

И.Ю. Приходько, М.А.Дедик

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКИ-ПРОКАТКИ АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Институт черной металлургии НАН Украины

Представлен анализ постановки задачи и результатов математического моделирования процесса валковой разливки-прокатки алюминия методом конечных элементов. Разработанная математическая модель процесса валковой разливки-прокатки позволяет вычислять поля температуры, скорости, а также напряженно-деформированное состояние затвердевшего металла в очаге кристаллизации-деформации и валков-кристаллизаторов.

Ключевые слова: валковая разливка-прокатка, алюминий, метод конечных элементов, температурные поля, термомеханические напряжения, кристаллизация металла.

Введение. Одной из наиболее перспективных энергосберегающих технологий производства металлических полос является процесс валковой разливки-прокатки. Суть данного процесса производства тонкого плоского проката заключается в формировании полосы непосредственно из жидкого металла путем кристаллизации и последующей деформации его между двумя вращающимися валками - кристаллизаторами (рис.1).

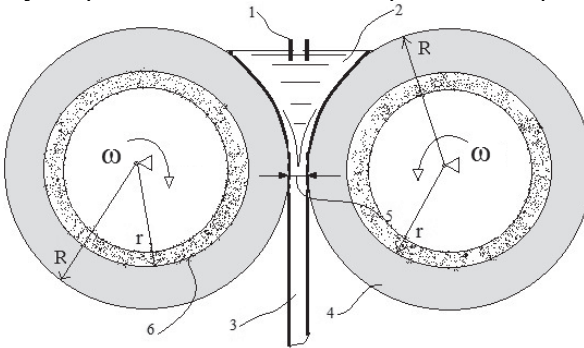


Рис. 1. Схема формирования полосы непосредственно из жидкого металла. – сопло для подачи жидкого металла; 2 – жидкий металл; 3 – металл в твердом состоянии; 4 – бандаж валка - кристаллизатора; 5 – зона деформации; 6 – охлаждающая жидкость; R – внешний радиус валка, мм; r – внутренний радиус валка, мм; ω – угловая скорость валков, рад/с.

После непрерывной валковой разливки-прокатки материал без промежуточного подогрева поступает в прокатную клеть, где обжимается до заданной толщины, а затем поступает на участок контролируемого

охлаждения для формирования необходимых микроструктуры и механических свойств. После охлаждения полоса сматывается в рулоны.

В настоящее время диапазон толщины стальных полос, производимых в агрегатах непрерывной валковой разливки-прокатки, составляет для промышленных установок от 1 до 5 мм, на лабораторных установках – 0,1...3 мм [1]. При осуществлении процесса валковой разливки-прокатки существует ряд проблем, связанных с организацией стабильных и безопасных режимов, а также с обеспечением качества выпускаемой продукции. К ним относятся ранняя кристаллизация металла, несплошности и литая структура металла, неудовлетворительное состояние поверхности, неплоскостность полос [2]. Для разработки оптимальных режимов процесса разливки-прокатки необходимо построение адекватной математической модели, учитывающей комплекс факторов, определяющих одновременно кристаллизацию и деформацию металла.

Состояние вопроса. С учетом развития современной вычислительной техники целесообразно проводить разработку математической модели с помощью численных методов. На данный момент использование метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования подобных процессов является наиболее эффективным решением. Изучению и моделированию процесса валковой разливки-прокатки металла посвящено множество работ. Среди них наиболее известны работы, направленные на изучение течения жидкого металла и его затвердевания в двухвалковом кристаллизаторе [3,4]. Чаще всего объектом математического моделирования является процесс вертикальной разливки-прокатки, однако опубликованы также результаты моделированию и горизонтальной разливки - прокатки [5, 6].

