

6-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛИ «SteelSim 2015»

23–25 сентября 2015 г. в г. Бардолино (Италия) состоялась 6-я Международная конференция, посвященная моделированию металлургических процессов в производстве стали «SteelSim 2015».

Конференция организована Итальянским обществом металлургии (Associazione Italiana di Metallurgia (AIM)) при поддержке компаний Ecotre Valente (Италия), JMatPro (Великобритания), Thermo-Calc Software AB (Швеция), Transvalor S.A. (Франция) и TES (Италия). Председатели конференции — президент AIM проф. Карло Мапелли (Италия) и проф. Бруно Бэкмайр (Австрия). В состав научного комитета конференции вошли представители Германии, Италии, Канады, Чехии, Австрии, Франции.

В работе конференции приняли участие представители не только университетов и научно-исследовательских центров (более 50 организаций), но и представители крупных промышленных компаний: Danieli (Италия), SMS Mevac (Германия), POSCO (Южная Корея), VoestAlpine Stahl (Австрия), ArcelorMittal (Франция), ThyssenKrupp Steel (Германия), VDEh (Германия), Mintek (ЮАР), TATA Steel (Нидерланды), Finkl Steel (Канада) и др.

В течение трех дней работали секции: внепечная обработка стали, разливка и затвердевание (5 докладов); затвердевание и прокатка (4); сталеплавильное производство и тепловые процессы в металлургии (7); прогнозирование микроструктуры (13); разливка и затвердевание (22); формоизменение и термомеханическая обработка металла (3). Также представлено 5 стендовых докладов. Всего заслушано и обсуждено 60 докладов представленных специалистами из 19 стран мира: Германии (14), Австрии (7), Великобритании (6), Польши (5), Италии (4), Швеции (3) и др.

Моделированию процессов специальной электрометаллургии посвящено 3 работы: одна по ЭШП [1] и две по ВДП [2, 3].

Проф. Б. Бэкмайр (Montanuniversitaet Leoben, Австрия) в своем вступительном докладе отметил, что вычислительная техника в сталеплавильном производстве применяется уже почти 60 лет и пионером в этой области в 1957 г. стала британская ассоциация BISRA.

Большой интерес среди участников конференции вызвал доклад компании Danieli (Италия), посвященный созданию искусственной нейронной сети для отслеживания и прогнозирования температуры металлической ванны при ДСП [4]. В среде MatLab создана нейронная сеть, которую обучили на основе 1240 реальных плавов. Статистическая проверка сети показала, что средняя ошибка прогнозирования температуры составила 4,2 °С, а регрессия находится на уровне 0,86. Такой результат разработчики сочли удачным и внедрили модель на заводе Acciaierie Bertoli Safau (Италия). В течение 236 плавов был проведен еще один цикл обучения и адаптации, после чего сеть активно работала на протяжении 547 плавов. Благодаря использованию нейронной сети удалось добиться снижения температуры ванны на 10 °С и снизить энергозатраты на плавку.

Наибольшее число докладов (22) было представлено в секции «Разливка и затвердевание».

Представитель TATA Steel (Нидерланды) Д. Ван Одик показал результаты исследования влияния технологических параметров разливки на характер движения потоков металла в кристаллизаторе при непрерывной разливке слябовых заготовок 225×1300/1500/1700 мм на МНЛЗ № 21 завода TATA Steel Ijmuiden [5]. Он отметил, что опыт TATA Steel Ijmuiden позволяет утверждать, что особенности движения металла вблизи мениска прямо влияют на образование поверхностных дефектов в непрерывно литой заготовке, а организация движения металла с двойным завихрением обеспечивает снижение дефектности. В работе исследованы влияние на движение металла в кристаллизаторе электромагнитного торможения (устройства торможения расположены в верхней и нижней частях кристаллизатора), ширины кристаллизатора (1300, 1500 и 1700 мм) и скорости разливки (1,85, 1,60 и 1,45 м/мин соответственно для обеспечения одинаковой производительности). Рассмотрены три варианта работы устройств электромагнитного торможения: торможение отключено; включено; включено только нижнее тормозящее устройство, а верхнее отключено. При отключенном торможении имеет место глубокое проникновение струи жидкой стали в кристалли-

затор, что негативно влияет на рост твердой корочки и увеличивает риск захватывания неметаллических включений. Включение верхнего и нижнего устройств торможения резко уменьшает глубину проникновения струи, однако не способствует развитию вторичных завихрений. Включение только нижнего устройства торможения не только снижает скорость струи, но и способствует образованию двойных завихрений с небольшой циркуляцией вблизи мениска. Интересно, что большая часть сортамента на Ijmuiden CC21 сегодня разливается с использованием верхнего и нижнего устройств торможения, поэтому результаты данной работы наверняка станут основанием для проведения более глубоких исследований и, возможно, позволят решить проблему поверхностных дефектов в непрерывно литых заготовках.

