

И. Ю. Губанов, С. В. Беляев, П. О. Широков, А. В. Салатов, И. Ю. Маслов

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ*

Приведена методика создания виртуальной модели процесса полунепрерывного прессования длинномерных строительных профилей из алюминиевых сплавов. Представлены результаты компьютерного моделирования процесса полунепрерывного прессования с охлаждаемой форкамерной матрицей из сплава АД31. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.

Ключевые слова: полунепрерывное прессование алюминиевых сплавов, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, принудительно охлаждаемый прессовый инструмент.

Полунепрерывное прессование длинномерных пресс-изделий является одним из основных способов изготовления строительных профилей из алюминиевых сплавов, причем одним из главных сдерживающих факторов повышения производительности процесса является низкая скорость прессования. В свою очередь, выбор скоростного режима прессования ограничен прежде всего тепловыми условиями, которые влияют на эффективность процесса прессования. Выбор оптимальных температурно-скоростных условий является одной из главных задач технолога при разработке процесса прессования, поскольку от этого зависит эффективность процесса и уровень физико-механических свойств пресс-изделия [1]. Одним из эффективных методов управления тепловыми условиями процесса прессования алюминиевых сплавов является принудительное испарительное охлаждение прессового инструмента, в частности применение принудительно охлаждаемой форкамерной матрицы (ПОФМ). Однако внедрение в производство данной технологии сдерживается недостатком теоретических знаний и экспериментальных данных в этой области. Поэтому моделирование формоизменения и тепловых условий прессования алюминиевых сплавов с ПОФМ является актуальной задачей.

Наряду с классическими теоретическими методами математического моделирования процессов ОМД (методом совместного решения уравнений равновесия с условием пластичности; методом баланса работ; методом верхней оценки; методом линий скольжения и др.) в последние десятилетия широкое применение получили численные методы. Практически численными методами можно решить любую задачу, так как увеличение ее размерности и усложнение геометрии приводит лишь к увеличению объема вычислений. В то же время при моделировании процессов прессования на основе метода конечных элементов (МКЭ) реализованного с помощью коммерческих пакетов программ Deform-3D, PressForm, AutoForge, QForm и других в силу специфических особенностей процесса прессования исследователи сталкиваются с определенными трудностями [2].

Отмечено, что модель МКЭ должна применяться с помощью физически обоснованной методики и базироваться на экспериментальных линиях равных скоростей (изотахах) и зонах деформирования металла в контейне-

ре, полученных методами визиопластичности и координатных сеток [3; 4].

В работе [4] показано, что данные скоростей течения, полученные с применением МКЭ, качественно близки, но мало пригодны для количественной оценки при приближении к промышленным значениям коэффициента вытяжки (более 40). Это неуклонно ведет к росту ошибки в расчетах скоростей и энергозатрат до 20 %. Коммерческие пакеты МКЭ можно рассматривать для применения на промежуточном этапе в виде теста между эскизным проектом и его воплощением в рабочую документацию для промышленности, но не в качестве средства для точного расчета технологических параметров из-за больших расхождений результатов с экспериментальными данными (10...20 %) против погрешностей по классическим расчетам, обычно составляющих не более 5 % [3].

Повысить сходимость результатов виртуального эксперимента, полученных численным моделированием (МКЭ), и реального эксперимента позволяет корректировка реологии деформируемого металла. В работах [5; 6] описаны методики уточнения зависимости сопротивления деформации от параметров процесса (степени, скорости и температуры деформации). Суть методов заключается в корректировке коэффициентов уравнения реологии деформируемого металла путем сравнении усилия деформации полученного в результате расчета по аналитической зависимости [5] или виртуального эксперимента [6], с истинным усилием процесса прессования. Применение данных методик позволяет минимизировать ошибку в определении энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса с 10...20 до 1...5 %. С другой стороны, использование только компьютерного моделирования при оптимизации технологических параметров процесса прессования сложных профилей привело бы к постановке большого количества виртуальных экспериментов, что в разы увеличит сроки проектирования технологии. Поэтому требуется разработать такую методику проектирования технологического процесса, которая позволила бы говорить о сходимости результатов не только реального и виртуального эксперимента, но и компьютерной и аналитической модели. Это позволит еще на начальной стадии проектирования технологии оптимизировать температурно-скоростные и силовые парамет-

*Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» (проект № 58-КФ).

