

Коэффициент скорости кристаллизации при двухвалковой разливке-прокатке стали и алюминия

Проведены расчет и выбор коэффициента скорости кристаллизации для стали и алюминия в условиях использования технологии валковой разливки-прокатки, а также выполнен сравнительный анализ этих коэффициентов для затвердевания слитков при валковой разливке-прокатке металлов.

Ключевые слова: валковая разливка-прокатка, коэффициент скорости затвердевания, зона кристаллизации-деформации, скорость разливки, фронт кристаллизации

Процесс формирования металлической полосы с использованием технологии валковой разливки-прокатки на валковых литейно-прокатных агрегатах (ВЛПА) имеет некоторые отличия от формирования тонкого слитка на машинах непрерывной разливки стали (МНРС). Главное отличие заключается в том, что в валках-кристаллизаторах формирование металлической полосы происходит за короткий период времени с очень высокой скоростью. Время контакта металла с валками-кристаллизаторами зависит от скорости разливки, которая в свою очередь зависит от состава разливаемого металла и толщины получаемой полосы.

Если предположить отсутствие давления со стороны валков на формирующуюся ленту (нулевая деформация), то толщина ленты, получаемой методом непрерывного литья на вращающихся валках-кристаллизаторах, зависит от интенсивности и продолжительности намораживания корок металла на валках. Толщина намораживаемой металлической корки прямо пропорциональна коэффициенту скорости кристаллизации k ($\delta = k\sqrt{\tau}$, k – коэффициент кристаллизации, мм/с^{0,5}; τ – время, с), который зависит от коэффициента теплопередачи между затвердевающим металлом и валком-кристаллизатором, температуры поверхности валка, а также перегрева расплава, что является еще одной особенностью процесса валковой разливки-прокатки (в отличие от кристаллизации слитка, где на усредненный результат перегрев не сказывается).

Для получения данных, максимально приближенных к практическим значениям, необходимо иметь максимально точное значение коэффициента скорости кристаллизации k в условиях ВЛПА для разливаемых металлов.

В большинстве случаев определение коэффициента кристаллизации производят экспериментальным путем и основано оно на расчетах по итогам полученной толщины металлической корки за определенный интервал времени [1]. Это во многом обуславливает разброс получаемых результатов для одних и тех же марок металла, так как имеются различия в условиях кристаллизации металла.

Как показывают результаты многих эксперимен-

тальных исследований [2, 3] интенсивность намерзания металлической корки при контакте с бронзой, сталью и медью отличается незначительно и зависит в большей степени от состава кристаллизующегося сплава. Поэтому в данной работе при выборе коэффициента кристаллизации в условиях технологии валковой разливки-прокатки различие материалов рабочей поверхности бандажа валков-кристаллизаторов, применяемых в условиях промышленных ВЛПА, не учитывали.

Значение коэффициентов кристаллизации для затвердевающих металлов в слитках (табл. 1), полученных экспериментальным путем, приведено в работах М. Я. Бровмана [4].

Таблица 1

Значения коэффициента k для некоторых металлов и сплавов

Металл	k , м/с ^{0,5} , $\times 10^{-3}$
Углеродистые стали	(2,7-3,6)
Никель	(3,7-3,8)
Цинк	(4,0-5,0)
Латунь (типа Л63)	(6,0-6,5)
Алюминий	(6,2-6,7)
Магний	(6,8-7,0)
Медь	(7,2-7,4)

Определить и выбрать коэффициент кристаллизации металлов при валковой разливке-прокатке, к сожалению, на сегодняшний день довольно сложно в связи с крайне ограниченным количеством опубликованных экспериментальных исследований. Обусловлено это прежде всего тем, что проведение подобных экспериментов приводит к необходимости проникновения в рабочую технологическую зону установки ВЛПА для измерения параметров зоны кристаллизации-деформации, и соответственно, определения ключевого момента, которым является точка смыкания встречных фронтов кристаллизации металла на валках-кристаллизаторах. Подобная процедура технически крайне затруднительна и требует соответствующего измерительного оборудования.