Мо и Гойдалом [6] была разработана модель для расчета температуры, напряжений и деформаций в процессе валковой разливки-прокатки алюминия. В модель включены эффекты свободной и вынужденной конвекции расплавленного металла с воздухом и валками, усадки затвердевшего металла, выделения скрытой теплоты в зоне межфазового перехода, а также неоднородности деформации в зоне упрочнения полосы. Джарри и соавт. [7] предложена термомеханическая модель для процесса непрерывного литья через валковые кристаллизаторы различных сплавов. В модели связаны процессы термокинетического затвердевания и механической деформации при прокатке. В этой работе контактное давление определено с учетом взаимовлияния теплопереноса между валками и металлом и закономерностей изменения напряжений в очаге кристаллизации - деформации.

Сахаи и Саксена в работе [8] моделировали процесс валковой разливки-прокатки алюминиевого сплава. Использовали модель Ананда, которая учитывает упругие, пластические и температурные деформации. При построении этой модели авторами были приняты следующие

приближения: задача решалась в двумерной постановке; все механические и термические свойства алюминия, кроме вязкости и теплоемкости, не зависят от температуры. Приняты постоянные коэффициенты трения и теплоотдачи между валками и полосой.

Весомый вклад в разработку методов расчета параметров процесса валковой разливки-прокатки внесли ученые кафедры обработки металлов давлением Национальной Металлургической Академии Украины (НМетАУ). Ими была разработана математическая модель валковой разливки-прокатки, где металл рассматривается как жестко-пластическое тело [9]. В то же время эта модель давала сомнительные результаты распределение полей скоростей металла при его температуре выше температуры плавления. Позже учеными НМетАУ была разработана модель валковой разливки-прокатки, где металл заготовки рассматривается как термовязкая система [10]. Данная модель базировалась на решении уравнения течения потока в вязкой среде и баланса энергии. В результате моделирования были получены расчётные температурные поля в металле и валках, а также данные о скорости течения металла в зоне кристаллизации-деформации.

Математическая модель

Разработку математической модели осуществляли с использованием явного интегрирования по времени. Модель валковой разливки-прокатки рассматривали в трехмерной постановке. С учетом симметричности процесса при построении модели использовалась лишь ее симметричная часть с плоскостью симметрии в середине толщины полосы.

В качестве примера валок с длиной бочки 130 мм моделировали в виде полого цилиндра с внешним диаметром 370 мм и внутренним 300 мм. Исходную заготовку (жидкий металл в форме «ванны», образованной валками-кристаллизаторами и боковыми ограничителями), а также валок разбивали четырехгранными объемными конечными элементами рис. 2.

Для решения поставленной задачи использовали связанный термомеханический расчет. Валок моделировали как абсолютно жесткое тело с механическими свойствами для стали: модуль Юнга $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, плотность $\rho = 7780$ кг/м³.

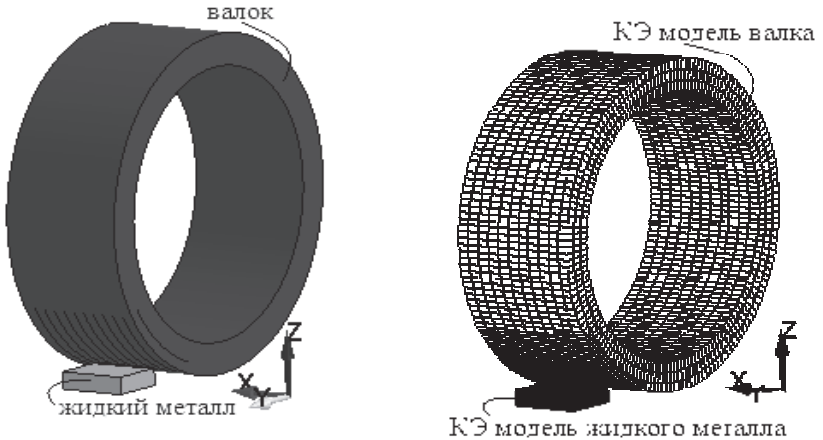
При решении тепловой задачи учитывали теплопроводность K и удельную теплоемкость C в зависимости от температуры валка (см. табл. 1).

