

УДК 669.18:621.771:621.74
УДК 621.746.047:62-418

НОГОВИЦЫН А. В., д.т.н., зав. отделом
БАРАНОВ И. Р., м.н.с.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,
г. Киев, Украина

ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ

Введение. Валковая разливка-прокатка является одним из наиболее перспективных и эффективных процессов производства стального листа. К преимуществам этой технологии относятся компактность агрегата и экономия до 80...89 % энергоресурсов за счет отсутствия промежуточного подогрева материала и минимизации числа технологических операций. Однако, несмотря на попытки внедрения в производство технологии двухвалковой разливки на сегодня не удается в полной мере решить задачи устойчивого промышленного процесса получения качественного стального листа. Это связано с недостаточной изученностью закономерностей формирования непрерывно литой полосы, сложностью управления гидродинамическими, температурными, кинематическими параметрами процесса литья-прокатки.

Цель работы. Изучить закономерности процессов тепломассопереноса, затвердевания и деформации металлической ленты при литье-прокатке, которые позволят выбирать оптимальные технологические режимы.

Актуальный уровень техники и исследований. Интенсивные работы по развитию процесса производства тонкой стальной полосы на двухвалковых литейно-прокатных агрегатах проводятся в Великобритании (British Steel, Corus), Японии (Nippon Steel Corp., Kawasaki Works, Nippon Metals, Pacific Metals, Sumimoto Metals), Канаде (Project Bessemer), Китае (Baoshan Iron and Steel Co.), Кореи (Posco). Наибольшая промышленная эффективность валковой разливки достигнута в США на агрегатах Castrip фирмы Nucor [2]. Исследования валковой разливки металлов проводились и в Украине. Одесским НИИСЛ в 1955 г. были разработаны способ и установка для непрерывного литья тонких листов из чугуна в двухвалковые кристаллизаторы с подводом металла сверху [3]. В Физико-технологическом институте металлов и сплавов (ФТИМС) НАН Украины была предложена и опробована конструкция агрегата для литья ленты [4]. В совместных работе Национальной металлургической академии Украины и Ганноверского Университета им. Лейбница описаны особенности конструкции и основные технические характеристики экспериментальной машины валковой разливки-прокатки собственной разработки [5].

Постановка задачи. В работе решались следующие научные задачи: провести экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики расплава в межвалковом зазоре (МВЗ) при различных его параметрах; исследовать процесс образования затвердевшей корочки на валках-кристаллизаторах; изучить реологические свойства затвердевающего металла (стали) в диапазоне температур «солидус-ликвидус»; исследовать влияние конструктивных (диаметр валков) и технологических параметров валковой разливки (высота ванны жидкого металла, температура металла, степень обжатия и др.) на протяженность зон кристаллизации и деформации, на скорость разливки стальных полос различной толщины; оценить влияние способа подачи расплава в валки на распределение температуры и затвердевание полосы по ее ширине на выходе из валков.

Экспериментальное исследование течения модельной среды. Физическое моделирование проводилось на двухвалковой лабораторной установке. Для устойчивой фиксации жидкости в межвалковом пространстве использовалась прозрачная призма, изготовленная из оргстекла (рис. 1). Стенки призмы повторяли геометрию окружности

бочки валков. В качестве моделирующей жидкости использовалась вода. Визуализацию потоков осуществляли при помощи добавления в воду полистироловых шариков (трассеров) диаметром 0,8...1,0 мм, имеющих нулевую плавучесть. Направление и скорости потоков фиксировали с помощью веб-камеры. Запись гидродинамической картины велась на компьютер. Область наблюдения в межвалковом пространстве модели прозрачного бункера получали обтюрируемым пучком света.

