

УДК 621.746.6:531.42:62-412

Ф.К. Биктагиров, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр., e-mail: biktagirov@paton.kiev.ua

В.А. Шаповалов, чл.-корр. НАН Украины, проф., зав. отделом, e-mail: shapovalov@paton.kiev.ua

А.В. Гнатушенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр., e-mail: sasha-1978@ukr.net

Р.Ю. Качан, вед. инженер, e-mail: kachan808@gmail.com

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

Компьютерное моделирование формирования 50-тонного листового слитка

Статья посвящена исследованию особенностей формирования 50-тонного листового слитка из стали типа 15Г2СФ, идущего на изготовление толстолистового проката. С использованием программного пакета «MagmaSoft» выполнено компьютерное моделирование разлива и затвердевания металла. Показано, что после окончания разлива сифонным способом металл в центральной осевой зоне слитка имеет более высокую температуру по сравнению с вышележащими горизонтами. Также более прогретой, до температуры 650–700 °С, является центральная по высоте зона изложницы.

Согласно результатам моделирования, полное время затвердевания металла при получении данного слитка составляет около 8 часов. По мере затвердевания металла увеличивается протяженность двухфазной зоны и, начиная примерно с 2 часов после окончания разлива, темп нарастания объема жидко-твердой области резко возрастает. Так, к 3 часам с начала периода затвердевания протяженность двухфазной зоны по оси слитка составляет около 35 % от высоты тела слитка, а к 4,5–5 часам – уже почти 80 %. Моделирование показывает, что постепенно происходит сужение металлической ванны на уровне верха изложницы, и к 3,5 часам после окончания разлива двухфазная зона в верхней части слитка полностью перекрывает нижележащие области жидкого состояния. Поэтому с этого времени затрудняется поступление жидкого металла из прибыли вглубь слитка, что приводит к образованию на расстоянии 300–500 мм от его верха усадочных пустот и повышенной пористости металла.

Выявленные особенности формирования 50-тонного листового слитка свидетельствуют о наличии в нем дефектов усадочного происхождения, которые могут выявляться при ультразвуковом контроле толстолистового проката. Поэтому необходимо повышать качество исходной литой заготовки, например, применяя технологию электрошлакового обжига и подпитки, которая позволяет повысить не только физическую, но и химическую однородность подобных слитков.

Ключевые слова: плоский слиток, моделирование, «MagmaSoft», разливка, температура металла, затвердевание, двухфазная зона, усадочные дефекты.

Несмотря на все большее распространение непрерывной разлива стали на установках машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), определенная доля жидкого металла разливается в изложницы с получением крупных слитков массой десятки и сотни тонн. Они предназначены для производства изделий, которые невозможно или нецелесообразно получать непрерывной разливкой. В основном это так называемые круглые кузнечные слитки, подвергаемые ковке (прессованию) для придания им формы, близкой к геометрическим размерам конкретных изделий, таких как прокатные валки, роторы, диски и им подобные. Помимо кузнечных слитков разливкой в изложницы получают и плоские слитки, предназначенные для производства толстолистового проката.

Так для производства горячекатаного листа (плит) толщиной от 80 до 250 мм из низколегированной вы-

сокопрочной стали металл разливают в плоские слитки массой до 50 тонн. При прокатке таких слитков на плиты большой толщины (180 мм и более) в зоне, соответствующей верхней части слитка, нередко при ультразвуковом контроле выявляются дефекты.

Хорошо известно, что образование и развитие дефектов в стальном слитке связано со сложными гидродинамическими, теплофизическими и физико-химическими процессами, происходящими при переходе металла из жидкого состояния в твердое. Оказывают влияние на эти процессы много факторов, в том числе такие, как способ разлива, геометрические параметры разливочной оснастки, марка стали, температура разлива, способ утепления прибыли и ряд других. Учитывая трудоемкость и сложность исследования слитков, особенно крупных, путем их производства и дальнейшего изучения внутреннего

строения, в настоящее время для прогнозирования влияния тех или иных параметров на качество литых изделий широко применяются методы моделирования.

Поэтому с целью выявления причин образования дефектов в упоминаемых листовых слитках проводилось моделирование затвердевания металла при их отливке.