Боковые ограничители моделировали в виде двух жестких стенок, расстояние между которыми приняли равным 94 мм. Для учета фазового перехода металла из жидкого в твердое состояние в процессе валковой разливки-прокатки использовали модель упруго-вязкопластического материала (алюминия) с механическими свойствами, зависящими от температуры. Пластическое течение металла моделировали с учётом

зависимостей напряжений σ от деформаций ε при различной температуре t (рис. 3).

Таблица 1. Тепловые свойства валка в диапазоне температуры 100-700 °С.

Температура, °С	100	200	300	400	500	600	700
С, Дж/(кг·°С)	500	550	600	700	800	900	980
К, Вт/(м·°С)	45	40	39	37	36	34	29



а)

б)

Рис.2. Геометрическая (а) и конечноэлементная (б) модели процесса валковой разливки-прокатки (симметрия - в плоскости XY).

Эффекты вязкости учитывали с использованием модели Саймондса-Купера [11], в которой напряжение текучести определяется по формуле:

$$\sigma_y(\dot{\varepsilon}^P, \varepsilon^P) = \sigma_y^s(\varepsilon^P) \left[\left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}^P}{C(T)} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}^P$ – скорость деформации, с-1; ε^P – степень деформации, $\sigma_y^s(\varepsilon^P)$ – напряжение текучести в статических условиях при комнатной температуре, Н/мм²; С – параметр вязкости материала, p – экспоненциальный параметр вязкости материала.

Значения параметров вязкости С и p модели Саймондса-Купера в зависимости от температуры приведены на рис. 4(а, б).

Упругие свойства алюминия (E – рис. 4(а), μ – рис. 4(б)), а также предел текучести σ_T – рис. 4(в) и коэффициент линейного расширения α – рис. 4(г)) также задавали в виде зависимостей от температуры [12].

При вычислении изменения температуры затвердевания металла в процессе валковой разливки-прокатки решали нестационарную

нелинейную тепловую задачу. При этом свойства материала принимали соответствующими температуре точки Гаусса.

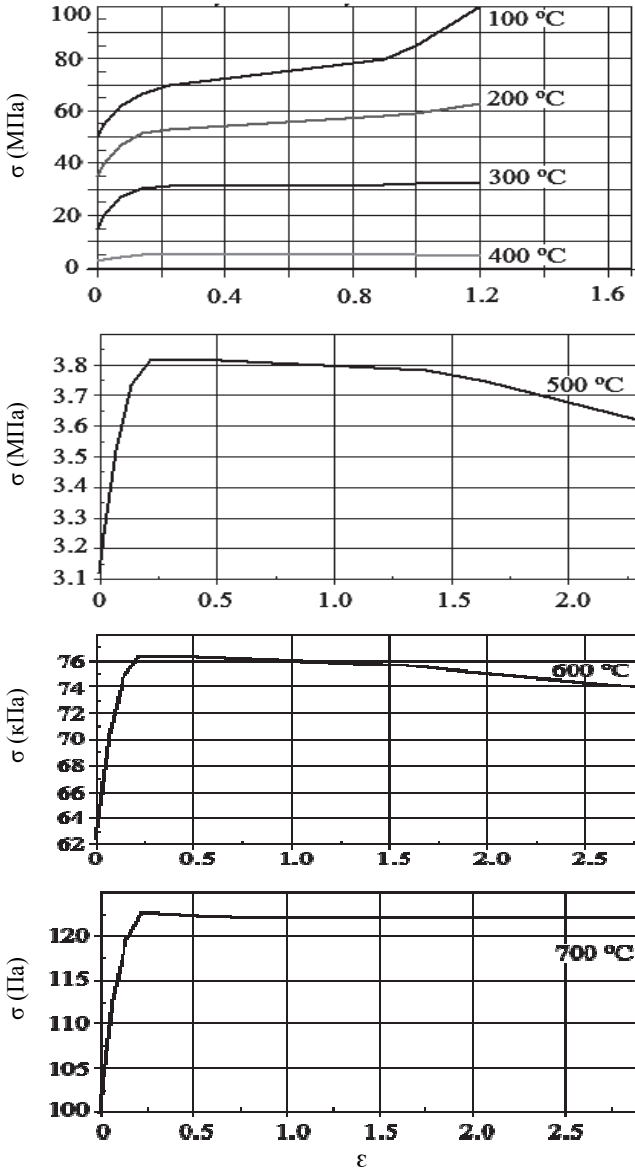


Рис. 3. Графики зависимости напряжений от деформаций алюминия при температуре 100-700°C

