

РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ НАПЛАВКЕ РОЛИКОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

В. Н. МАТВИЕНКО, Л. К. ЛЕЩИНСКИЙ, В. А. МАЗУР

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7.
E-mail: matviyenkovn@gmail.com

Показано, что при наплавке роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на размеры зоны проплавления влияют химический состав и теплофизические свойства материала ролика или наплавленного подслоя. Представлены расчетные значения площади поперечного сечения и глубины проплавления, объема расплавленного металла, полученные численным моделированием на основании решения нелинейного трехмерного дифференциального уравнения теплопроводности с учетом аппроксимированной температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Установлено расчетом и подтверждено экспериментом, что размеры зоны проплавления увеличиваются при наплавке ленточным электродом под флюсом на подслое из мартенситно-ферритной высокохромистой стали и в еще большей мере – на подслое из аустенитной хромоникелевой стали по сравнению с наплавкой на материал ролика или на подслое из низкоуглеродистой низколегированной стали. Библиогр. 10, табл. 3. рис. 3.

Ключевые слова: ролик машины непрерывного литья заготовок, основной металл, наплавка под флюсом, ленточный электрод, зона проплавления, размеры, численное моделирование, наплавленный слой, подслое, химический состав, теплофизические характеристики, коэффициент теплопроводности

При изготовлении и восстановлении наплавкой роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) уменьшить продольный изгиб ролика, а также снизить вероятность зарождения дефектов позволяет уменьшение объема наплавленного металла путем ограничения количества наплаваемых слоев [1, 2]. В случае применения технологии наплавки двумя слоями — подслоем (промежуточным слоем) и наружным слоем [3], требуемое содержание легирующих элементов в наружном слое зависит как от состава электрода, так и от степени разбавления наружного слоя подслоем, а через подслое — материалом ролика. Даже небольшие изменения степени разбавления могут привести к заметным отклонениям в содержании легирующих элементов в наружном слое. Такие отклонения от состава типа X13 (в частности, 08X13N3M1AFB, широко применяемого для наплавки наружного слоя роликов МНЛЗ) приводят к снижению сопротивления коррозионно-механическому износу, теплосменам, термоусталостному разрушению [4, 5]. При этом возможность получения состава типа X13 в наружном слое зависит не только от обоснованности выбора материалов и параметров режима наплавки, но также от размеров зоны проплавления, в связи с чем растут требования к точности прогноза ее размеров.

Исходные данные для расчета размеров зоны проплавления. Выбор исходных данных для расчета осуществлялся, исходя из предварительного анализа состава и теплофизических свойств как основного материала роликов МНЛЗ,

так и состава металла для наплавки подслоя и наружного слоя. Из материалов, используемых для изготовления роликов, следует выделить теплоустойчивую сталь перлитного класса 25X1M1Ф, близкую к ней по составу сталь 25Cr1Mo1V, а также сталь мартенситного класса 42CrMo4 с более высоким содержанием углерода и меньшим — хрома и молибдена [3–5]. Получение пластичного подслоя обеспечивает применение низкоуглеродистых низколегированных сталей 06XН2Г1М, 10X1M1Г1Н, 10ГС, 12X1MФ [2]. При наплавке двумя слоями состав подслоя может выбираться с более высоким (чем в наружном слое) содержанием хрома, например, типа X17, а также других легирующих элементов, прежде всего, никеля и молибдена [3]. К составам подслоя с таким содержанием хрома, вместе с тем, обеспечивающим получение аустенитной структуры высокой пластичности, можно отнести стали 08X17H12M2, 0X18H10, 0X19H11M3. В отличие от представленных выше материалов, используемых для изготовления роликов МНЛЗ и выполнения подслоя, теплофизические свойства которых близки, свойства аустенитных сталей, используемых также для подслоя, отличаются значительно. Исходя из этого, расчеты размеров зоны проплавления и последующий анализ выполнялись для теплоустойчивой перлитной стали 25X1M1Ф, стали мартенситного класса 42CrMo4, хромоникелевой аустенитной стали 08X17H12M2, а также для высокохромистой мартенситно-ферритной стали 20X13, применяемой в бандажах роликов составной конструкции. Химическим составом (табл. 1) и структурой рассматриваемых сталей опреде-

