МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКИ-ПРОКАТКИ МЕТАЛЛОВ

© А. С. Нурадинов, Н. С. Уздиева, С. С-С. Ахтаев, М. Р. Исаева
ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

В данной работе представлены результаты изучения процесса валковой разливки с применением методов физического и математического моделирования. Показано, что стабильность процесса валковой разливки-прокатки металлов зависит от таких технологических параметров, как температура перегрева, скорость разливки и уровень расплава в межвалковом пространстве. Для использованных в процессе исследования сплавов получены зависимости оптимальной скорости разливки-прокатки от толщины полосы, угла мениска металла, радиуса валков и температуры перегрева расплавов.

Экспериментальная составляющая данных исследований, выполненная в лабораторных условиях на установке валковой разливки металлов, подтвердила адекватность и высокое качество расчетных режимов разливки для всех изучаемых сплавов. Полученная для описания изучаемых процессов валковой разливки металлов математическая модель показала высокую корреляцию теоретических и экспериментальных данных, что свидетельствует о корректности данной модели.

Ключевые слова: двухвалковое литье, межвалковый зазор, валок-кристаллизатор, расплав, математическая модель, литая заготовка, металлопрокат, математическое и физическое моделирование.

В настоящее время на металлургических предприятиях России при производстве листового металлопроката из различных сплавов применяются в основном классические технологии, суть которых – получение заготовок в виде слитков или непрерывнолитых заготовок и их дальнейшей механической и термической обработки [1]. Однако современные тенденции в развитии металлургии в мире способствуют использованию производителями более совершенных технологий. Примером таких технологий является валковая разливка-прокатка металлических сплавов, особенность которой – получение непосредственно из жидкого металла листового металлопроката.

Общим процессом для всех технологических схем литья на валковый кристаллизатор является намораживание корок из перегретого расплава металла на рабочих участках их поверхностей [2]. В процессе валковой разливки на затвердевание металла благоприятно влияют такие факторы, как высокая интенсивность теплообмена, отсутствие зазоров между кор-

кой и поверхностью валка-кристаллизатора, беспрепятственная подача перегретого расплава к фронту кристаллизации, что способствует получению плотной литой заготовки с мелкокристаллической структурой.

Существуют следующие схемы получения металлических заготовок при валковой разливке:

- с намораживанием на одном валке (рис. 1, а, б);
- с намораживанием на двух валках, вращающихся в противоположные стороны, со сваркой корочек без прокатки, то есть литье в валковый кристаллизатор по схеме жидкой прокатки (рис. 1, в);
- с намораживанием на двух валках с прокаткой затвердевших корок, то есть по схеме бесслитковой прокатки ленты – литье в валковый кристаллизатор (рис. 1, г-е).

Специфика литья в валковый кристаллизатор по принципу жидкой прокатки (рис. 1, в) состоит в образовании листовой заготовки в результате сварки двух корок, намерзших на

Рис. 1. Схемы валковой разливки-прокатки металлов [2]:

1 – питатель расплава; 2 – валок-кристаллизатор; 3 – литая заготовка

поверхностях двух вращающихся валков. При этом заготовка, выходящая из валков, вследствие того, что срастание фронта кристаллизации происходит неравномерно, и жидкая фаза не выдавливается полностью из твердожидкой части в зоне обжатия, может содержать в себе жидкую фазу.

Для данного случая, толщина ленты X рассчитывается как:

$$X = \xi_T + \xi_{ж}, \quad (1)$$

$\xi_{ж}$ – приведенная толщина жидкой части отливки.

Вследствие процессов теплообмена с окружающей средой и перераспределения температуры в вышедшей из валков ленте происходит полное затвердевание заготовки, которая не прокатывается, и по этой причине скорости движения корок в ванне и ленты (после ее выхода из ванны) соответствуют линейной скорости вращения валков.

В случае литья в валковый кристаллизатор с прокаткой (бесслитковая прокатка листа) лента образуется вследствие прокатки корок, намерзших на поверхностях валков (рис. 1, z-e). Толщина ленты, выходящей из валков, с учетом степени обжатия намерзших корок, определяется как произведение суммарной толщины намерзших на валках корок на величину $(1 - \varepsilon)$:

$$X = 2\xi_B(1 - \varepsilon), \quad (2)$$

где ξ_B – толщина корок в зоне срастания встречных фронтов кристаллизации; ε – степень обжатия намерзших корок.