Одной из известных экспериментальных работ подобного рода является исследование, проведенное французским специалистом С. Берковичи [5], сотрудником фирмы Pechiney. Исследование проводили с целью оптимизации рабочих режимов эксплуатации промышленной установки ВЛПА Jumbo 3С с двухвалковым кристаллизатором на примере непрерывной разливки-прокатки чистого алюминия марки АА1050.

Технологически исследование параметров зоны кристаллизации-деформации представляло собой ввод в ходе разливки в зону кристаллизации удерживаемых термопар и тонких цилиндрических штифтов до момента смыкания фронтов кристаллизации.

Исследования осуществляли для двух значений толщины выходной полосы – 6 и 10 мм, использовали валки двух диаметров – 620 и 960 мм. Результат (среднее значение) фиксировали в 6 различных точках измерения по ширине полосы, равной 1100 мм. Большинство измерений выполняли с увеличением скорости разливки до момента появления дефектов (прилипание к валкам, дефекты кристаллизации) на выходящей из валков-кристаллизаторов полосе. Схема межвалкового пространства в процессе разливки-прокатки согласно исследованию С. Берковичи представлена на рис. 1.

По результатам проведенного исследования С. Берковичи представлены графики зависимости протяженности зоны кристаллизации от скорости разливки (рис. 2).

Таким образом, широкий спектр представленных результатов в различных скоростных режимах ВЛПА дает возможность аналитическим путем получить наиболее точное значение коэффициента кристаллизации для разливаемого металла (в данном случае алюминия). Для этого с помощью

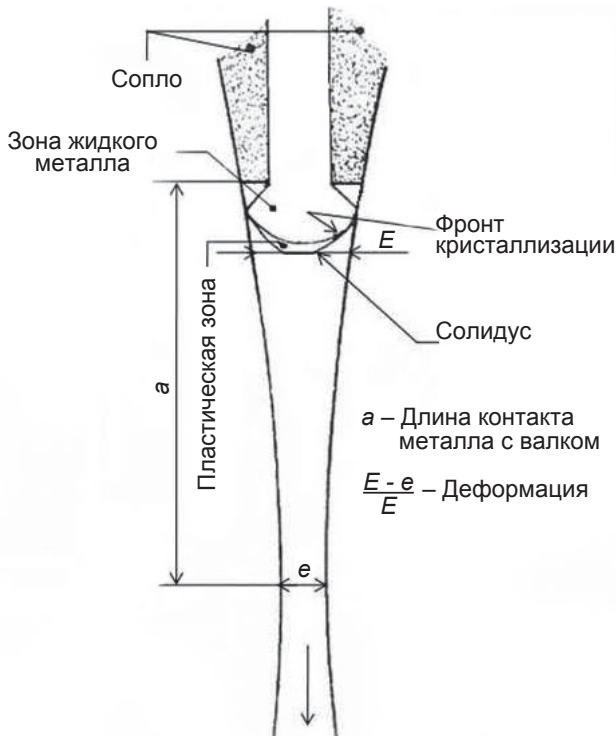


Рис. 1. Схема межвалкового пространства по эксперименту С. Берковичи [5].

предложенной и описанной ранее авторами [6] методики определения протяженности зоны кристаллизации-деформации можно вычислить толщину корки затвердевшего алюминия на валке-кристаллизаторе в момент смыкания со встречным фронтом кристаллизации. По полученным данным можно построить график экспериментальных значений толщин корок затвердевшего металла для имеющегося количества опытов С. Берковичи, проведенных при различных параметрах валковой разливки. Взяв за основу значения диапазона коэффициента скорости кристаллизации алюминия для слитков (табл. 1), представленных в работе М. Я. Бровмана [4], можно рассчитать и представить в графическом виде значения толщин затвердевшей алюминиевой корки для разных значений коэффициента скорости затвердевания (рис. 3).