Таблица 1. Химический состав используемых в расчете сталей, мас. %

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
25X1M1Ф	0,25	0,6	0,3	1,65	0,25	0,75	0,25
42CrMo4	0,42	0,7	0,4	1,10	0,19	0,20	–
20X13	0,20	1,5	1,0	13,0	–	–	–
08X17H12M2	0,08	2,0	1,0	17,0	12,0	2,5	(0,4 Ti)

Таблица 2. Физические свойства используемых в расчете сталей (при 20...100 °С) [6, 7]

Марка стали	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг·°С)	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^6$, м ² /с	Температура плавления $T_{пл}$, °С
25X1M1Ф	52	486	12,2	1522
42CrMo4	38	506	7,6	1520
20X13	23	452	5,0	1510
08X17H12M2	16	468	5,0	1400

ляются представленные в табл. 2 теплофизические свойства: коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость C , коэффициент температуропроводности a , температура плавления $T_{пл}$. Расчеты с использованием этих данных, а также экспериментальная проверка проводились для процесса наплавки ленточным электродом Св-12Х13 под флюсом АН-26П на пластины толщиной 40 мм. Режим наплавки на постоянном токе обратной полярности: для ленты 45×0,7 мм — ток 650 А, напряжение 32 В, скорость наплавки 12 м/ч; для ленты 60×0,5 мм — ток 700 А, напряжение 32 В, скорость наплавки 10 м/ч; вылет ленточных электродов 40 мм. Наплавка осуществлялась с использованием аппарата АД-231, источник питания ВДУ-1202.

Результаты расчета размеров зоны проплавления. Для расчета размеров зоны нагрева, ограниченной положением изотермы $T = T_{пл}$, применялась математическая модель [8, 9], основанная на численном решении методом конечных элементов нелинейного трехмерного дифференциального уравнения теплопроводности, которое позволяет учитывать влияние температуры на теплофизические свойства основного металла. Для этого использовались уравнения непрерывных функций, характеризующие температурную зависимость коэффициента теплопроводности для рассматриваемых сталей, полученные путем обработки экспериментальных и расчетных данных работ [6, 7].

Температурная зависимость коэффициента теплопроводности

25X1M1Ф	$y = -0,0161x + 43,429$
42CrMo4	$y = -0,0127x + 39,424$
20X13	$y = 29,113e^{-0,0002x}$
08X17H12M2	$y = 0,0073x + 13,887$

Результаты расчета позволяют оценить текущие значения температуры нагрева, а также количественные характеристики теплового поля в зоне плавления основного металла.

Из результатов расчета (рис. 1) следует, что при неизменных условиях процесса наплавки ленточным электродом 45×0,7 мм площадь попереч-

ного сечения, глубина проплавления и объем расплавленного металла для материала ролика сталь 25X1M1Ф значительно меньше, чем для подслоя из стали 08X17H12M2. Это подтверждается полученными при моделировании сечениями трехмерной модели теплового поля изделия в плоскости, перпендикулярной наплавляемой поверхности (рис. 2). Здесь следует отметить, что поскольку теплофизические свойства низкоуглеродистых низколегированных сталей для наплавки подслоя незначительно отличаются от свойств стали 25X1M1Ф, размеры зоны проплавления материала ролика и такого подслоя также мало различаются.