ры полунепрерывного прессования с учетом адекватной аналитической модели.

На основании вышеизложенного предлагается следующая методика создания виртуальной модели процесса полунепрерывного прессования длинномерных строительных профилей из алюминиевых сплавов.

1. Вводим геометрию профиля и температуру на выходе из матрицы.

2. Вводим характеристики горизонтального гидравлического пресса (модель, усилие, скоростной диапазон прессования и т. д.).

3. Вводим реологию алюминиевого сплава по зависимости, предложенной в работе [7]:

$$\sigma_s = A \cdot \varepsilon^B \cdot \xi^C \cdot \exp(-D \cdot T_{\text{пр}}) \text{ МПа}, \quad (1)$$

где A, B, C, D – реологические коэффициенты; $\varepsilon = \ln(1)$ – степень деформации; $\xi = \varepsilon/t$ – скорость деформации, 1/с; $T_{\text{пр}}$ – температура прессования, °C.

4. Определяем температурно-скоростные и силовые условия полунепрерывного прессования на основе математической модели, полученной в результате решения сопряженной краевой задачи нестационарной теплопроводности, представленной в работе [1]. При этом геометрия профиля пересчитывается на эффективный диаметр. Находим опорное решение по температурно-скоростному режиму прессования, заключающееся в определении максимально возможной скорости прессования (МВСП) с учетом ограничений по предельной температуре, скорости и допускаемому усилию.

5. Проводим виртуальный эксперимент полунепрерывного прессования по тому же эффективному диаметру прессуемого профиля, что и в п. 4, в пакете инженерного анализа Deform-3D.

6. Сопоставляем результаты по температурно-скоростным и силовым параметрам прессования математического моделирования с виртуальным экспериментом. В случае отклонения результатов проводим корректирующие воздействия на сравниваемые модели. Сначала – на параметры компьютерной модели – путем уменьшения размеров конечных элементов с целью повышения точности расчета. Если сходимость не достигнута, тогда уточняем математическую модель, в которой корректируется влияние объемных источников тепла на конечную температуру профиля. Корректировку продолжаем до достижения заданной точности, в результате чего находим опорное решение, адекватно описывающее процесс полунепрерывного прессования, которое можно применить для дальнейшей оптимизации конструктивных элементов матрицы с целью достижения заданного качества пресс-изделия.

Рассмотрим компьютерное моделирование процесса прессования строительного профиля КП 45302-1 (рис. 1) из сплава АД31 на горизонтальном гидравлическом прутково-профильном прессе усилием 25 МН с применением ПОФМ.

Размеры заготовки принимали 215×780 мм. Прессование проводили из контейнера диаметром 225 мм. Для поиска опорного решения перестроили матрицу на эффективный диаметр ($d_{\text{эф}} = 29,4$ мм). Определение МВСП показало, что максимальная скорость прессования составляет 10 мм/с. Дальнейшее повышение скорости прессования возможно только за счет введения в технологический процесс принудительного охлаждения. Для этого была разработана ПОФМ с выступом, на котором расположено кольцо, а внутри выступа находится рабочая полость форкамеры, при этом наружная поверхность выс-