По полученным результатам видно, что коэффициент скорости кристаллизации для алюминия при разливке с применением технологии валковой раз-

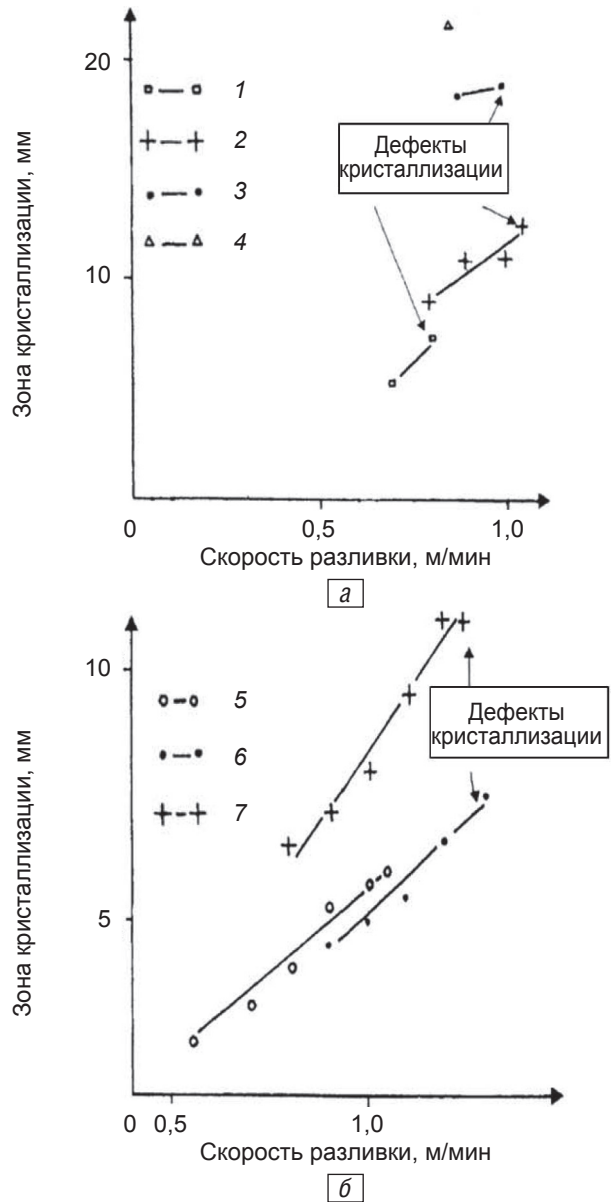


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований С. Берковичи – толщина полосы, мм: 10 (а); 6 (б). Длина (а, мм) контакта металла с валком: 1 – 53; 2 – 82; 3 – 102; 4 – 133; 5 – 28,5; 6 – 38; 7 – 50

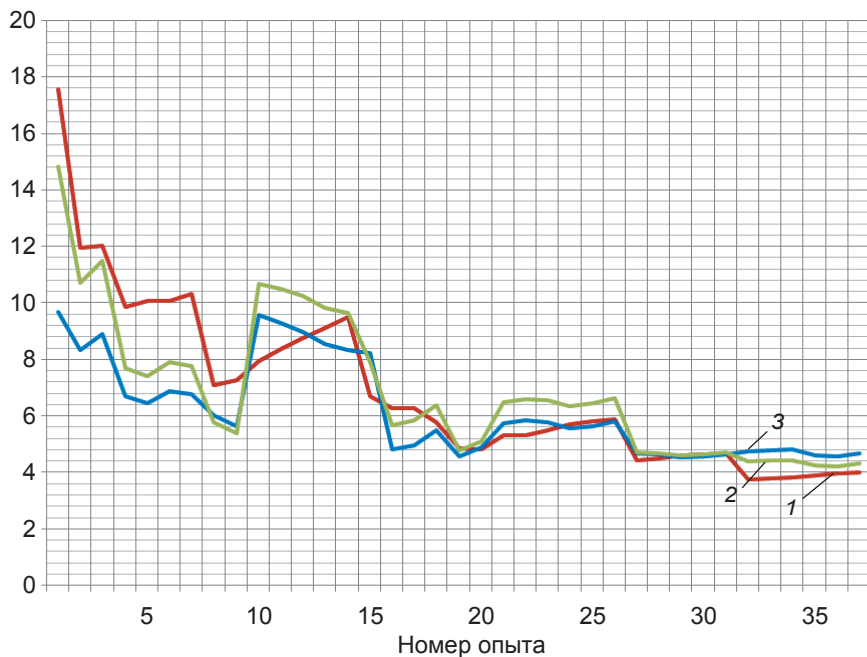


Рис. 3. Экспериментальные [4] значения толщины корки закристаллизовавшегося алюминия и расчетные значения с различными коэффициентами кристаллизации: 1 – $\delta_{\text{экс.}}$; 2 – $\delta_{\text{расч.}}$ ($k = 6$); 3 – $\delta_{\text{расч.}}$ ($k = 7,4$);

ливки-прокатки превышает максимальное значение диапазона для кристаллизации в слитках. Наиболее приближенное значение составляет $7,4 \text{ мм/с}^{0,5}$.