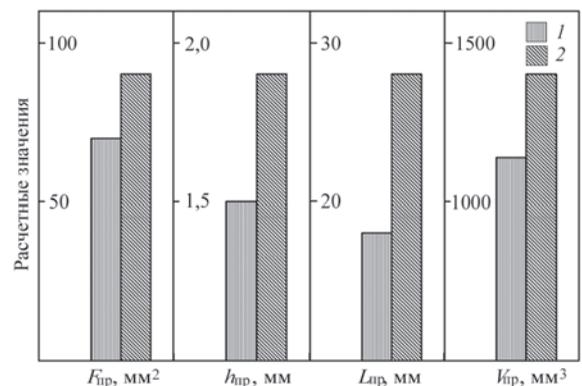
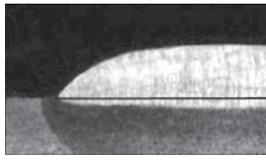
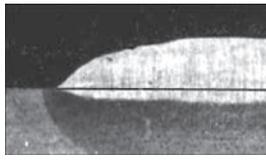


Рис. 1. Расчетные значения размеров зоны проплавления (площади сечения $F_{пр}$, глубины $h_{пр}$, длины $L_{пр}$, объема расплавленного металла $V_{пр}$) (лента 45×0,7 мм): 1 — наплавка на сталь 25X1M1Ф; 2 — на подслое из стали 08X17H12M2



Рис. 2. Граница изотермы $T_{пл}$ в плоскости, перпендикулярной наплавляемой поверхности (лента 45×0,7 мм): а — наплавка на сталь 25X1M1Ф; б — на подслое из стали 08X17H12M2

Таблица 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Параметры проплавления	Материал ролика сталь 25X1M1Ф		Материал подслоя сталь 08X17H12M2	
	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
Площадь $F_{пр}$, мм ²	68...72	67...73	89...92	88...93
Глубина $h_{пр}$, мм	1,50...1,55	1,54...1,58	1,90...1,95	1,92...1,98
Макрошлиф поперечного сечения наплавленного валика				

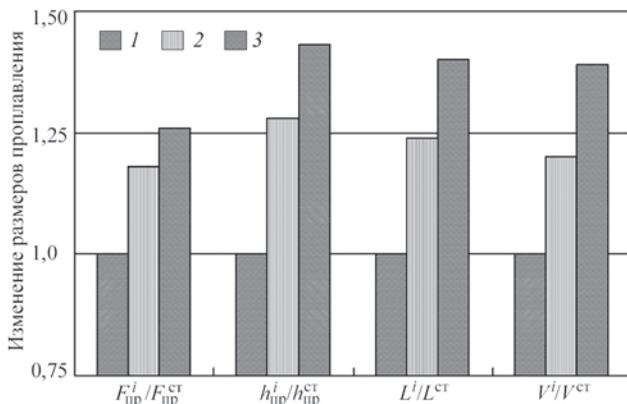


Рис. 3. Соотношение расчетных размеров зоны проплавления при наплавке (лента 60×0,5 мм): 1 — на подслое из стали 42CrMo4; 2 — на сталь 20X13; 3 — на подслое из стали 08X17H12M2

Значительный интерес представляет влияние состава и свойств металла подложки на соотношение расчетных размеров зоны проплавления. При наплавке ленточным электродом 60×0,5 мм размеры зоны проплавления стали 20X13 в 1,25 раза, а стали 08X17H12M2 — более чем в 1,35 раза, соответственно, превышают эти показатели для стали 42CrMo4 (рис. 3). Еще в большей мере отличается объем расплавленного металла. Сравнение расчетных и экспериментальных данных о влиянии состава и свойств стали 25X1M1Ф и 08X17H12M2 на площадь и глубину проплавления при наплавке ленточным электродом 45×0,7 мм (табл. 3) подтверждает адекватность методики расчета. Уточнение прогноза геометрии зоны проплавления путем применения предложенной расчетной методики позволяет обосновать изменения параметров режима наплавки при разработке технологии восстановления роликов МНЛЗ. С этим связан дифференцированный подход к выбору режима, при котором значения погонной энергии наплавки поверхностного слоя и подслоя различны и определяются их составом и свойствами [10].