В зоне прокатки имеют место следующие технологические процессы: обжатие намерзших на валках корок; быстрое снижение температуры заготовки вследствие интенсивного теплообмена с кристаллизатором; изменение угла наклона и размеров первичных кристаллов. Величина зоны деформации определяется

из условия формирования ленты высокого качества со структурой без трещин и разрывов, то есть соответствующей горячекатаной структуре. В случае, когда совмещается литье с прокаткой, скорость перемещения корок в зоне замораживания меньше линейной скорости движения валков, а скорость ленты при выходе из валков – больше вследствие прокатки.

Хотя в России нет ни одной действующей промышленной установки валковой разливки металлов, в мировой металлургии использование технологии бесслитковой прокатки листа имеет более длительную историю [3-5].

К концу XX века в мировой металлургической отрасли действовало около 160 литейных машин с совмещением литья и прокатки [6]. Данные машины применялись для производства проката и листов из мягких сплавов (алюминиевые и пр.), используемых в таких отраслях, как пищевая и строительная. Однако в машиностроении, ракетостроении и авиации наиболее востребованными являются, соответственно, железо-углеродистые сплавы (стали) и высокопрочные алюминиевые сплавы (систем Al-Cu и Al-Zn). На сегодняшний день в России вообще отсутствует технология получения листовой металлопродукции методом бесслитковой прокатки, а для высокопрочных алюминиевых сплавов такой технологии нет даже в мировой металлургии, что обусловлено очень широким (более 100°C) интервалом температуры кристаллизации сплавов этих систем.

Авторами данной работы использованы методы математического и физического моделирования с целью исследования и разработки технологических режимов бесслитковой прокатки высокопрочных алюминиевых сплавов, а также углеродистых сталей. При решении поставленной задачи – разработка математической модели процессов валковой разливки металлов, авторами использовался программный пакет Comsol. Это интегрированная среда численного моделирования, которая позволила выполнить анализ влияния скорости валковой разливки металлов на образование полос из исследуемых металлических сплавов толщиной 1, 2, 3 и 4 мм в условиях различных перегревов их расплавов (5÷60°C). Реализация экспе-

римента осуществлялась при следующих технологических параметрах: радиус валков (R) – 200÷400 мм; угол мениска (β) – 33°; интенсивность теплоотвода на границе металл-валок – 15000 Вт/(м²·К); ширина полосы – до 200 мм. Уровень металла в кристаллизаторе (H) определяли из соотношения: $H = R \cdot \sin\beta$. Были приняты допущения: уровень расплава в жидкой ванне остается постоянным за счет соблюдения баланса объема подающегося металла со скоростью вращения валков и теплоперенос в направлении, перпендикулярном плоскости поперечного сечения зоны кристаллизации-деформации, пренебрежительно мал. Учитывая симметричность межвалкового пространства, при моделировании рассматривали 1/2 часть объема расплава металла. При этом принималось, что в начальный момент времени температура расплава соответствует температуре металла в промежуточном ковше.

В табл. 1 приведены исходные данные для моделирования – теплофизические характеристики исследуемых сплавов, определенные методом дифференциально-термического анализа. А также были заданы пределы следующих технологических параметров: толщина полосы (δ – 2÷4 мм), угол мениска (β – 10÷33 град.), радиус валков (R – 200÷400 мм) и температура перегрева разливаемого расплава (ΔT – 5÷60 °C).

В табл. 2 представлены результаты выполненного эксперимента по изучению условий формирования полос толщиной 2, 3 и 4 мм для используемых алюминиевых сплавов при перегреве их расплавов на 5°C.

Качество полосы и производительность установки определяются скоростью разливки металлов, являющейся важнейшим параметром технологии валковой разливки-прокатки. Скорость разливки, главным образом, определяется интенсивностью теплообменных процессов между затвердевающим металлом и кристаллизатором [7, 8].

Литературные данные о реальных и расчетных скоростях разливки весьма неоднозначны [9, 10]. С учетом этого, авторы при проведении экспериментальных исследований уделили особое внимание определению скорости разливки. В ходе математического модели-

Таблица 1

Использованные при моделировании физические характеристики исследуемых сплавов

Сплав Характеристики	В95	АД35	АМг5	Д16	Ст. 30
Плотность, кг/м ³	2850	2720	2650	2770	7800
Температура солидус, °С	470	564	567	503	1470
Температура ликвидус, °С	630	641	632	635	1520
Интервал кристаллизации, °С	160	77	65	132	50
Теплопроводность, Вт/(м·К)	128	75	126	130	29
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	922	1180	922	922	690
Теплота фазового перехода, кДж/кг	180	180	180	180	267,5
Температуропроводность, 10 ⁻⁵ , м ² /с	48,7	23,5	51,56	50,9	13,5

рования определены скорости разливки для полос из исследуемых сплавов различной толщины при разных температурах перегревов их расплавов. При этом исходили из условия, что эти скорости разливки должны обеспечить сквозное затвердевание полос в плоскости их выхода из валков.