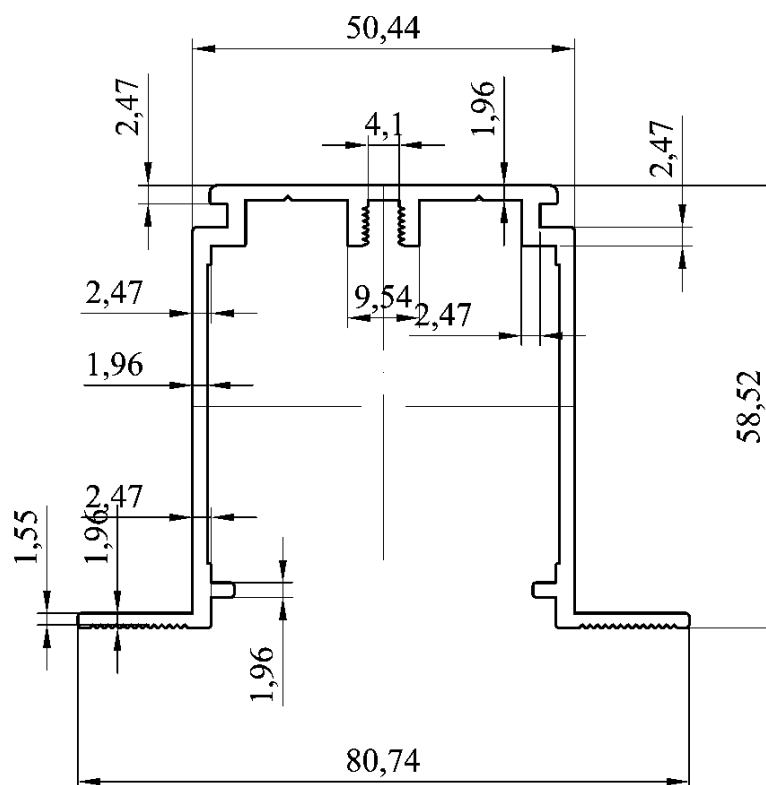


Рис. 1. Эскиз профиля

тупа эквидистанта внешнему контуру рабочей полости форкамеры и снабжена охлаждающими каналами особой конструкции. Расчет показал, что применение принудительного испарительного охлаждения позволит увеличить скорость прессования до 12 мм/с.

Для сопоставления математической и компьютерной модели по предложенным скоростным условиям прессования выполнен виртуальный эксперимент (ВЭ), исходные параметры которого представлены в таблице.

Исходные данные виртуального эксперимента

Параметр прессования ВЭ	Значение (ВЭ с ПОФМ по эффективному диаметру)
Начальная температура, °С	
– нагрева заготовки	480
– контейнера	440
– форкамерной матрицы	410
Скорость прессования, мм/с	12
Коэффициент трения	
– в контейнере	0,5
– в форкамере	0,5
– в матрице	0,2
Высота пресс-остатка, мм	25

Геометрия виртуальной модели процесса полунепрерывного прессования и разбивка объектов модели на конечные элементы показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

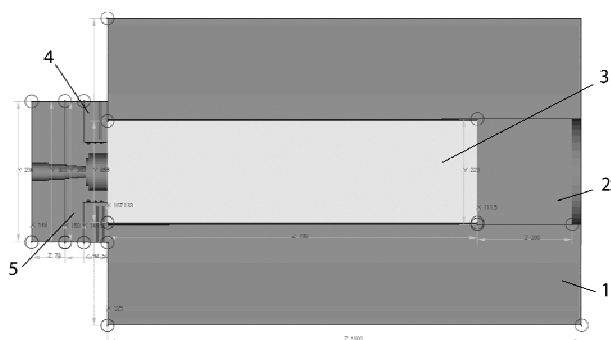


Рис. 2. Схема виртуальной модели полунепрерывного прессования с ПОФМ в пакете инженерного анализа Deform-3D: 1 – контейнер; 2 – пресс-штемпель; 3 – слиток; 4 – кольцо; 5 – матрица

Расчет проводили на двухпроцессорной ПЭВМ с тактовой частотой 2ГГц, объем ОЗУ – 4 Гб. Время решения задачи составило 121 ч.

В результате моделирования в Deform-3D построена координатная сетка (рис. 4), которая имеет характерные для прессования застойные зоны в контейнере и форкамере, резкое увеличение скорости истечения металла в осевой зоне на выходе из матрицы и запаздывание периферийных участков заготовки, что качественно не противоречит известным экспериментальным исследованиям.

