

УДК 621.771.23:669.71

Столбченко М. Ю.  
Гридин А. Ю.

### ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛЯ ANSYS FLOTRAN ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКИ-ПРОКАТКИ ПОЛОС

Валковая разливка-прокатка является одной из наиболее компактных и энергосберегающих технологий получения тонких полос из стали и цветных металлов. Она позволяет совместить в одном очаге процессы кристаллизации расплавленного металла и его обработки давлением, что снижает производственные расходы более чем на 30 % [1]. Это дает возможность получить за одну технологическую операцию плоский продукт, максимально близкий по размерам и свойствам к готовой продукции и требующий минимальной дальнейшей обработки. Однако совмещение двух сложных процессов в одной установке с двухвалковым кристаллизатором требует учитывать большое количество конструктивных и технологических параметров, которые влияют на качество поверхности полосы, ее структуру и свойства (рис. 1).

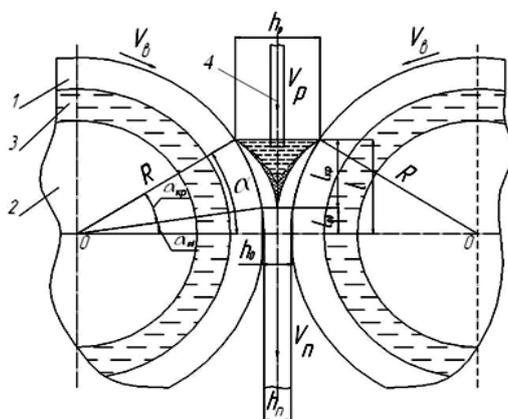


Рис. 1. Схема процесса валковой разливки-прокатки в двухвалковом кристаллизаторе:

$R$  – внешний радиус бандажа;  $l$  – общая длина зоны кристаллизации-деформации;  $\alpha$  – угол контакта металла с валком;  $l_{кр}$  – длина зоны кристаллизации;  $l_{об}$  – длина зоны деформации;  $h_p$  – поперечный размер ванны жидкого металла;  $h_0$  – толщина полосы в начале зоны деформации;  $h_n$  – толщина полосы на выходе из валков;  $V_0$  – окружная скорость валков (скорость разливки);  $V_p$  – скорость подачи жидкого металла;  $V_n$  – скорость выхода полосы из валков; 1 – бандаж составного вала; 2 – ось вала; 3 – охлаждающая жидкость; 4 – питатель (дюза) для подачи жидкого материала в межвалковое пространство

Основными проблемами при изготовлении полосы могут быть ранняя кристаллизация металла и его застревание в валках, несплошности в полосе, литая структура металла. Для определения оптимальных технологических режимов ведения процесса разливки-прокатки с учетом многих факторов может быть применено математическое моделирование с использованием метода конечных элементов. Данные, полученные в результате моделирования, позволяют в дальнейшем спрогнозировать основные физико-механические свойства полосы на выходе из кристаллизатора.

Моделированию процесса течения металла в валковом кристаллизаторе посвящено много работ. Одной из основных является работа Р. Гутри и Р. Тавареса [2], посвященная моделированию течения стали в кристаллизаторе. Получена модель, учитывающая теплоперенос, течение и кристаллизацию металла, а также имплементированы собственные экспериментальные данные о тепловом потоке от металла к кристаллизатору, однако для жидкого металла решена лишь гидродинамическая проблема. Также известны работы бразильских ученых по созданию модели течения металла [3], в которой методом конечных разностей

решается лишь температурная задача. Отличием работы К.-Д. Ху и Д.-Й. Жу [4] является использование программного пакета Ansys Flotran американской компании Ansys Inc. В работе рассмотрен вопрос применения модели Ананда для моделирования валковой разливки-прокатки магниевых сплавов. При этом в данной гидродинамической модели закристаллизовавшийся металл рассматривается как вязкая жидкость. Ранее на кафедре обработки металлов давлением НМетАУ была разработана модель [5] валковой разливки-прокатки, в которой металл рассматривался как жесткопластическое тело. Эта модель не позволяла адекватно рассчитывать распределение скоростей в металле при его температуре выше температуры плавления. Реализация модели по технологии User Programmable Features затрудняет ее использование с версиями Ansys выше 10. Во всех перечисленных работах расчет течения металла ведется отдельно от инструмента. В предлагаемой модели используется совместное тепловое решение системы валок-металл, что позволит учесть влияние большего числа технологических и конструктивных факторов на процесс разливки-прокатки. Для реализации модели течения жидкого металла и его кристаллизации был выбран метод конечных элементов как один из наиболее эффективных численных методов решения сложных задач. В качестве инструмента была выбрана программная система Ansys, которая является очень мощным и универсальным пакетом программ для конечно-элементного решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела, задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена. Данный пакет широко применяется в науке и промышленности во всем мире. Одним из неоспоримых преимуществ пакета Ansys является возможность создания и реализации пользовательских моделей, которые имеют вид макросов, записанных на языке APDL, наряду со стандартными.