Проф. Д. Шариари (ETS, Канада) представил результаты работы по исследованию влияния технологических параметров разливки на время затвердевания слитка [6]. В программе Transvalor TherCast моделировали затвердевание 40-тонных слитков из низколегированной стали 25CrMo4 и нержавеющей стали 25-20. Для изучения влияния температуры подогрева изложницы, времени (скорости) и температуры разливки провели серию из 54 численных экспериментов с использованием канадского суперкомпьютера. Установлено, что скорость заливки незначительно влияет на время затвердевания: при увеличении скорости в 1,5 раза продолжительность затвердевания увеличивается на 10 мин (1,2 %). Продолжительность затвердевания слитка можно уменьшить почти на 1,6 ч (12 %), если одновременно снизить температуру разливки и уменьшить подогрев изложницы. Время затвердения слитка увеличивается при повышении температуры подогрева изложницы с 13,01 ч до 13,79 ч при увеличении температуры подогрева до 350 °С и температуре разливки 1570 °С. Интересно, что при дальнейшем повышении температуры изложницы до 550 °С время затвердевания слитка уменьшается и составляет 13,34 ч. Для проверки результатов моделирования на заводе компании Finkl Steel отлили 40-тонный слиток из стали 25CrMo4, однако технологические параметры, выбранные для отливки такого слитка, авторы не раскрывают. Во время заливки и во время затвердевания измеряли температуру изложницы. Расчетные данные хорошо согласуются с результатами реального эксперимента, расхождение между измеренной и рассчитанной температурой изложницы составило менее 4 %.

На основе приведенных данных авторами работы построен график зависимости времени за-

твердевания слитка от температуры подогрева изложницы, который еще раз показывает, что при увеличении подогрева время затвердевания может уменьшаться. Авторы получили необычные результаты и, возможно, обнаружили новое интересное явление, однако никаких объяснений его в данном докладе приведено не было.

В работе конференции принимали участие представители компаний-разработчиков программного обеспечения для компьютерного моделирования, в том числе и для моделирования металлургических процессов (MAGMA, ANSYS Fluent, ProCAST, DeForm, Forge, Thercast, Thermo-Calc и др.).

Представитель MAGMA (Германия) И. Хан обратил внимание на то, что собственно моделирование достигло настолько высокого уровня, что расчет заливки и затвердевания слитка стал достаточно простой задачей. Поэтому необходимо перейти к оптимизации моделирования для повышения информативности результатов и уменьшения трудозатрат, необходимых для их получения [7]. Он отметил, что проведение и оптимизация цикла численных экспериментов позволяет определить наиболее важные технологические параметры процесса.

Интересно, что основная часть представленных в докладах результатов моделирования процессов затвердевания получена с использованием специализированного коммерческого программного обеспечения (TherCast, ProCAST, MAGMA и др.), гидродинамику при разливке стали моделировали с помощью мультифизических расчетных комплексов (ANSYS и Comsol), а для прогнозирования микроструктуры в основном использовали программы собственной разработки. Отметим, что для расчета термодинамических и механических свойств материалов повсеместно использовали программу Thermo-Calc.

Конференция «SteelSim 2015» еще раз показала, что современное высокотехнологичное металлургическое производство уже сложно представить без применения компьютерных программ и компьютерного моделирования. Более того, ряд физических и термодинамических явлений, а также технологических особенностей металлургических процессов можно изучить только с помощью компьютерных моделей.

Организаторы сообщили, что следующая 7-я конференция «SteelSim 2015» состоится в 2017 г. и будет проведена в Китае.

1. *Simulation of electrical and thermal phenomena at electroslag remelting on a three-phase circuit* / L. Medovar, Ye. Volchenkov, V. Petrenko et al. // Proc. of the 6th Intern. conf. on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (SteelSim). — Bardolino, 2015.

2. *Modelling* the vacuum arc remelting process in rectangular geometries / C. Schubert, M. Eickhoff, A. Rueckert et al. // Там же.
3. *Measurement* of emission coefficients for Alloy 718 to improve numerical simulation of industrial scale VAR process / M. Eickhoff, A. Rueckert, H. Pfeifer et al. // Там же.
4. *Artificial* neural network approach for molten bath temperature tracking on EAF/VD / S. Guanin, V. Dimitrijevic, M. Picciotto et al. // Там же.
5. *Impact* of casting parameters on mould fluid flow in the IJmuiden CC21 / D. van Odyck, Mr. Singh, D. van der Plas, H. Wouters // Там же.
6. *3D numerical* simulation of solidification of large size ingots of high strength steels / D. Shahriari, A. Loucif, M. Jahazi et al. // Там же.
7. *Hahn I.*, Hepp E., Schneider M. From simulation to virtual optimization of ingot and continuous casting processes // Там же.