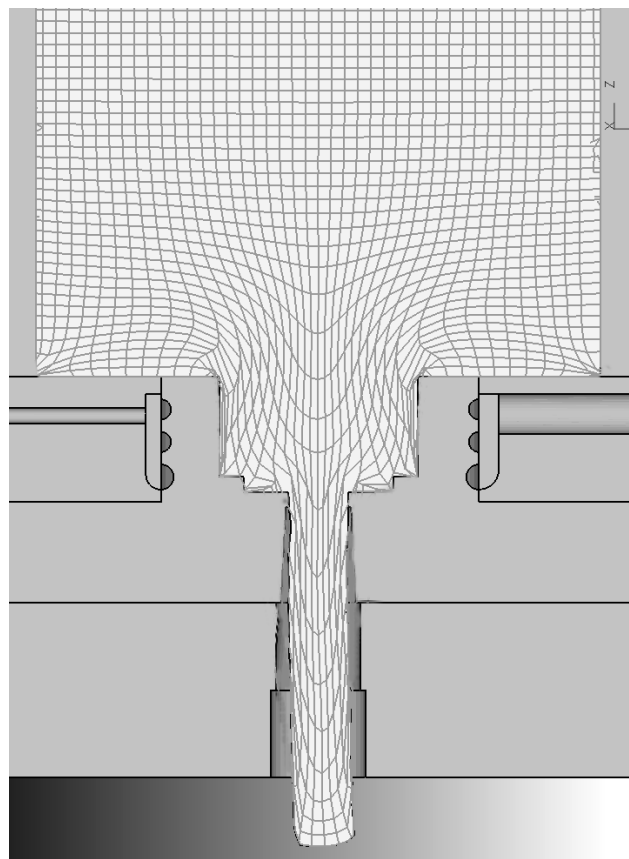


Рис. 4. Характер течения металла по результатам моделирования в Deform-3D

Сравнение энергосиловых параметров процесса полунепрерывного прессования компьютерной модели (рис. 5) и теоретического расчета показало достаточную сходимость данных. Усилие прессования по аналитической модели составило 12,3 МН, а максимальное усилие компьютерной модели, согласно рис. 4, – 12,1 МН. При

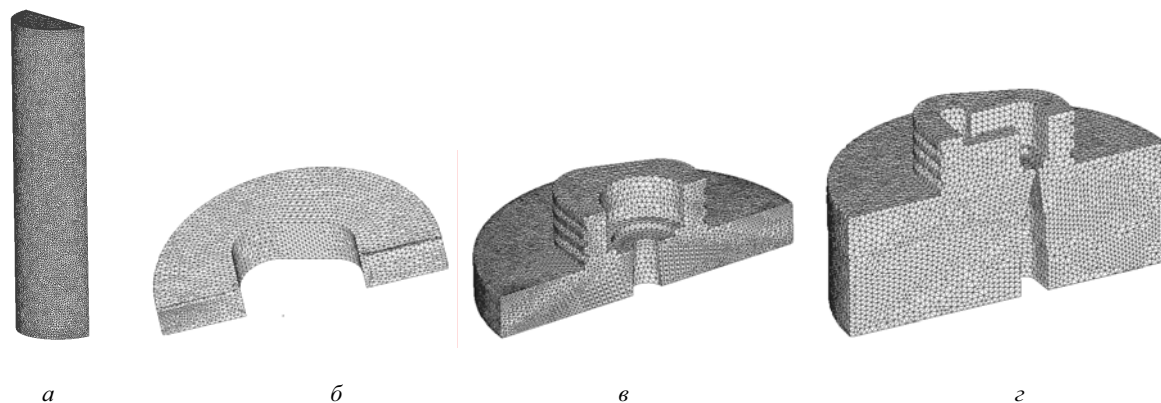


Рис. 3. Конечные элементы объектов виртуальной модели: а – слиток; б – наружное кольцо; в – форкамерная матрица по эффективному диаметру; г – форкамерная матрица по рабочему чертежу профиля

рассмотрении стадий процесса полунепрерывного прессования по изменению усилия прессования наблюдается четыре характерных зоны. В первой зоне (с 1-й по 12-ю секунду) происходит распрессовка металла в контейнере, далее выдавливание металла в форкамеру (с 12-й по 14-ю секунду) и прессование через очко матрицы с образованием характерного «горбика» на диаграмме (на 14-й секунде).

