S., Biba N., Lishny A., Jiao L. Practical implementation of numerical modeling to optimization of extrusion die design for production of complex shape profiles. *Aluminium Extrusion and Finishing*. 2013;(4):20–24. http://www.qform3d.co.uk/files_uk/2013_0002_0.pdf
 19. Libura W., Rekas A. Numerical modelling in designing aluminium extrusion in: aluminium alloys: New trends in fabrication and applications. Ed. by Zaki Ahmad. INTECH, 2012. P. 137–157. <https://doi.org/10.5772/51239>
 20. Koloskov S., Sidelnikov S., Voroshilov D. Modeling process of semi-continuous extrusion of hollow 6063 aluminum alloy profiles using QForm extrusion. *Solid State Phenomena*. 2021;(316):288–294. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.288>
 21. Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Васина Г.И. Система автоматизированного проектирования технологии прессования металлов. Научное методическое обеспечение. Красноярск: ГАЦМиЗ, 2000. 194 с.
 22. Алешин В.П. Расчет рабочих поясков прессовых матриц. *Технология легких сплавов*. 1990;(1):30–33. Aleshin V.P. Calculation of working bands of press dies. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 1990;(1):30–33. (In Russ.).
 23. Гун Г.Я., Аверченко А.Ф., Стебунев С.А. К методике автоматизированного проектирования прессовых матриц. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1985;(7):92–95. Gun G.Ya., Averchenko A.F., Stebunov S.A. On the method of computer-aided design of press dies. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1985;(7):92–95. (In Russ.).
 24. Эйдельмант С.Б., Корпаков Б.П., Майзлин Я.Л. Проектирование с помощью ЭВМ матриц для прессования профилей. *Цветные металлы*. 1982;(3):81–82. Eidelnant S.B., Korpakov B.P., Maizlin Ya.L. Designing with the help of a computer matrices for pressing profiles. *Tsvetnye Metally*. 1982;(3):81–82. (In Russ.).

25. Степанский Л.Г. Расчетные оценки калибровок пресс-матриц. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1983;(5):25–27.
Stepanskiy L.G. Estimated estimates of press matrix calibrations. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 1983;(5):25–27. (In Russ.).
26. QForm-Extrusion (электронный ресурс). Моделирование прессования профилей. URL: <https://qform3d.ru/products/extrusion> (дата обращения: 20.04.2023).
27. Князькин И.С., Дюжев А.М., Власов А.В., Гладков Ю.А., Лишний А.И. Методика автоматизированного проектирования матричной оснастки для прессования алюминиевых сплавов. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана* (Электрон. журнал). 2015;(8):1–13.
Knyaz'kin I.S., Dyuzhev A.M., Vlasov A.V., Gladkov Yu.A., Lishniy A.I. Technique for computer-aided design of matrix tooling for pressing aluminum alloys. *Science and Education. MSTU im. N.E. Bauman* (Electron. Magazine). 2015;(8):1–13. (In Russ.).
28. Дюжев А.М., Князькин И.С., Лишний А.И., Соловьев Д.А., Стебунов Д.А. Программа для автоматизированного поэлементного параметрического проектирования матричной оснастки для прессования профилей QForm Extrusion Die Designer (QExDD): Св-во 2015613466 (РФ). 2015.
29. Леванов А.Н., Колмогоров В.Л., Буркин С.П., Картак Б.Р., Ашпур Ю.В., Спасский Ю.И. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия. 1975. 352 с.
30. Лаптев А.М., Ткаченко Я.Ю., Жабин В.И. Построение диаграммы для определения коэффициента трения в формуле Леванова по методу осадки кольца. *Обработка материалов давлением*. 2011;3(28):129–132.
Laptev A.M., Tkachenko Ya.Yu., Zhabin V.I. Construction of a diagram for determining the coefficient of friction in the Levanov formula using the ring upset method. *Obrabotka materialov davleniem*. 2011;3(28):129–132. (In Russ.).

Информация об авторах

Сергей Борисович Сидельников – д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением (ОМД) Института цветных металлов (ИЦМ) Сибирского федерального университета (СФУ).
<https://orcid.org/0000-0002-5611-2808>
E-mail: sbs270359@yandex.ru

Сергей Сергеевич Колосков – аспирант кафедры ОМД, ИЦМ СФУ.
<https://orcid.org/0000-0002-4076-7295>
E-mail: kelos36@mail.ru

Николай Николаевич Довженко – д.т.н., профессор кафедры машиностроения Политехнического института СФУ.
<https://orcid.org/0000-0001-7608-0615>
E-mail: n.dovzhenko@bk.ru

Юрий Александрович Горбунов – д.т.н., профессор кафедры ОМД, ИЦМ СФУ.
<https://orcid.org/0000-0001-9835-7881>
E-mail: j.a.gorbunov@gmail.com

Денис Сергеевич Ворошилов – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ОМД, ИЦМ СФУ.
<https://orcid.org/0000-0002-1406-3665>
E-mail: sibdrug@mail.ru

Information about the authors

Sergei B. Sidelnikov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metal Forming (MF) of the School of Non-Ferrous Metals (SNFM) of Siberian Federal University (SFU).
<https://orcid.org/0000-0002-5611-2808>
E-mail: sbs270359@yandex.ru

Sergei S. Koloskov – Postgraduate Student of the Department of MF of SNFM, SFU.
<https://orcid.org/0000-0002-4076-7295>
E-mail: kelos36@mail.ru

Nikolai N. Dovzhenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering of the Polytechnic School, SFU.
<https://orcid.org/0000-0001-7608-0615>
E-mail: n.dovzhenko@bk.ru

Yurii A. Gorbunov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of MF of SNFM, SFU.
<https://orcid.org/0000-0001-9835-7881>
E-mail: j.a.gorbunov@gmail.com

Denis S. Voroshilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of MF of SNFM, SFU.
<https://orcid.org/0000-0002-1406-3665>
E-mail: sibdrug@mail.ru

Вклад авторов

С.Б. Сидельников – формирование основной концепции, постановка цели исследования, подготовка текста статьи, формулировка выводов.

С.С. Колосков – осуществление расчетов, проведение моделирования, подготовка текста статьи.

Н.Н. Довженко – разработка методики проектирования инструмента и обоснование ее применения, анализ результатов исследований.

Ю.А. Горбунов – научное руководство, корректировка текста и выводов.

Д.С. Ворошилов – подготовка и проведение экспериментов, подготовка текста по экспериментальной части.

Contribution of the authors

S.B. Sidel'nikov – formulated main concept, formulated purpose of the study, wrote the manuscript, formulated conclusions.

S.S. Koloskov – performed calculations, performed simulation, wrote the manuscript.

N.N. Dovzhenko – developed methods of tool design, substantiated its application, analyzed the research results.

Yu.A. Gorbunov – scientific advising, revised the manuscript and conclusions.

D.S. Voroshilov – prepared and performed experiments, wrote the experimental section of the manuscript.

Статья поступила в редакцию 07.02.2023, доработана 12.04.2023, подписана в печать 20.04.2023

The article was submitted 07.02.2023, revised 12.04.2023, accepted for publication 20.04.2023