Полученное значение коэффициента скорости кристаллизации для алюминия подтверждают также результаты экспериментального исследования,

Таблица 2

Основные параметры валковой разливки-прокатки по эксперименту А. Ю. Гридина

Параметр	Значение
Температура разливки, °C	680
Скорость разливки, м/мин	2,70
Высота зоны кристаллизации-деформации, мм	60
Толщина готовой полосы, мм	4,25
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	112
Температура охлаждающей жидкости, °C	16

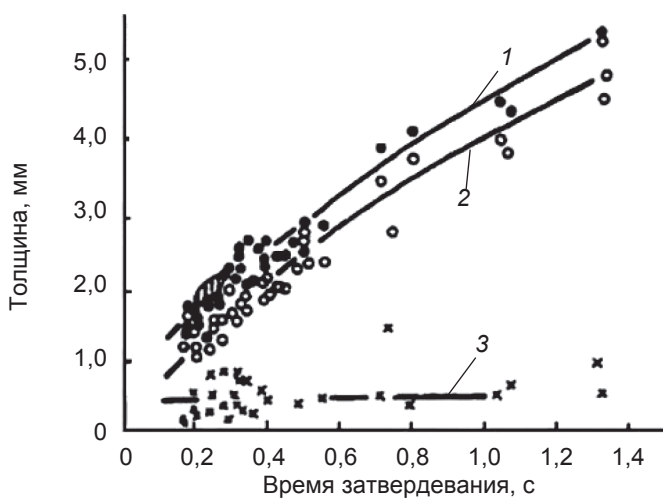


Рис. 4. Изменение распределения величины столбчатых и равноосных зон по толщине стальной полосы от времени затвердевания [9]: 1 – полоса; 2 – столбчатая зона; 3 – равноосная зона

проведенного А. Ю. Гридиным, по определению величины зоны деформации металлографическим методом [7]. По аналогии с С. Берковичи, исследования проводили при разливке технически чистого алюминия с содержанием последнего 99,7 %. Основные технологические параметры эксперимента приведены в табл. 2.

В ходе выполнения эксперимента установили величину зоны деформации, которая составила 34,2 мм, что соответствует толщине корочки на одном валке 5,54 мм. Такое значение толщины корочки обеспечивает коэффициент $k = 7,4 \text{ мм/с}^{0,5}$. Для определения коэффициента скорости кристаллизации в случае валковой разливки-прокатки стальной полосы можно использовать результаты известного исследования Т. Мизогучи и К. Миязава [8, 9]. Суть эксперимента заключалась в исследовании структурообразования стальной полосы (на примере нержавеющей стали) в зависимости от времени контакта металла с валком (рис. 4).

Для валковой разливки-прокатки как алюминиевой полосы, так и стальной за основу приняли диапазон величин коэффициента кристаллизации стали для слитков. Полученные авторами сравнительные графики расчетных значений толщины полосы с различными коэффициентами кристаллизации, а также их экспериментальные значения приведены на рис. 5. Наиболее точно к экспериментальным приближены значения толщины полосы, полученные с использованием коэффициента $4,2 \text{ мм/с}^{0,5}$.

Для валковой разливки-прокатки как алюминиевой полосы, так и стальной за основу приняли диапазон величин коэффициента кристаллизации стали для слитков. Полученные авторами сравнительные графики расчетных значений толщины полосы с различными коэффициентами кристаллизации, а также их экспериментальные значения приведены на рис. 5. Наиболее точно к экспериментальным приближены значения толщины полосы, полученные с использованием коэффициента $4,2 \text{ мм/с}^{0,5}$.