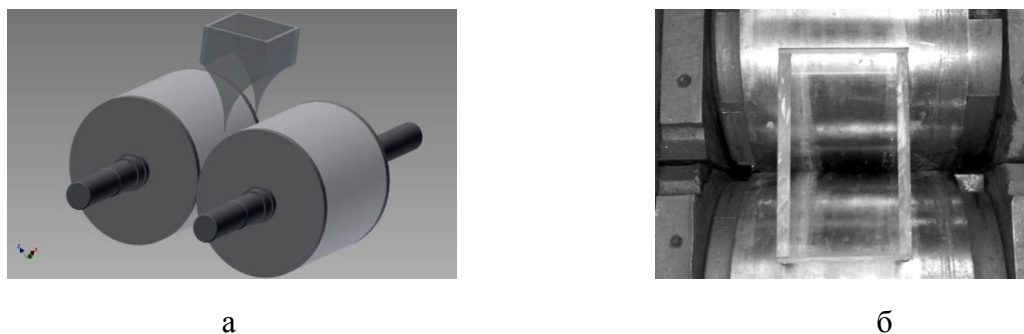
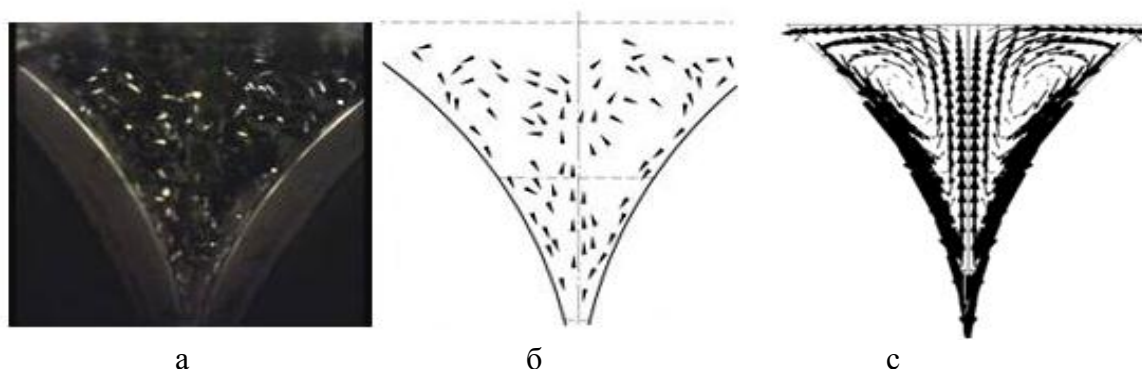


Рисунок 1 – Призма, моделирующая устойчивое удержание жидкости в межвалковом зазоре (а) вид сверху (б) аксонометрическая модель

Количественные значения скоростей потоков жидкости определяли посредством расчета отношения измеренных на экране монитора длин треков ко времени экспозиции с учетом коэффициента масштабирования. В процессе выполнения исследований было проведено несколько экспериментов с использованием воды с различной концентрацией трассеров. Наилучший результат дало использование жидкости с плотностью шариков 200 шт/литр. После получения изображения треков, было построено поле движения трассеров (рис. 2).



а – фотоснимок треков частичек; б – полученное поле движения;
с – компьютерная модель

Рисунок 2 – Картина течения жидкого металла в валках

На основе зафиксированных параметров движения трассеров в физической модели, построено векторное поле скоростей, на котором можно четко проследить образование двух зон циркуляции. Наибольшая скорость движения потока жидкости находится вблизи поверхности валков, которые нагнетают жидкость в межвалковый зазор. Обратный поток, возникающий в точке встречи поверхностных потоков и проходящий вдоль центральной оси межвалкового пространства, имеет значительно меньшую скорость.

Результаты физического моделирования сопоставляли с результатами компьютерного моделирования поля скоростей жидкости в межвалковом зазоре двухвалкового кристаллизатора, выполненных совместно с учеными Института электродинамики НАН Украины с использованием пакета программ Comsol [6, 7]. Результаты численного расчета и эксперимента хорошо согласуются между собой, что дало возможность создания надежного математического аппарата для исследования течения металла в процессе валковой разливки и более глубокого понимания процессов, протекающих в межвалковом пространстве.