Целью данной работы является создание модели валковой разливки-прокатки, которая позволит получить данные о полях температуры и скорости в зоне кристаллизации-деформации и учитывала бы влияние вращения валков и других технологических параметров валковой разливки, а также ее реализация в среде Ansys с использованием модуля Flotran.

Математическая модель. Для моделирования процесса валковой разливки-прокатки можно использовать стандартный модуль Ansys Thermal Structuremechanic, который рассматривает металл как упруго-пластическую систему, либо модуль расширения Ansys Flotran, который рассматривает металл как термовязкостную систему. В условиях больших градиентов температуры и больших степенях деформации, которые имеют место в процессе валковой разливки-прокатки, целесообразно было использовать модуль Flotran и представить жидкий металл как вязкую жидкость. Ansys Flotran – гидрогазодинамический модуль для анализа двумерных и трехмерных полей потока жидкости или газа. Он позволяет задать следующие степени свободы: скорость потока; давление; температура; диссипация турбулентной энергии; многокомпонентные жидкости (до 6 компонент); кинетическая энергия турбулентности. Конечный элемент fluid 141 является двухмерным четырех узловым и может выступать в качестве элемента жидкости или твердого тела. Для обрабатываемого материала решаются уравнения течения в потоке вязкой среды и баланса энергии. В общем виде для трехмерного течения уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho V_x C_p T) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho V_y C_p T) + \frac{\partial}{\partial Z}(\rho V_z C_p T) = \\ \frac{\partial}{\partial X} \left( K \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( K \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( K \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + Q_v, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность;

$C_p$  – теплоемкость;

$T$  – температура;

$V$  – скорость;

$K$  – теплопроводность;

$Q_v$  – объемный входящий тепловой поток.

Скорости определяются в соответствии с законом сохранения импульса, давление определяется в соответствии с законом сохранения массы, температура определяется в соответствии с законом сохранения энергии. В области жесткого тела (бандаж валка) решается только уравнение сохранения энергии. Конвекция и теплопроводность в металле задаются законом Фурье [6]:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V_X \frac{\partial T}{\partial X} + V_Y \frac{\partial T}{\partial Y} + V_Z \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial X} \left( K_X \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( K_Y \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( K_Z \frac{\partial T}{\partial Z} \right), \quad (2)$$

где  $\ddot{q}$  – объемная плотность теплового потока.

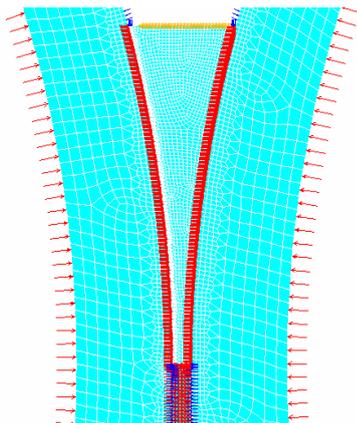


Рис. 2. Граничные условия, заданные при моделировании

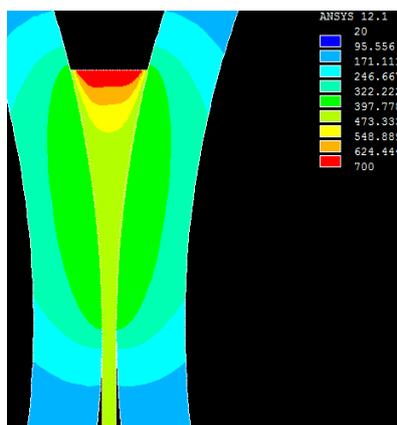
Граничные условия (рис. 2) были заданы следующими: внутри бандажей охлаждение конвекцией, на внешней стороне бандажей и на поверхности полосы свободная конвекция, температура разливаемого металла постоянна в точке входа струи в ванну металла. Модель двумерная с плоскими четырехузловыми элементами типа fluid 141.

В результате моделирования получены температурные поля в металле и бандажах для различных скоростей вращения валков (рис. 3), а также данные о скоростях течения металла по длине зоны кристаллизации-деформации (рис. 4). Анализ полученных данных показал, что модель вполне адекватно передает качественное распределение температуры и скорости течения металла в кристаллизаторе. Для количественной оценки достоверности модели были проведены эксперименты на лабораторной машине валковой разливки с аналогичными технологическими параметрами. Была измерена температура полосы на выходе из кристаллизатора. Сравнение данных моделирования и данных эксперимента показало достаточно высокую точность модели и позволяет говорить о достоверности данных моделирования. При помощи математического моделирования можно получить значения оптимальной температуры и скорости разливки, при которых будут достигнуты одновременно сплошность полосы и в то же время не будут достигнуты недопустимые для оборудования нагрузки. Это позволит получить на выходе полосу высокого качества и с заданными механическими свойствами. Также анализ температурного поля металла позволяет определить, где проходят линии ликвидус и солидус, а также определить протяженность зон кристаллизации и деформации. Анализ температурного поля бандажа позволяет правильно оценить влияние температуры и расхода охлаждающей жидкости на температуру полосы. Дальнейшее улучшение модели можно проводить по трем основным направлениям: учет влияния дополнительных факторов разливки-прокатки, таких как смазка поверхности бандажей, влияние боковых ограничителей и т. д.; более точное описание течения жидкого металла, в том числе, применение модели вязкости неньютоновской жидкости; повышение точности получаемых результатов.