С использованием метода регрессионного анализа результатов, полученных в ходе эксперимента, пренебрегая незначительными факторами, были получены уравнения вида $v = f(\delta, \beta, R, \Delta T)$ – зависимость скорости валковой разливки от изначально заданных технологических параметров процесса: толщина полосы ($\delta = 2 \div 4$ мм), угол мениска ($\beta = 10 \div 33$ град.), радиус валка ($R = 200 \div 400$ мм); температура перегрева расплава ($\Delta T = 5 \div 60^\circ\text{C}$).

Для каждого исследуемого расплава получены соответствующие зависимости:

$$\begin{aligned} &\text{для сплава АД35:} \\ v = &-0,554349 + 0,047554313 \cdot \beta + 0,00323754 \cdot R - 0,0147693 \cdot \delta \cdot \beta - 0,00109545 \cdot \delta \cdot R + \\ &+ 0,000123445 \cdot \beta \cdot R - 0,000112264 \cdot \beta \cdot \Delta T + 0,056446 \cdot \delta^2. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\text{для сплава АМг5:} \\ v = &-0,5917 + 0,0518209 \cdot \beta + 0,00336569 \cdot R - 0,016948 \cdot \delta \cdot \beta - 0,00115526 \cdot \delta \cdot R + \\ &+ 0,000143401 \cdot \beta \cdot R - 0,000115017 \cdot \beta \cdot \Delta T + 0,060388 \cdot \delta^2. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\text{для сплава В95:} \\ v = &-0,440354 + 0,0306303 \cdot \beta + 0,00249233 \cdot R - 0,0110831 \cdot \delta \cdot \beta - 0,000883578 \cdot \delta \cdot R + \\ &+ 0,000102798 \cdot \beta \cdot R + 0,0473633 \cdot \delta^2. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &\text{для сплава Д16:} \\ v = &-0,39715 + 0,0355903 \cdot \beta + 0,00244194 \cdot R - 0,0115194 \cdot \delta \cdot \beta - 0,000846548 \cdot \delta \cdot R + \\ &+ 0,000107717 \cdot \beta \cdot R - 0,0000658956 \cdot \beta \cdot \Delta T + 0,04276 \cdot \delta^2. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\text{для стали 30:} \\ v = &-0,4974 + 0,07598 \cdot \beta + 0,00786549 \cdot R - 0,001409 \cdot \delta \cdot \beta - 0,000046378 \cdot \delta \cdot R + \\ &+ 0,0006897 \cdot \beta \cdot R - 0,0000324158 \cdot \beta \cdot \Delta T + 0,08527 \cdot \delta^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Таблица 2

Технологические параметры разливки-прокатки полос, полученные в результате вычислительных экспериментов (для температуры перегрева изучаемых сплавов – 5°C)

Сплав Параметр	АД35 (641/564)	АМг5 (632/567)	Д16 (635/503)	В95 (630/470)
<i>Толщина полосы 2 мм</i>				
Скорость расплава, м/с	1,238	1,354	1,008	0,87
Время достижения уровня выхода из валков (H=0 мм), с	0,093	0,08507	0,11428	0,1324
Температура поверхности полосы, °C	527,45	529,5	476,4	441,12
Температура центра полосы, °C	590,11	568,27	507,33	470,09
Градиент температур по толщине полосы, °C/мм	63	39	31	29
<i>Толщина полосы, 3 мм</i>				
Скорость разливки, м/с	0,773	0,859	0,649	0,56
Время достижения уровня выхода из валков (H=0 мм), с	0,15	0,1336	0,1776	0,2057
Температура поверхности полосы, °C	502,3	512,235	457,9	428,08
Температура центра полосы, °C	591,9	568,09	502,68	470,3
Градиент температур по толщине полосы, °C/мм	60	37,33	29,85	28
<i>Толщина полосы, 4 мм</i>				
Скорость разливки, м/с	0,535	0,619	0,471	0,406
Время достижения уровня выхода из валков (H=0 мм), с	0,216	0,186	0,245	0,284
Температура поверхности полосы, °C	477,47	496,24	444,51	415,27
Температура центра полосы, °C	588,25	568,04	501,8	469,17
Градиент температур по толщине полосы, °C/мм	110,78	71,8	57,29	53,9

Коэффициент детерминации r^2 , равный квадрату коэффициента корреляции, для полученных уравнений регрессии имеет значение не ниже 98,5%, что свидетельствует о высокой точности описания изучаемого процесса используемой моделью.