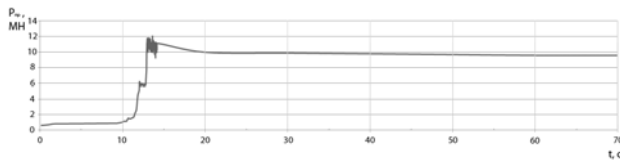


Рис. 5. Зависимость усилия прессования от времени по результатам компьютерного моделирования

Сравнение значений температуры поверхности отпрессованного профиля на выходе из ПОФМ компьютерной модели с результатами виртуального эксперимента (рис. 6) показало достаточную сходимость для инженерных расчетов (ошибка не превышает 5 %).

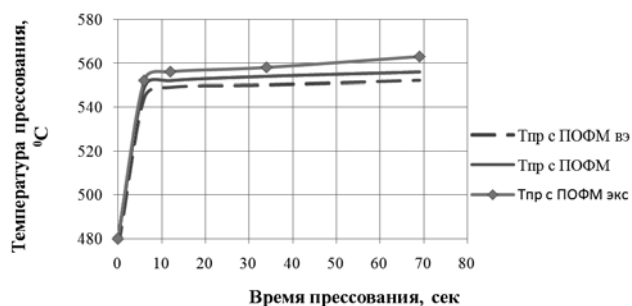


Рис. 6. Изменение выходной температуры строительного профиля КП 45302-1 из сплава АД31 при полунепрерывном прессовании на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 25 МН: $T_{пр}$ с ПОФМ и $T_{пр}$ с ПОФМ_{вз} — расчетные значения выходной температуры профиля с использованием ПОФМ по аналитической и компьютерной модели соответственно; $T_{пр}$ с ПОФМ_{экс} — экспериментальные значения

Хорошая сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных позволяет использовать вир-

туальную модель для дальнейшей доработки конструкции матрицы с целью обеспечения требуемого качества пресс-изделия.

Таким образом, в данной работе представлена методика проведения виртуального эксперимента процесса полунепрерывного прессования длинномерных строительных профилей из алюминиевых сплавов. Проведено компьютерное моделирование процесса прессования строительного профиля из сплава АД31. Сравнительный анализ полученных результатов показал возможность применения данной методики на практике при оптимизации технологии прессования и проектировании прессового инструмента, что в конечном счете должно привести к сокращению расходов при проектировании новой и усовершенствовании действующей технологии полунепрерывного прессования алюминиевых сплавов.

Библиографические ссылки

1. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями : монография / Н. Н. Довженко, С. В. Беляев, С. Б. Сидельников и др. ; Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2009.
2. Бережной, В. Л. Моделирование процессов прессования с использованием конечно-элементных программ: направления развития и ограничения // Технология легких сплавов. 2005. № 1–4. С. 129–136.
3. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов. М. : Мир, 1979.
4. Бережной В. Л., Щерба В. Н., Батурин А. И. Прессование с активным действием сил трения. М. : Metallurgiya, 1988.
5. Горячее прессование труб и профилей / Ю. И. Манегин, А. Е. Притоманов, Т. Шпителер и др. М. : Metallurgiya, 1980.
6. Hyunjoong Cho. Development of advanced techniques for identification of flow stress and friction parameters for metal forming analysis : dissertation / The Ohio State University. Columbus, 2007.
7. Вывод уравнений связи свойств алюминиевых сплавов с параметрами горячего деформирования / Я. М. Охрименко, В. Н. Щерба, А. В. Недугов и др. // Цв. металлы. 1983. № 2. С. 66–69.

I. Yu. Gubanov, S. V. Belyaev, P. O. Shirokov, A. V. Salatov, I. Yu. Maslov

FEATURES OF SIMULATION OF PROCESS OF SEMICONTINUOUS EXTRUSION OF ALUMINUM ALLOYS

The article presents technique for creation of a virtual model of semicontinuous extrusion of long structural shapes of aluminum alloy. Results of computer simulation of semicontinuous extrusion process with cooling step die of alloy AD31 are formulated and comparison of results of calculation with experimental data are presented.

Keywords: Semicontinuous extrusion of aluminum alloys, computer simulation, finite element method, forcibly cooled extrusion toolage.

© Губанов И. Ю., Беляев С. В., Широков П. О., Салатов А. В., Маслов И. Ю., 2010