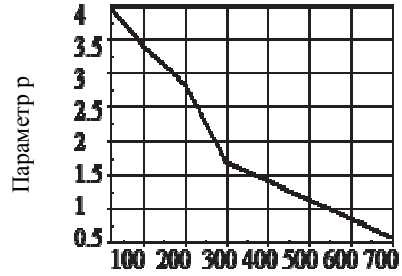
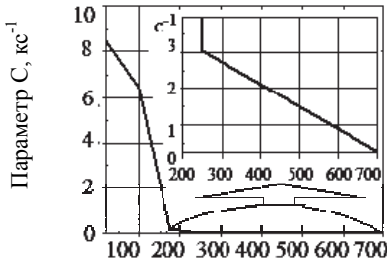
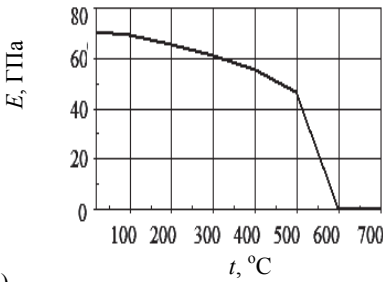
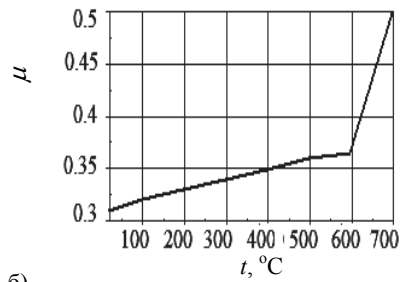
а) $t, ^\circ\text{C}$ б) $t, ^\circ\text{C}$

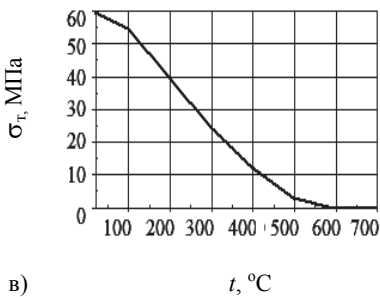
Рис. 4. Значение параметров вязкости C (а) и p (б) модели Саймондса-Купера для алюминия в диапазоне температуры 100-700 $^\circ\text{C}$ [11]



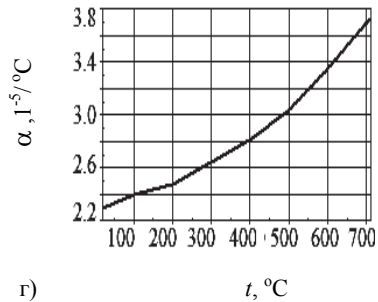
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Изменение E (а), μ (б), σ_T (в) и (г) алюминия в диапазоне температуры 100-700 $^\circ\text{C}$

Использовали диагонально масштабируемый итерационный метод сопряженных градиентов. Для расчета температуры в процессе фазового

перехода использовали метод удельной теплоемкости. Удельную теплоемкость и теплопроводность задавали также в виде функций от температуры (рис. 6(а, б)). Значения скрытой теплоты кристаллизации алюминия приняли равной 390 кДж/кг, температуру солидуса 570⁰С, ликвидуса 670⁰С. Плотность расплавленного алюминия 2350 кг/м³.