Проверка корректности расчетных параметров разливки их опытными значениями для низкотемпературных алюминиевых сплавов выполнена на лабораторной установке валковой разливки-прокатки расплавов металлов. Экспериментальные данные подтвердили высокую точность расчетных параметров разливки для исследуемых сплавов (рис. 2). Так, отклонение в скоростях разливки расчетного и лабораторного экспериментов составило:

сплав АД35 – около 5%; сплав АМг5-7%; сплав Д16-2,2%; сплав В95-4%. Следует отметить, что с увеличением толщины полосы наблюдалось снижение отклонения скоростей разливки. Очевидно, что незначительные отклонения скоростей разливки расчетного и реального экспериментов свидетельствуют о высокой точности описания полученными математическими моделями реального процесса.

Известно, что скорость валковой разливки металлических полос существенно зависит от степени деформации литых заготовок. К примеру, при получении полос из алюминиевых сплавов степень деформации достигает до 60%, что приводит к существенному снижению скорости разливки [11]. При разливке стальных

Рис. 2. Зависимость скорости разливки от температуры перегрева расплава при формировании полосы толщиной 2 мм:
1 – АМг5; 2 – АД35; 3 – Д16; 4 – В95;
расчетный эксперимент; – лабораторный эксперимент

полос валки-кристаллизаторы из-за недостаточной прочности и жесткости их бандажей не могут обеспечить высокие степени обжатия. Поэтому скорости разливки стальных полос на практике существенно выше, чем у алюминиевых сплавов. Для достижения высокого качества литой стальной полосы степень де-

формации должна быть не менее 15% [11, 12]. По этой причине в данной работе при расчете скоростей разливки-прокатки для стали авторы использовали степень обжатия 15%.

На рис. 3 представлены расчетные скорости разливки стальных полос, имеющих различные толщины для трех значений угла кон-

Рис. 3. Зависимость расчетной максимальной скорости разливки стали от толщины полосы на выходе из валков

такта металла с валком (радиус валков 500 мм) без деформации и с деформацией 15%. На графике видно, что при формировании полосы с обжатием значение скорости разливки существенно снижается. Для толщины полосы 2 мм и степени обжатия 15% скорость разливки уменьшается с 164 до 52 м/мин. А при повышении угла контакта металла с валком (уровня заливки металла между валками) наблюдается рост расчетной скорости разливки--прокатки. Если толщину полосы уменьшить до 1 мм и рассмотреть варианты без обжатия и с обжатием 15%, увеличение угла контакта металла с валком на 10 град. приводит к увеличению скорости разливки в два и более раза.

Таким образом, результаты математического и физического моделирования свидетельствуют, что на стабильность процесса валковой разливки-прокатки металлических сплавов влияют такие технологические параметры, как температура перегрева, скорость разливки и уровень расплава в межвалковом пространстве. В результате выполненного математического моделирования для всех рассмотренных сплавов получены теоретические зависимости для вычисления оптимальных расчетных скоростей их разливки-прокатки с учетом таких технологических параметров процесса, как толщины полосы, угол мениска, радиус валков и температуры перегрева расплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидельников С. Б., Константинов И. Л., Ворошилов Д. С. Технология прокатки: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2016. 180 с.
2. Ефимов В. А., Анисович Г. А., Бабич В. Н. и др. Специальные способы литья: Справочник / Под общ. ред. В. А. Ефимова. М.: Машиностроение, 1991. 436 с.
3. Ferry M. Direct strip casting of metals and alloys // Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006. 292 p.
4. Wechsler R. The status of twin-roll casting technology // Scandinavian Journal of Metallurgy. 2003. № 1 (Vol. 32). Pp. 58-63.
5. Zapuskalov N. Comparison of continuous strip casting with conventional technology // ISIJ International. 2003. № 8 (Vol. 43). Pp. 1115-1127.
6. Sa Ge Isac M. and Guthrie R. I. L. Progress of Strip Casting Technology for Steel // Historical Developments. ISIJ Int. 2012. № 12 (Vol. 52). Pp. 2109-2122.
7. Скорость движения теплоносителя в кристаллизаторе МНЛЗ как фактор интенсификации теплообменных процессов в нем / Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Ахтаев С. С.-С., Уздиева Н. С. // Сталь. 2017. № 3. С. 19-21.
8. Интенсификация теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ / Эльдарханов А. С., Нурадинов А. С., Ахтаев С. С.-С., Уздиева Н. С. // Сталь. 2017. № 5. С. 21-25.
9. Li B. Q. Producing thin strips by twin-roll casting Part I: Process aspects and quality issues // Journal of Metals. 1995. № 5. Pp. 29-33.
10. Матвеев Б. Н. Непрерывная отливка тонких полос на микрозаводах с применением валковых кристаллизаторов // Производство проката. 2004. № 3. С. 44-47; продолжение: 2004. № 4. С. 33-41.
11. Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость при бесслитковой прокатке / Бровман М. Я., Николаев В. А., Полухин В. П. // Металлы. 2007. № 1. С. 44-49.
12. Влияние теплофизических условий затвердевания стальных слитков на их химическую неоднородность / Уздиева Н. С., Ахтаев С. С.-С., Эльмурзаев А. А., Нурадинов А. С. // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. № 1. С. 26-37.