Компьютерное исследование течения расплав. Для моделирования турбулентного течения жидкости в активной зоне установки в качестве основной модели используется $k - \epsilon$ модель турбулентности. Другой упрощенный расчет турбулентного течения проводится путем задания постоянного во всей области эффективного значения турбулентной вязкости, вычисляемого с помощью формулы Прандтля. Показано, что эффективная вязкость жидкости должна превышать молекулярную вязкость (равную для воды 10^{-3} Па·с) более, чем в 100 раз [7].

Оценка влияния геометрических параметров зоны разливки на параметры течения. Проведены расчеты для трех вариантов разливки в валки-кристаллизаторы диаметром 500 мм – при высоте налива расплавленного металла $l = 45, 90, 135$ мм (угол мениска $10, 20, 30^\circ$) [6]. Анализ расчетных данных (рис. 3) показывает на значительную неравномерность распределения скоростей течения в поперечных сечениях межвалкового зазора. В слоях металла, прилегающих к валку, наблюдаются значительные градиенты продольной скорости течения. Металл центральной части верхней половины МВЗ отстает от окружной скорости валка и находится в состоянии, близком к застойному. С увеличением высоты налива до 90 мм (угла α свыше 20°) на поверхности мениска появляется тенденция к попятному движению металла из межвалкового зазора, что может вызывать бурление металла. При высоте налива 135 мм ($\alpha = 30^\circ$) скорость попятного движения металла имеет величину, соответствующую 20 % скорости вращения валка-кристаллизатора, т.е. 170 мм/сек. С увеличением диаметра валков-кристаллизаторов (1500 мм) скорости попятного течения существенно возрастают и могут достигать весьма больших значений (до 520 мм/сек). Такое интенсивное обратное течение расплава на поверхности мениска МВЗ может вызывать выбросы расплава из межвалкового зазора.

Затвердевание металла. Решающей характеристикой процесса формирования полосы в валковом кристаллизаторе является положение точки смыкания затвердевших корочек относительно плоскости оси валков. Если точка смыкания значительно выше линии осей валков («беслитковая прокатка»), то в результате деформации затвердевшего металла усилие на валки возрастает. С одной стороны это вызывает необходимость увеличивать мощность привода и прочность конструкции кристаллизатора, с другой, может привести к появлению трещин вследствие эффекта прокатки. Наоборот, если точка смыкания фронтов кристаллизации находится ниже линии осей валков («жидкая прокатка»), то из валков выходит полоса с жидкой сердцевиной.

Сложность экспериментального установления границы между двумя характерными областями зоны кристаллизации-деформации заставляет обращаться к математическому моделированию. Толщину корочки в работе определяли двумя методами: по формуле «квадратного корня» и путем расчета положения линии солидуса на рассчитанном поле температур металла в межвалковом зазоре.

Для расчета толщины методом «квадратного корня» необходимо знать значения коэффициента кристаллизации для разливаемого металла. В литературе они, как правило, приводятся для случая затвердевания металлов в слитках, когда между затвердевшей корочкой и охлаждающей стенкой образуется газовый (воздушный) слой, задерживающий теплопередачу. Опубликованных работ по экспериментальному исследова-

нию параметров процесса затвердевания расплавов при валковой разливке крайне мало. Для определения коэффициента скорости кристаллизации k при валковой разливке-прокатке стальной полосы воспользовались результатами исследований Т. Мизогучи и К. Миязава [8]. Суть их экспериментов заключалась в исследовании структурообразования стальной полосы из нержавеющей стали в зависимости от времени контакта металла с металлической подложкой. Мы установили, что расчеты наиболее точно приближены к экспериментальным значениям толщины затвердевшей корочки при $k = 4,2 \text{ мм/сек}^{0,5}$.