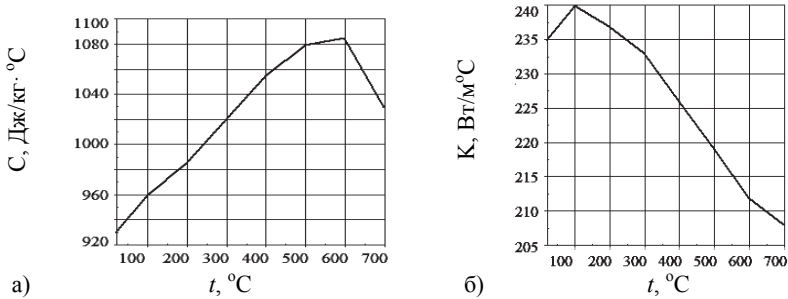


Рис. 6. Изменение удельной теплоемкости (а) и теплопроводности (б) алюминия в диапазоне температуры 100-700 °С. [13]

Как известно [14], в процессе валковой разливки-прокатки в зоне между валком и жидким металлом имеет место прилипание, а в зоне деформации затвердевшего металла имеет место скольжение, где коэффициент трения уменьшается. Принятая зависимость коэффициента трения f от температуры приведена на рис. 7.

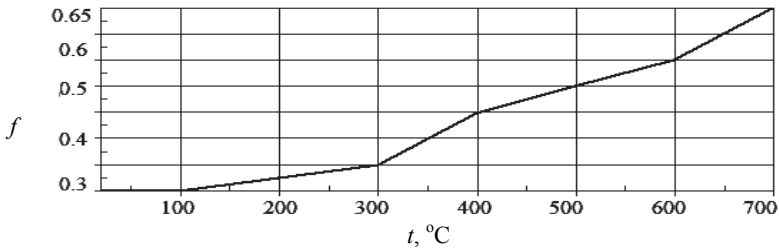


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от температуры

Коэффициент теплоотдачи в контакте валка с заготовкой принимали равным 15 кВт/м²·°С [15]. Начальная температура валка-кристаллизатора и расплавленного металла принята равной, соответственно, 20 и 700⁰С. Охлаждающую жидкость с температурой 20⁰С внутри валка моделировали в виде конвективного теплообмена (коэффициент теплоотдачи 25 кВт/м²·°С). Угловую скорость валка приняли равной 0,75 рад/с.

Анализ результатов моделирования

В результате решения определено изменение температурного поля при межфазовом переходе и пластическом деформировании в процессе валковой разливки-прокатки. При заданных условиях процесса металл охлаждается до температуры 168°C .

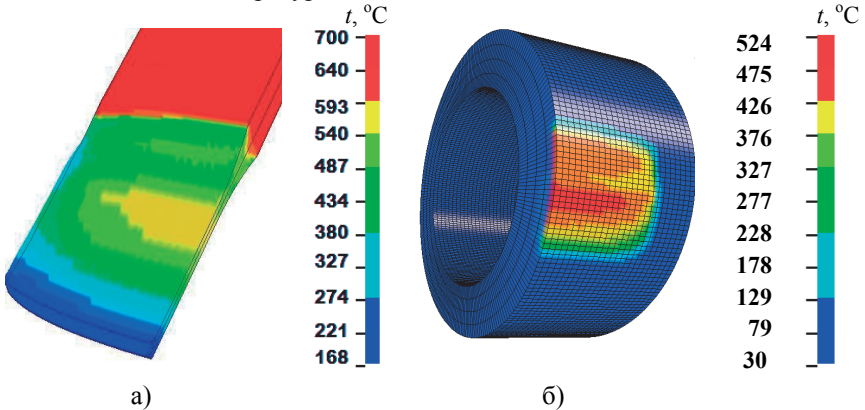


Рис.8. Температурные поля в разливаемом металле (а) и валке (б) в процессе валковой разливки-прокатки

Максимальное значение напряжений в металле в зоне кристаллизации-деформации составляет 580 МПа (рис. 9).