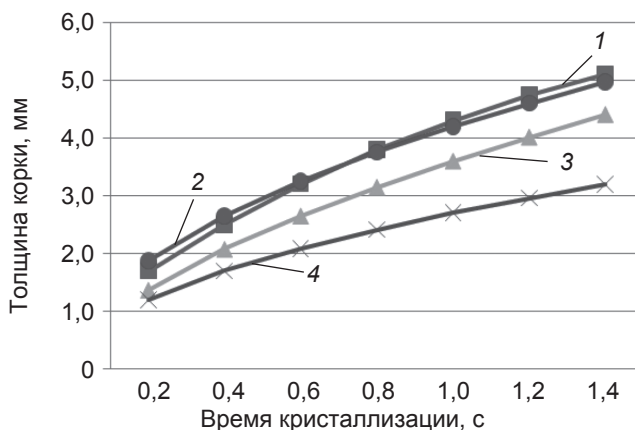


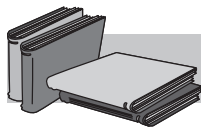
Рис. 5. Толщина (сравнительная) затвердевшей металлической корки для различных коэффициентов кристаллизации и экспериментальных значения [9]: 1 – $\delta_{\text{экс.}}$; 2 – δ ($k = 4,2$); 3 – δ ($k = 3,8$); 4 – δ ($k = 2,7$);

Выводы

Таким образом, установлено, что при валковой разливке-прокатке как алюминиевой полосы, так и стальной коэффициенты скорости кристаллизации, которые способствуют получению толщины полосы,

максимально приближенной к экспериментальным данным, находятся выше диапазона коэффициентов,

полученных при затвердевании слитков, и составляют 7,4 мм/с^{0,5} для алюминия и 4,2 мм/с^{0,5} для стали.



ЛИТЕРАТУРА

1. Флеминг М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
2. Баландин Г. Ф. Литье намораживанием. – М.: Металлургия, 1962. – 262 с.
3. Непрерывное литье намораживанием / В. Ф. Бевза, Е. И. Марунович, З. Д. Павленко, В. И. Тутов – Минск, «Наука и техника», 1979. – 208 с.
4. Бровман М. Я., Николаев В. А., Полухин В. П. Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость при бесслитковой прокатке // Металлы. – 2007. – № 1. – С. 44-49.
5. Berkovici S. J. Optimisation of 3C roll caster by automatic control // Proc. of conference «Light Metals», TMS. – New York, 1985. – P. 1285-1299.
6. Ноговицын А. В., Баранов И. Р. Метод расчета протяженности зон кристаллизации и деформации при валковой разливке-прокатке // Обработка металлов давлением. – 2013. – Вып. 1 (34). – С. 170-176.
7. Гридин А. Ю. Экспериментальный метод определения длины зоны деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке / Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2010. – Вып. 42. – С. 48-58.
8. Mizoguchi T., Miyazawa K. Formation of solidification structure in a twin-roll rapid solidification process // Advanced Materials and Process. – 1990. – Vol. I. – P. 93-98.
9. Mizoguchi T., Miyazawa K. Formation Of Solidification Structure In Twin-Roll Casting Process Of 18er-Sni Stainless Steel. Isij International. – 1995. – Vol. 35, No. 6. – P. 771-777.

Анотація

Ноговицын О. В., Баранов И. Р.

Коефіцієнт швидкості кристалізації при двохвалковому розливанні-прокатці сталі та алюмінію

Проведено розрахунок і вибір коефіцієнта швидкості кристалізації для сталі та алюмінію в умовах використання технології валкового розливання-прокатки, а також виконано порівняльний аналіз цих коефіцієнтів в умовах тверднення злитків при валковому розливанні-прокатці металів.

Ключові слова

валкови розливання-прокатка, коефіцієнт швидкості тверднення, зона кристалізації-деформації, швидкість розливання, фронт кристалізації

Summary

Nogovitsin A. V., Baranov I. R.

Coefficient of crystallization speed twin-roll casting steel and aluminium

In this paper, a payment, and selection of the solidification rate coefficient for steel and aluminum, used in the casting roll technology rolling. Just a comparative analysis of the factors the rate of crystallization of steel and aluminum for the solidification of ingots and casting roll metals.

Keywords

roller casting-rolling, rate coefficient solidification, crystallization zone, crystallization-deformation zone, the casting speed, the crystallization front

Поступила 05.07.13