Е.А. Волченков

НИКОПОЛЬСКОМУ ЗАВОДУ ФЕРРОСПЛАВОВ 50 ЛЕТ

Флюсы для электрошлакового переплава стали

Марка	Содержание по техническим условиям, %										
	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	C	S	P
	не более										
АНФ-1	≥ 90	≤ 3	≤ 5	≤ 2,5	–	0,5	–	–	0,1	0,05	0,02
АНФ-1-1	≥ 90	≤ 3	≤ 5	≤ 2,5	–	0,5	0,05	–	0,05	0,05	0,02
АНФ-1-3-0	≥ 85	≤ 8	≤ 8	≤ 1,0	–	0,5	0,05	–	0,03	0,05	0,02
АНФ-6	Основа	25–31	≤ 8	≤ 2,5	–	0,5	0,05	–	0,1	0,05	0,02
АНФ-6-1	Основа	25–31	≤ 8	≤ 2,5	–	0,5	0,05	–	0,05	0,05	0,02
АНФ-6-2	Основа	25–31	≤ 8	≤ 1,0	–	0,5	0,05	–	0,1	0,05	0,02
АНФ-6-3	Основа	25–31	≤ 8	≤ 1,0	–	0,5	0,05	–	0,05	0,05	0,02
АНФ-6-3-0	Основа	25–31	≤ 8	≤ 1,0	–	0,5	0,05	–	0,03	0,05	0,02
АН-295	11–17	49–56	46–31	≤ 2,5	–	0,5	0,05	6,0	0,1	0,05	0,02
АНФ-28	41–49	≤ 5	26–32	20–24	–	0,5	–	≤ 6	0,1	0,06	0,03
АНФ-29	37–45	13–17	24–30	11–15	–	0,5	–	2–6	0,1	0,06	0,03
АНФ-32	34–42	24–30	20–27	5–7	0,3–1,3	0,5	–	2–6	0,1	0,06	0,03
АНФ-35	24–30	28–32	20–26	4–8	–	0,5	–	12–16	0,1	0,06	0,03

Флюсы сварочные

Марка	Содержание по стандарту, %					
	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂
АН-60	42–46	36–41	≤ 10	≤ 3	≤ 6	5–9
АН-20С	19–24	≤ 0,5	3–9	9–13	27–32	25–33
АНФ-26С	29–33	2,5–4,0	4–8	15–18	19–23	20–24
АН-43	18–22	5–9	14–18	≤ 2	30–36	17–21
АН-47	28–33	11–18	13–17	6–10	9–13	8–13
АН-17М	18–22	≤ 3	14–18	8–12	24–29	21–25
ОСЦ-45М	38–44	38–44	≤ 10	≤ 3	≤ 6	6–9
АН-67Б	12–16	14–18	≤ 10	–	35–40	11–16
АН-68М	25–30	20–28	9–11	–	19–25	10–13
АН-348А	40–44	31–38	≤ 12	≤ 7	≤ 6	3–6
АН-348В	40–44	30–34	≤ 12	≤ 7	≤ 8	3–6

Марка	Содержание по стандарту, %						
	Fe ₂ O ₃	Ca ₂ O+Na ₂ O	ZrO ₂	TiO ₂	C	S	P
	не более						
АН-60	≤ 0,9	–	–	–	–	0,05	0,05
АН-20С	≤ 0,8	2,0–3,0	–	–	–	0,06	0,03
АНФ-26С	≤ 1,5	–	–	–	0,05	0,08	0,08
АН-43	2–5	–	–	–	–	0,05	0,05
АН-47	0,5–3,0	–	1,1–2,2	4–7	–	0,05	0,08
АН-17М	2,0–5,0	–	–	–	–	0,05	0,05
ОСЦ-45М	0,5–2,0	–	–	–	–	0,12	0,10
АН-67Б	≤ 1,0	0,5–2,5	–	4–7	0,1	0,05	0,05
АН-68М	≤ 1,2	≤ 2,5	–	1–6	0,05	0,05	0,05
АН-348А	0,5–2,0	–	–	–	–	0,12	0,12
АН-348В	0,5–2,0	–	–	0,5–0,6	–	0,12	0,13