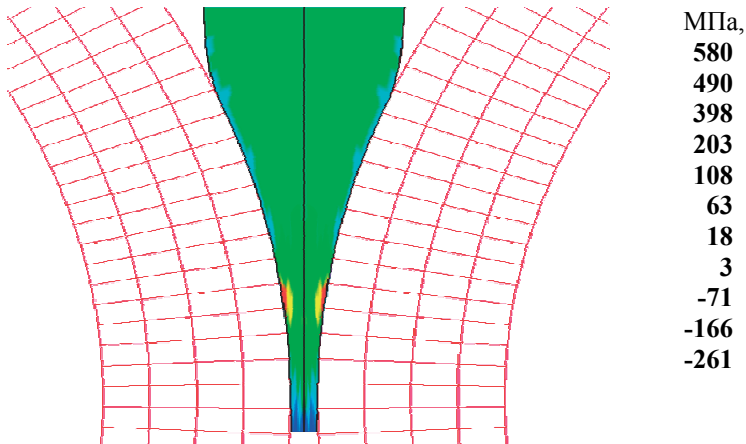


Рис. 9. Давление в очаге кристаллизации-деформации в процессе валковой разливки-прокатки

Значение силы валковой разливки-прокатки, полученное путем конечноэлементного моделирования составило 2,52 МН. В то же время значение силы составило 2,33 МН при использовании аналитической формулы [16]:

$$F = 1.55 \cdot \sigma_m \cdot B \cdot \left[1 + \frac{\sqrt{R\Delta h}}{4(h_1 - h_2/2)} \right] \cdot \sqrt{R\Delta h} \quad (2)$$

где σ_m – напряжение текучести металла при заданных условиях процесса, (143 МПа); B – ширина металла, (10 мм); R – внешний радиус вальки, (150 мм); h_1 – толщина металла после кристаллизации, (9,5 мм); h_2 – толщина металла на выходе из вальки, (2,5 мм); $\Delta h = h_1 - h_2$ – абсолютное обжатие и $h_{cp} = h_1 - \Delta h/2$ – средняя толщина затвердевшего металла.

Значение толщины металла (9,5 мм) после кристаллизации использовали на основании конечноэлементного моделирования. При этом расхождение результатов расчётов с использованием аналитического и конечно-элементного методов составляет 8,1%, что позволяет с достаточной точностью использовать аналитическую формулу (2) для определения длины выходной зоны затвердевшего металла в очаге кристаллизации-деформации при известных значениях силы разливки-прокатки (измеренных или рассчитанных с использованием МКЭ) и других параметров процесса, входящих в выражение (2).

Построенная модель позволяет анализировать изменение полей вертикальных скоростей металла в очаге кристаллизации-деформации (рис. 10).

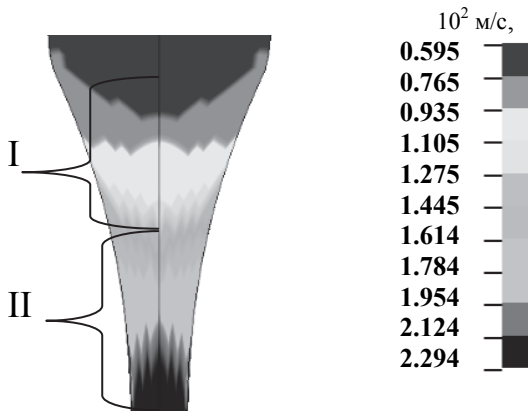


Рис. 10. Поле скоростей металла в очаге кристаллизации-деформации в процессе валковой разливки-прокатки; I – зона фазового перехода, II – зона однородной деформации

На рис. 10 виден характер распределения скорости металла по длине и «высоте» очага кристаллизации- деформации. В зоне I имеет место неравномерное распределение скорости по толщине. На контактной поверхности скорость металла выше, чем в центре, так как затвердевший металл «выдавливает» жидкий металл вверх, тем самым уменьшая его скорость. Во II-й зоне - более равномерное распределение скорости металла.

Выводы

Разработанная математическая модель процесса валковой разливки- прокатки позволяет вычислять поля температуры, скорости, а также напряжённо-деформированное состояние затвердевшего металла в очаге кристаллизации-деформации и валков-кристаллизаторов. Это открывает перспективы определения основных параметров процесса, при которых минимальна вероятность возникновения проблем его стабильного протекания в различных условиях.