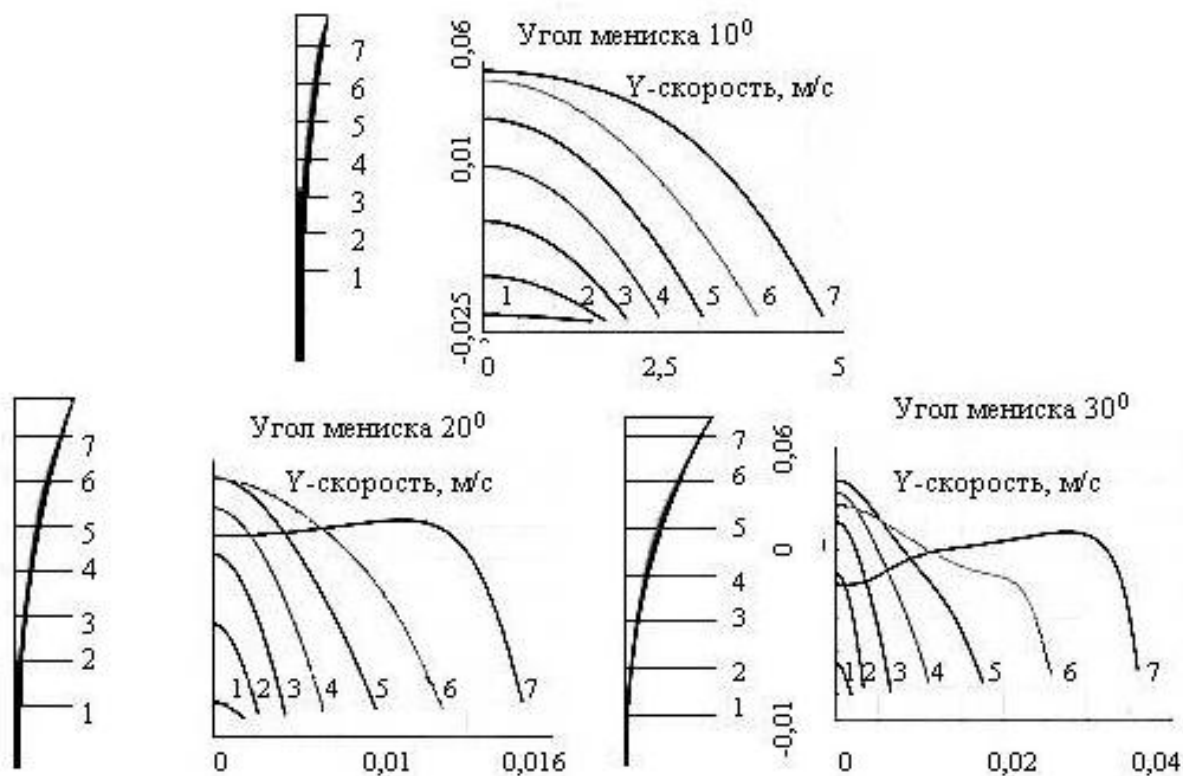


Рисунок 3 – Изменение у-составляющей скорости вдоль семи показанных слева поперечных сечений 1/2 межвалкового канала для трех вариантов высоты мениска

В основу второго способа расчета затвердевшей корочки положено решение уравнения нестационарной теплопроводности методом конечных разностей [9]. В результате расчета распределения температуры расплава определяется положение изотерм «ликвидус» (T_L) и «солидус» (T_S). За толщину корочки принимают расстояние от образующей вала до линии солидус. Однако достоверность таких расчетов существенно зависит от значений многих констант, входящих в уравнения теплопроводности (коэффициенты теплопроводности металла в жидком и твердом состояниях, коэффициент теплопередачи от металла к валку, теплота фазового превращения). Кроме того, значения температур «ликвидус» и «солидус» зависят от интенсивности теплоотвода от затвердевающего металла [10].