Выводы

1. При изготовлении и восстановлении роликов МНЛЗ наплавкой поверхностного слоя ленточным электродом размеры зоны проплавления зависят от химического состава и теплофизических свойств основного металла (материала ролика), а

при наплавке на подслое — от состава и свойств подслоя.

2. При наплавке на подслое из мартенситно-ферритной высокохромистой стали и, в большей степени, на подслое из аустенитной хромоникелевой стали, расчетные значения площади поперечного сечения и глубины проплавления, объема расплавленного металла возрастают по сравнению с наплавкой на материал ролика (перлитную сталь) и на подслое из низкоуглеродистой низколегированной стали.

Список литературы

1. Рябцев И. А., Бабинцев А. А., Рябцев И. И. (2011) Влияние пластичного подслоя на термическую стойкость многослойного наплавленного металла. *Автоматическая сварка*, **10**, 22–25.
2. Рябцев И. А., Сенченков И. К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Киев, Экотехнология.
3. Кирчу И. Ф., Степанова Т. В., Супрун М. В. (2015) Перспективы применения стали с нитрованадиевым упрочнением для роликов слябовых МНЛЗ взамен стали 25X1M1Ф. *Металл и литье Украины*, **1**, 18–22.
4. Домбровский Ф. С., Лещинский Л. К. (1995) *Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок*. Киев, Институт электросварки им. Е. О. Патона.
5. (2014) *Cored Wires for Cladding and Thermal Metal Spraying*. Welding Alloys Group.
6. Mills K. C. (2002) *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
7. Peet M. J., Hasan H. S., Bhadeshia H. K. (2011) Prediction of thermal conductivity of steel. *International Journal of Heat and Mass*, **54**, 2602–2616.
8. Матвиенко В. Н., Мазур В. А., Лещинский Л. К. (2015) Оценка формы и размеров сварочной ванны при наплавке составным ленточным электродом. *Автоматическая сварка*, **9**, 30–33.
9. Мазур В. А., Лещинский Л. К., Матвиенко В. Н. (2018) Влияние теплофизических свойств основного металла на геометрию зоны проплавления при наплавке ленточным электродом. *Сварочное производство*, **3**, 10–14.
10. Лещинский Л. К., Матвиенко В. М., Мазур В. О. (2017) Україна, Пат. 116526, МПК В23К 9/04. *Спосіб наплавлення роликів машин безперервного лиття заготовок*.

References

1. Ryabtsev, I.A., Babinets, A.A., Ryabtsev, I.I. (2011) Effect of sub-layer on heat resistance of multilayer deposited metal. *The Paton Welding J.*, **10**, 18–21.
2. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing operations*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
3. Kirchu, I.F., Stepanova, T.V., Suprun, M.V. (2015) Prospects of application of steel with nitrovanadium hardening for rolls of slab CCMB instead of steel 25Kh1M1F. *Metall i Litye Ukrainy*, **1**, 18–22 [in Russian].

4. Dombrovsky, F.S., Leshchinsky, L.K. (1995) *Operability of deposited rolls of continuous casting machines for billets*. Kiev, PWI [in Russian].
5. (2014) *Cored wires for cladding and thermal metal spraying*. Welding Alloys Group.
6. Mills, K.C. (2002) *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. England, Cambridge, Woodhead Publishing.
7. Peet, M.J., Hasan, H.S., Bhadeshia, H.K. (2011) Prediction of thermal conductivity of steel. *Int. J. of Heat and Mass*, **54**, 2602-2616.
8. Matvienko, V.N., Mazur, V.A., Leshchinsky, L.K. (2015) Evaluation of shape and sizes of weld pool in surfacing using combined strip electrode. *The Paton Welding J.*, **9**, 28-31.
9. Mazur, V.A., Leshchinsky, L.K., Matvienko, V.N. (2018) Influence of thermophysical properties of base metal on geometry of penetration zone in strip electrode surfacing. *Svarochn. Proizvodstvo*, **3**, 10-14 [in Russian].
10. Matvienko, L.K., Mazur, V.O. (2017) *Method of surfacing of rolls of continuous casting machines*. Pat. 116526, Ukraine, Int. Cl. B23K 9/04 [in Ukrainian].