1. *Zapuskalov N.* Comparison of continuous strip casting with conventional technology / N. Zapuskalov // *ISIJ International*. – 2003. – Vol. 43 (№ 8). – P. 1115–1127.
2. *Данченко В.Н.* Кардинальные изменения технологии и проблемы теории производства стального проката / В. Н. Данченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – № 8–9. – С. 13–19.
3. *K. Miyazawa and J. Szekely*, “A Mathematical Model of the Splat Cooling Process Using the Twin-Roll Technique”, *Metall. Trans.* 12A (1981), 1047-1056.
4. *S. H. Seyedein and M. Hasan*, “Numerical Investigation of Coupled Turbulent Flow, Heat Transfer, and Macroscopic Solidification in a Vertical Twin-Roll Thin-Strip Caster”, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 32, (1997), 221-246.
5. *J. G. Chang and C. I. Weng*, “Numerical Modelling of Twin-Roll Casting by the Coupled Fluid Flow and Heat Transfer Model”, *Int. J. for Num. Methods in Engineering*, 40 (1997), 493-509.
6. *A. Mo and S. H. Hoydal* , “Mathematical modeling of temperature, melt flow, deformation and stress in aluminum twin roll casting”, *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI*, (1993) ,671-677.
7. *P. Jarry, D. Toitot and P.Y. Menet*, “Thermomechanical Model for Hypelastic-Viscoplastic Behavior in a Solidifying Body”, *Light Metals*, (1996), 905-911.
8. *Y. Sahai, A. Saxena*, “Modeling of twin-roll thin strip casting of aluminum alloys”, *Light Metals*, (2002), 206-213.
9. *Гридин А. Ю.* Математическое моделирование процесса валковой разливки- прокатки с помощью программы Ansys. / А. Ю. Гридин, В. М. Данченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность* – 2008. – № 5 – С. 90-94.
10. *Столбченко М. Ю., Гридин А. Ю.* Применение модуля Ansys Flotran для моделирования процесса валковой разливки-прокатки полос / *Обработка металлов давлением*. – 2011. – №3(28). – 41-44с.
11. *J. Winklhofer, G. Trattniga, C. Lindb, C. Sommitsch, H. Feuerhuber*, "Simulation of Aluminium Sheet Metal Deep Drawing at Elevated Temperatures using LS-Dyna", *Metallumformung III, LS-DYNA Forum Bamberg 2010*, 2010, C-III-1– C-III-8p.

12. Алюминий: свойства и физическое металловедение: Справ, изд. Пер. с англ. / Под ред. Хэтча Дж. Е. - М.: Металлургия, 1989. 422 с.
13. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 102 с.
14. Бровман М. Я. Непрерывная разливка металла. – М.: "ЭКОМЕТ", 2007. - 484с.
15. Pedram Mehraram. "Measuring Heat Transfer during Twin Roll Casting of Metals" \ A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Mechanical Engineering \ Waterloo, Ontario, Canada, 2010, 135p.
16. J. N Harris, Mechanical Working of Metals: Theory and Practice, \ Vol. 36, International Series on Materials Science and Technology, 1983, 118p.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук С.А.Воробьем*

І.Ю.Приходько, М.О.Дедік

Моделювання процесу валкового розливання-прокатки алюмінію методом кінцевих елементів

Представлено аналіз постановки задачі та результатів математичного моделювання процесу валкової розливки-прокатки алюмінію методом кінцевих елементів. Увагу сконцентровано на дослідженні температурних та швидкісних полів в осередку кристалізації-деформації, а також напружено-деформованого стану затверділого металу і валків-кристалізаторів.

Ключові слова: валкова розливка-прокатка, алюміній, метод кінцевих елементів, температурні поля, термомеханічна напруга, кристалізація металу.

I.Y Prikhodko Dedik MA

Modeling valkovoe casting-rolling of aluminum by finite element method

Presents an analysis of the problem and the results of mathematical modeling of the roll-casting aluminum rolling finite element method. The focus is on the study of the temperature and velocity fields in the outbreak of crystallization-deformation and stress-strain state of the solidified metal mold and roll-crystallization.

Keywords: roll casting-rolling, aluminum, finite element method, the temperature field, thermomechanical stresses, crystallization of the metal.