Реология стали при температурах валковой разливки. Данные о свойствах стали при температурах вблизи температуры солидуса и выше (в двухфазной твердожидкой зоне) исследованы крайне мало. В ФТИМС НАН Украины под руководством Ю. А. Скока исследованы механические свойства низкоуглеродистых, углеродистых, низколегированных, среднелегированных и высоколегированных сталей (табл. 1) при высоких температурах, приближенных до температуры плавления [11].

Таблица – Химический состав сталей, исследованных в работе [11]

№	Марка стали	Хімічний склад, %			
		C	Si	Mn	Ni
0	Армо	0,02	0,02	0,13	0,01
1	17ГСЛ	0,17	0,54	1,4	0,01
2	20ГСН	0,21	0,78	1,15	0,58
3	17Г2АФЛ	0,18	0,46	1,56	0,01
4	09Г2С	0,085	0,64	1,45	0,01
5	22Х3М	0,22	0,28	1,45	0,01
6	45ХНМФЛ	0,46	0,29	0,66	0,96
7	20Л	0,17	0,36	0,54	0,01
8	55Л	0,55	0,35	0,5	0,01
9	ШХ15	1,03	0,3	0,31	0,01
10	12ХНЗА	0,13	0,34	0,57	2,91
11	10ГН2МФА	0,1	0,28	0,86	2,16
12	15Х1М1ФЛ	0,16	0,32	0,78	0,01
13	9Х2МФ	0,9	0,32	0,3	0,01
14	Х28Л	0,05	0,72	0,63	0,01
15	09Х16НЧ	0,1	0,55	0,46	4,23
16	Х18Н10ТЛ	0,07	0,86	1,3	10,23

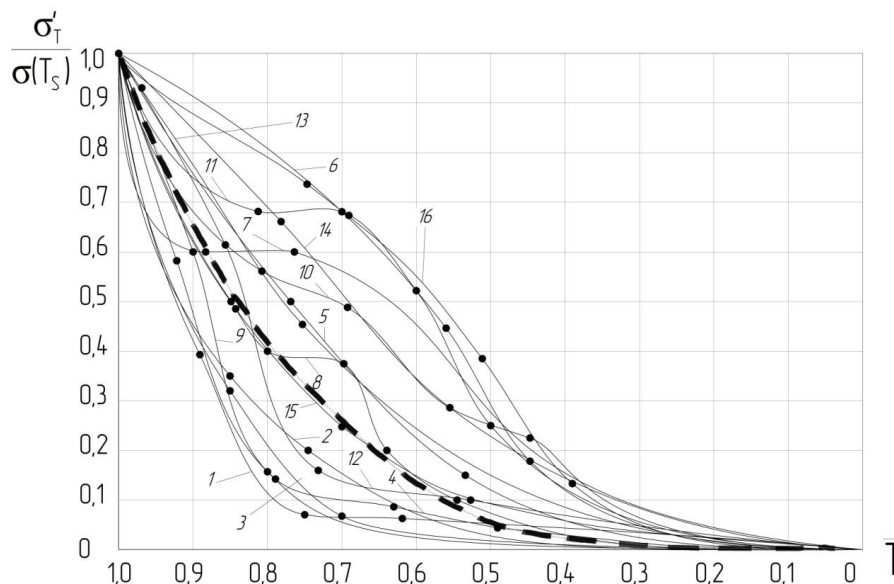
Для построения зависимости предела текучести σ'_T стали в интервале температур $T_S \leq T \leq T_L$ была введена безразмерная температура $\bar{T} = \frac{T_L - T}{T_L - T_S}$, которая принимает значения от 1 до 0. По известной гипотезе [12] значение \bar{T} соответствует доле твердой фазы в стали при заданной температуре металла. Анализ экспериментальных данных показал (рис. 4), что в качестве зависимости предела текучести от \bar{T} можно применить степенную функцию: $\sigma'_T = \sigma(T_S) \cdot \bar{T}^n$, где $\sigma(T_S)$ – сопротивление деформации при температуре «солидус», $n = 4$. Абсолютная погрешность формулы составляет 1,09 Н/мм².