Исходные данные. С помощью Ansys Flotran было проведено пробное моделирование течения металла через двухвалковый кристаллизатор. В качестве разливаемого металла был выбран чистый алюминий, а в качестве материала бандажа сталь со следующими физическими свойствами: теплопроводность металла валка 50 Вт/м<sup>2</sup>К; теплопроводность разливаемого металла 200 Вт/м<sup>2</sup>К; теплоемкость металла валка 462 Дж/кгК; теплоемкость разливаемого металла 900 Дж/кгК; плотность металла валка 7800 кг/м<sup>3</sup>; плотность разливаемого металла 2700 кг/м<sup>3</sup>. Технологические и конструктивные параметры разливки были взяты максимально приближенными к возможностям лабораторной установки [7]: диаметр валка 370 мм; температура охлаждающей воды 20 °С; высота зоны кристаллизации-деформации 50 мм; скорость вращения валков 6 об/мин; толщина полосы 3 мм; температура разливаемого металла 700 °С. Были сделаны следующие допущения: бандажи недеформируемые, течение расплава ламинарное. Гра-



а



б

Рис. 3. Распределение температуры в металле при прокатке в двухвалковом кристаллизаторе, °С:

а – для скорости вращения валков 2 об/мин;

б – для скорости вращения валков 6 об/мин

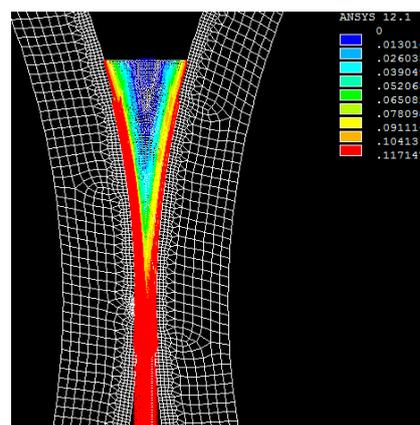


Рис. 4. Скорость течения металла при прокатке в двухвалковом кристаллизаторе (векторный вид), м/с

## ВЫВОДЫ

Результаты моделирования показали возможность создания математической модели процесса валковой разливки-прокатки при помощи модуля Ansys Flotran. Модель позволяет качественно описать процесс валковой разливки, обладает большими возможностями по заданию исходных параметров процесса. Полученные результаты моделирования близки к результатам экспериментов. Дальнейшее усовершенствование модели позволит широко применять ее для определения оптимальных параметров процесса и учитывать большее количество факторов, влияющих на валковую разливку-прокатку.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данченко В. М. Теорія процесів обробки металів тиском : підручник / В. М. Данченко, В. О. Гринкевич, О. М. Головка. – Дніпропетровськ : Пороги, 2008. – 370 с.
2. Guthrie R. I. L. Mathematical and physical modelling of steel flow and solidification in twin roll (horizontal belt thin strip casting machines) / R. I. L. Guthrie, R. P. Tavares // *Inter Conf on CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation*. CSIRO. – 1997. – P. 41–54.
3. Santos C. A. Modeling of solidification in twin-roll strip casting / C. A. Santos, J. A. Spim Jr., A. Garcia // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – № 102. – P. 33–39.
4. Hu X.-D. Simulation of Inelastic Deformation and Thermal Mechanical Stresses in Twin-roll Casting Process of Mg Alloy / X.-D. Hu, D.-Y. Ju. // *Key engineering materials*. – 2007. – № 340–341. – P. 877–882.
5. Гридин О. Ю. Математичне моделювання процесу валкової розливки-прокатки за допомогою програми Ansys / О. Ю. Гридин, В. М. Данченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 5. – С. 90–94.
6. Release 11.0 Documentation for Ansys. Theory Reference // ANSYS Inc. – 2009.
7. Экспериментальная установка валковой разливки-прокатки тонких полос / А. Ю. Гридин, И. К. Огинский, В. Н. Данченко, Фр.-В. Бах // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 5. – С. 46–51.

Столбченко М. Ю. – аспирант НМетАУ;

Гридин А. Ю. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: stolbchenkom@gmail.com