MODELING OF ROLL CASTING AND ROLLING OF METALS

© A. S. Nuradinov, N. S. Uzdieva, S. S-S. Akhtaev, M. R. Isaeva

GSTOU named after acad. M. D. Millionshchikov, Grozny, Russia

This paper presents the results of studying the roll casting process using physical and mathematical modeling methods. It is shown that the stability of the roll casting-rolling process of metals is provided by such technological parameters as the overheating temperature, the casting speed and the melt level in the inter-roll space. For the alloys used in the study, the dependences of the optimal casting-rolling speed on such technological indicators as the thickness of the strip, the angle of the metal meniscus, the radius of the rolls and the temperature of overheating of the melts were obtained. The experimental component of these studies, performed under laboratory conditions at the roll casting plant of metals, confirmed the adequacy and high quality of the calculated casting modes for all the studied alloys. The mathematical model obtained to describe the studied processes of roll casting of metals showed a high correlation of theoretical and experimental data.

Keywords: two-roll casting, inter-roll gap, roll-mold, melt, mathematical model, cast billet, rolled metal, mathematical and physical modeling.

REFERENCES

1. Sidelnikov, S. B., Konstantinov, I. L. and Voroshilov, D. S. (2016) Rolling technology: textbook. 3rd ed., transl. and add. Sib. fed. un-ty, Krasnoyarsk, 180 p.
2. Efimov, V. A., Anisovich, G. A., Babich V.N. and others. (1991) In V.A. Efimov (ed.). Special casting methods: Reference book. Mashinostroenie, Moscow 436 p.
3. Ferry, M. (2006) Direct strip casting of metals and alloys. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 292 p.
4. Wechsler, R. (2003) 'The status of twin-roll casting technology' *Scandinavian Journal of Metallurgy*. № 1 (Vol. 32). pp. 58-63.
5. Zapuskalov, N. (2003) 'Comparison of continuous strip casting with conventional technology'. *ISIJ International*, № 8 (Vol. 43). Pp. 1115-1127.
6. Sa Ge, Isac M. and Guthrie R.I. L. (2012) 'Progress of Strip Casting Technology for Steel. Historical Developments'. *ISIJ Int.*, № 12 (Vol. 52). Pp. 2109-2122.
7. Nuradinov, A. S., Eldarhanov, A. S., Akhtaev, S. S. and Uzdieva, N. S. (2017) 'The speed of flow in the continuous casting mold as a factor in the intensification of heat exchange processes in it'. *Steel*. № 3. Pp. 19-21.
8. Eldarhanov, A. S., Nuradinov, A. S., Akhtaev, S. S-S. and Uzdieva, N. S. (2017) 'Intensification of heat transfer in continuous casting mold'. *Steel*, № 5. Pp. 21-25.
9. Li, B. Q. (1995) 'Producing thin strips by twin-roll casting Part I: Process aspects and quality issues'. *Journal of Metals*, № 5. Pp. 29-33.
10. Matveev, B. N. (2004) 'Continuous casting thin strip on microstate with the use of roller mold'. *Production of rolled products*, № 3. Pp. 44-47; continuation: 2004. № 4. Pp. 33-41.
11. Brovman, M. Y., Nikolaev, V. A. and Polukhin, V. P. (2007) 'The length of the zone of plastic deformation and the speed limit at DCC rolling'. *Metals*, № 1. Pp. 44-49.
12. Uzdieva, N. S., Akhtaev, S. S-S., Elmurzaev, A. A. and Nuradinov, A. S. (2021) 'The influence of solidification thermophysical conditions of steel ingots on their chemical heterogeneity'. *Herald of GSTOU. Technical sciences*. № 1. Pp. 26-37.