Влияние толщины и обжатия полосы, диаметра валков-кристаллизаторов, уровня наполнения расплава на скорость разливки. Ключевым фактором для достоверного расчета скорости разливки является правильное определение положения смыкания затвердевших на валках-кристаллизаторах корочек разливаемого металла. Применение не достоверных методик приводит к ошибкам при проектировании оборудования. Нами рассчитаны скорости разливки стальных полос толщиной от 1 до 5 мм с обжатием (15 %) и без обжатия в валках различного диаметра. Из расчетов следует, что осуществление валковой разливки полосы с обжатием приводит к заметному снижению скорости разливки-прокатки. Например, для стальной полосы толщиной 2 мм при обжатии 15 % скорость разливки снижается в 3 раза (с 164 до 52 м/мин) по сравнению с разливкой без обжатия.

Влияние толщины и обжатия полосы, диаметра валков-кристаллизаторов, уровня наполнения расплава на скорость разливки. Ключевым фактором для достоверного расчета скорости разливки является правильное определение положения смыкания затвердевших на валках-кристаллизаторах корочек разливаемого металла. Применение не достоверных методик приводит к ошибкам при проектировании оборудования. Нами рассчитаны скорости разливки стальных полос толщиной от 1 до 5 мм с обжатием (15 %) и без обжатия в валках различного диаметра. Из расчетов следует, что осуществление валковой разливки полосы с обжатием приводит к заметному снижению скорости разливки-прокатки. Например, для стальной полосы толщиной 2 мм при обжатии 15 % скорость разливки снижается в 3 раза (с 164 до 52 м/мин) по сравнению с разливкой без обжатия.

На рис. 5 приведены скорости разливки стальных полос различной толщины (h_n) в валках-кристаллизаторах радиусом $R = 500$ мм при изменении угла контакта металла с валком $\alpha = 10, 20$ и 30° без деформации и с деформацией 15 %. Из приведенных

данных следует, что увеличение угла контакта металла с валком (уровня заливки металла) приводит к существенному росту скорости разливки. Расчетные скорости разливки для стальных полос количественно близки к достигнутым на установке Castrip компании Nucor. Сопоставив применяемую скорость разливки 80 м/мин для получения полосы толщиной 1,6 мм в валках диаметром 500 мм, можно сделать вывод, что разливка-прокатка осуществляется с обжатием затвердевшего металла близким к 15 %.



• — эксперимент; - - - — расчетные данные

Цифры у кривых соответствуют номеру стали в таблице

Рисунок 4 – Зависимость значения $\sigma'_T / \sigma(T_S)$ от температуры \bar{T}