РОЗРАХУНОК РОЗМІРІВ ЗОНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ РОЛИКІВ МАШИН БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

В. М. МАТВИЄНКО, Л. К. ЛЕЩІНСЬКИЙ, В. О. МАЗУР

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.
E-mail: matvivenkovn@gmail.com

Показано, що при наплавленні роликів машин безперервного лиття заготовок на розміри зони проплавлення впливають хімічний склад та теплофізичні властивості матеріалу ролика або наплавленого підшару. Представлено розрахункові значення площі поперечного перерізу та глибини проплавлення, об'єму розплавленого металу, що отримані чисельним моделюванням на основі рішення нелінійного тривимірного диференціального рівняння теплопровідності з урахуванням апроксимованої температурної залежності коефіцієнта теплопровідності. Встановлено розрахунком і підтверджено експериментом, що розміри зони проплавлення збільшуються при наплавленні стрічковим електродом під флюсом на підшар з мартенситно-феритної багатохромистої сталі і ще більшою мірою — на підшар з аустенітної хромонікелевої сталі в порівнянні з наплавленням на матеріал ролика або на підшар з низьковуглецевої низьколегованої сталі. Бібліогр. 10, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: ролик машини безперервного лиття заготовок, основний метал, наплавлення під флюсом, стрічковий електрод, зона проплавлення, розміри, чисельне моделювання, наплавлений шар, підшар, хімічний склад, теплофізичні властивості, коефіцієнт теплопровідності

CALCULATION OF PENETRATION ZONE DIMENSIONS IN SURFACING OF ROLLS OF MACHINES FOR CONTINUOUS CASTING OF BILLETS

V.N. MATVIENKO, L.K. LESHCHINSKY, V.A. MAZUR

State Higher Education Institute Pryazovskyi State Technical University 7 Universitetskaya Str., 87500, Mariupol, Ukraine.
E-mail: matvivenkovn@gmail.com

It is shown that in surfacing of rolls in machines for continuous casting of billets (MCCB) the dimensions of penetration zone are affected by chemical composition and thermal physical properties of the material of roller or deposited sublayer. The calculated values of cross-sectional area, penetration depth and volume of the molten metal are presented obtained by numerical modeling on the basis of the solution of the nonlinear three-dimensional differential equation of thermal conductivity, taking into account the approximated temperature dependence of thermal conductivity coefficient. It was established by calculation and confirmed by experiment that the dimensions of penetration zone increase in surfacing by strip electrode under flux on a sublayer of martensitic-ferrite high-chromium steel and in a higher extent on a sublayer of austenitic chromium-nickel steel as compared to surfacing on the material, or on a sublayer of low-carbon low-alloyed steel. 10 Ref., 3 Tab., 3 Fig.

Keywords: roll of machine for continuous casting of billets, base metal, submerged surfacing, strip electrode, penetration zone, dimensions, numerical simulation, deposited layer, sublayer, chemical composition, thermophysical characteristics, thermal conductivity coefficient

Поступила в редакцію 14.05.2018

Международная конференция

СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ-2018

(инновационные технологические решения и передовые системы автоматизации)

19-21 сентября 2018, Одесса

Организаторами конференции выступают группа компаний TeraWatt Group (ООО «М Технология», ООО «Азов Контролз», ООО «Автоматизация ТераВатт Груп», TeraWatt Solutions GmbH) и ООО «Стил Ворк».

Конференция посвящена особенностям и основным тенденциям развития металлургической отрасли.

В ходе конференции будут рассмотрены, проанализированы современные вызовы и задачи доменного, коксохимического, агломерационного производств, а также особенности функционирования современного газоочистного оборудования.

Место проведения: г. Одесса, ул. Маразлиевская, 1/20 (гостиница «Парк Шевченко»).