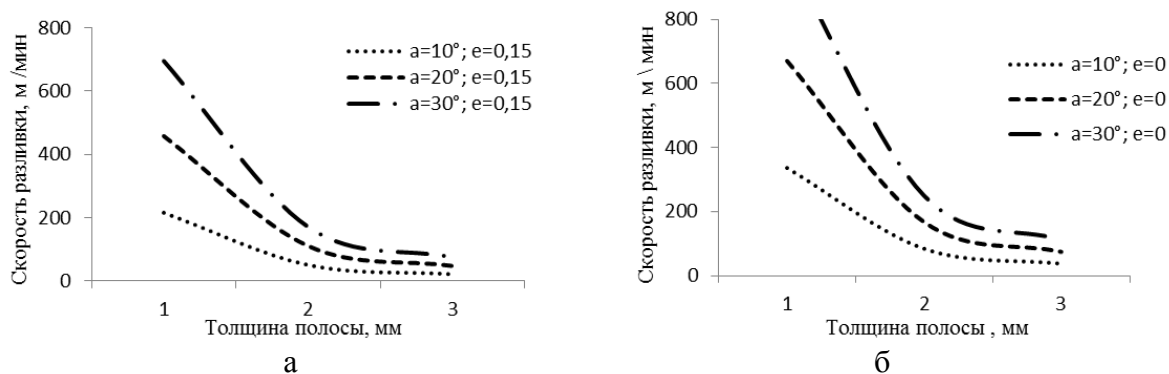


Рисунок 5 – Зависимость расчетной скорости разливки-прокатки стальных полос от толщины, угла зоны кристаллизации-деформации α , без обжатия (а), и с обжатием 15 % (б) (радиус валков-кристаллизаторов 500 мм)

Расчеты показывают, что для обеспечения постоянного положения точки смыкания корочек затвердевшего металла скорость разливки должна регулироваться пропорционально изменению высоты налива. Увеличение высоты налива при постоянной (нерегулируемой) скорости приводит к увеличению степени деформации, которая может достигать критической величины, приводящей к появлению в полосе трещин. Важным фактором стабильной технологии валковой разливки является обеспечение постоянной температуры металла, подаваемого в валки-кристаллизаторы. Показано,

что изменение температуры металла на 10 °С приводит к изменению толщины корочки стали на 0,05 мм, что приводит к изменению обжатия на 3 % (абс.) при постоянной скорости разливки, что в свою очередь может приводить к продольной разнотолщинности полосы, а также может содействовать появлению трещин.

Немаловажную роль в валковой разливке играет способ подачи расплава в валки-кристаллизаторы. Проведенное исследование [13] показало, что увеличение длины щелевого питателя от 25 до 100 % длины валка-кристаллизатора обеспечивает более равномерное распределение температуры в межвалковом канале, а перепад температур по ширине полосы на выходе из валков уменьшается с 80 °С до 10 °С.

Заключение. Установленные закономерности показали, что необходимыми условиями для стабильного процесса валковой разливки являются постоянство температуры и расхода подаваемого в валки-кристаллизаторы металла, равномерное его распределение по длине межвалкового зазора. Решение этой задачи возможно путем применения МГД-оборудования. В ФТИМС НАН Украины разработана концепция и принципиальная схема процесса валковой разливки стали, главным признаком которой является использование магнитодинамического промежуточного ковша (МД-ПК), созданного на базе магнитодинамического миксера-дозатора жидкой стали [14]. Применительно к процессам валковой разливки, электромагнитные поля и соответствующие устройства следует использовать на следующих стадиях процесса: 1) в промежуточном ковше – для поддержания заданной температуры расплава непосредственно перед разливкой; 2) на выходе из промежуточного ковша – для управления гидродинамическим режимом поступления расплава в валковый кристаллизатор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев Б. Н. Технология валкового литья-прокатки тонких полос. Результаты исследований и промышленное освоение. – М. : ОАО «Черметинформация», 2008. – 59 с.
2. Шалимов А. Г. Двухвалковые литейно-прокатные агрегаты для производства тонких горячекатаных стальных полос. Ч. II // *Электromеталлургия*. – 2014. – № 2. – С. 12–16.
3. Степанов А. Н. Производство листа из расплава / А. Н. Степанов, Ю. В. Зильберг, А. А. Неуструев : Учебник. – М. : Metallургия, 1978. – 160 с.
4. Спосіб виготовлення металевої стрічки / В. Л. Найдек, В. П. Осіпов, Б. О. Узієнко, В. О. Перелома, Е. В. Дубровін, Є. О. Казачков, О. І. Майко : Патент 45433 Україна, МПК7 В22В 11/06, В220 11/11 // *Бюл. «Промислова власність»*. – 2002. – № 4.
5. Получение полос из высокопрочных алюминиевых сплавов валковой разливкой-прокаткой / А. Ю. Гридин, М. Шапер, В. Н. Данченко // *Обработка металлов давлением*. – 2011. – № 3(28). – С. 184–194.
6. Компьютерное моделирование течения расплава в двухвалковом кристаллизаторе А. В. Ноговицын, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая, А. Н. Ломко // *Процессы литья*. – 2014. – № 6. – С. 11–17.
7. Численное моделирование турбулентного течения расплава в двухвалковом кристаллизаторе с щелевым питателем / А. В. Ноговицын, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая // *Процессы литья*. – 2015. – № 2. – С. 33–39.
8. Formation of solidification structure in a twin-roll rapid solidification process / Mizoguchi T., Miyazawa K. // *Advanced Materials and Process*. – 1990. – Vol. 1. – P. 93–98.
9. Оценка параметров валковой разливки металла при формировании тонкой полосы на базе компьютерного моделирования / В. Л. Найдек, Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец, И. Н. Тарасевич // *Сталь*. – 2017. – № 7. – С. 65–70.
10. Тепловые и диффузионные процессы при разливке стали и способы их регулирования / О. В. Мартынов, И. П. Дубовенко, А. Н. Семенцов, А. А. Ежов, Д. А. Дюдкин // *Сб. : Теплофизика стального слитка*. – Киев : ИПЛ АН УССР. – 1980. – С. 36–41.

11. Скок Ю. Я. Механические свойства стали при температурах вблизи солидуса // Препринт. – Киев : Ин-т проблем литья АН Украины. – 1983. – 66 с.
12. Ольшанский В. М. Математическое моделирование процесса затвердевания непрерывных заготовок / В. М. Ольшанский, Н. П. Коваль, Т. Я. Сью // *Металлургическая теплотехника*. – 1999. – № 2. – С. 188–191.
13. Трехмерное моделирование гидродинамических процессов в двухвалковом кристаллизаторе при различных способах подачи металла / А. В. Ноговицын, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая // *Праці ІЕД НАНУ*. – 2015. – Вип. 40. – С. 95–102.
14. Магнитодинамическое оборудование для перегрева и разлива чугуна и стали / В. И. Дубоделов, В. К. Погорский, М. С. Горюк // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2013. – № 1. – С. 134–137.

UDC 669.017

Solona O. V., Ph.D. in Technical Science
Derevenko I. A., Ph.D. in Technical Science
Kupchuk I. M., Ph.D. in Technical Science

Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, Ukraine

DETERMINATION OF PLASTICITY FOR PRE-DEFORMED BILLET

Introduction. Development and industrial introduction of effective metal forming technologies, which ensure a high level of operational properties and reliability of products is one of the most important tasks of engineering.

After various operations of metal forming, a technological heritage is formed. These are residual stresses, hardening, deformations gradient, residual plasticity, and other factors. These factors influence in the future the performance of products, which predetermines the task of creating methods for their evaluation. Most of these factors have been sufficiently investigated [1], but some of them, for example, evaluation of the plasticity of a pre-deformed billet, is a difficult and insufficiently investigated problem.

Formulation of the task. The purpose of this research is to develop a methodology for evaluating the plasticity of a pre-deformed metal.

Research results. Accumulated at all stages of deformation, the strain intensity (parameter Udquist), which is called the ultimate deformation (e_p), is taken as a measure of plasticity at the moment of destruction of the workpiece material at the place of final deformations:

$$e_p = \int_0^{\tau_p} \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (1)$$

where $\dot{\varepsilon}_u$ – strain rates intensity.

Processes of metal forming are based on the ability of metals under the action of the applied load to pass into the plastic state.

Plasticity of metals depends on many factors, among which, in addition to the type of material, the main thermomechanical parameters of the process are: temperature, strain rate, strain state, deformation story, strain gradient and other.

The dependence of plasticity on the type of stress state with simple deformation and fixed temperature and rate process parameters is its mechanical characteristic. To determine the mechanical characteristic diagram, a material test is performed at various stress states under simple loading conditions, when the components of the stress tensor vary in proportion to one parameter.