Первоначально выполнялось математическое (компьютерное) моделирование с использованием программного комплекса «MagmaSoft», широко используемого для моделирования процессов литья и затвердевания металла [1]. Исследования проводились применительно к производству слитка массой 50 т из стали типа 15Г2СФ с содержанием основных легирующих элементов, % мас.: С = 0,14–0,16; Mn = 1,2–1,4; Si = 0,3–0,5; V = 0,1–0,15; Nb = 0,03–0,05; Ni = 0,1–0,2. Температура ликвидуса этой стали – 1510 °С, а солидуса – 1440 °С.

Размеры внутренней полости изложницы и прибыльной надставки моделируемого слитка приведены на рис. 1.

Разливка металла с температурой 1535–1540 °С при производстве данного слитка осуществляется в чугунную изложницу, подогретую до 100 °С сифонным способом через один установленный по центру слитка стакан диаметром 60 мм при диаметре сифонной проводки 110 мм, как это показано на разрезе поперек середины широкой грани слитка 3Д

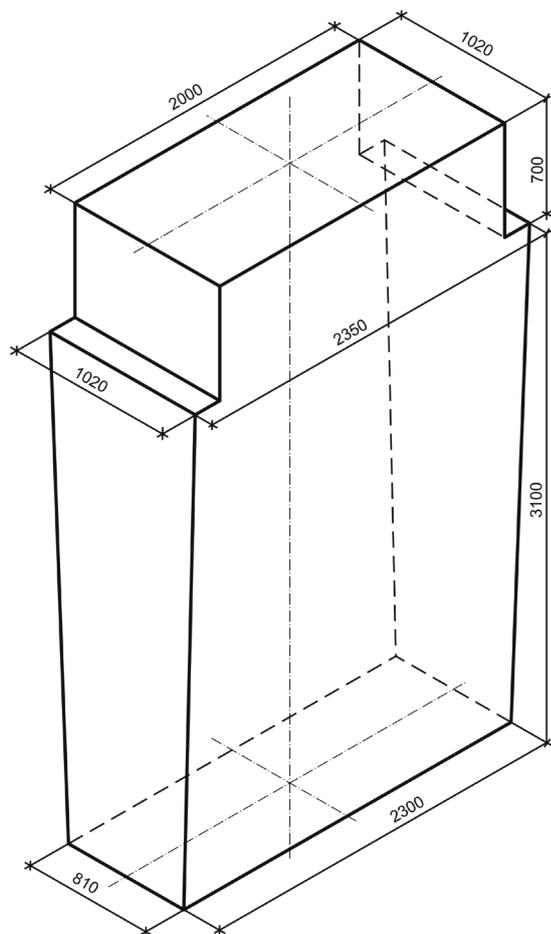


Рис. 1. Геометрические размеры внутренней полости изложницы и прибыльной надставки для отливки 50-тонного листового слитка

модели разливочной оснастки (рис. 2). Прибыльная надставка по периметру утепляется теплоизолирующими вкладышами толщиной 60 мм, в процессе заливки на зеркало металла подается утепляющая смесь в количестве 120–140 кг.

Основные сведения, необходимые для выполнения расчета гидродинамики разливки и кристаллизации металла, касающиеся теплофизических свойств металла, в том числе их температурные изменения, особенностей процессов теплопередачи как в металлической ванне, так и на границе металл-изложница и изложница-окружающая среда в различные периоды формирования слитка, теплоизоляционные свойства применяемых для утепления прибыли теплоизолирующих смесей и огнеупорных изделий и ряд других были выбраны из базы данных упоминаемого программного пакета «MagmaSoft».

Исследование формирования рассматриваемого листового слитка включало в себя моделирование разливки и моделирование затвердевания залитого в изложницу металла. Согласно полученным результатам, время заполнения металлом изложницы и прибыльной надставки составило около 25 минут, что соответствовало времени заливки в реальных условиях. Температурное поле тела слитка после окончания разливки неоднородное. Хорошо видно, что наиболее высокую температуру в пределах 1523–1529 °С имеет металл в центральной (условно осевой) зоне шириной 150–200 мм практически по всей высоте слитка, а также в верхней части прибыльной надставки (рис. 3). Причем этот осевой «шлейф» наиболее перегретого металла имеет небольшое отклонение в сторону, противоположную сифонной проводке.

Обращает на себя внимание то, что температура металла в центральной зоне самой верхней части тела слитка ниже по сравнению с нижележащими горизонтами. А самую высокую температуру имеет уча-

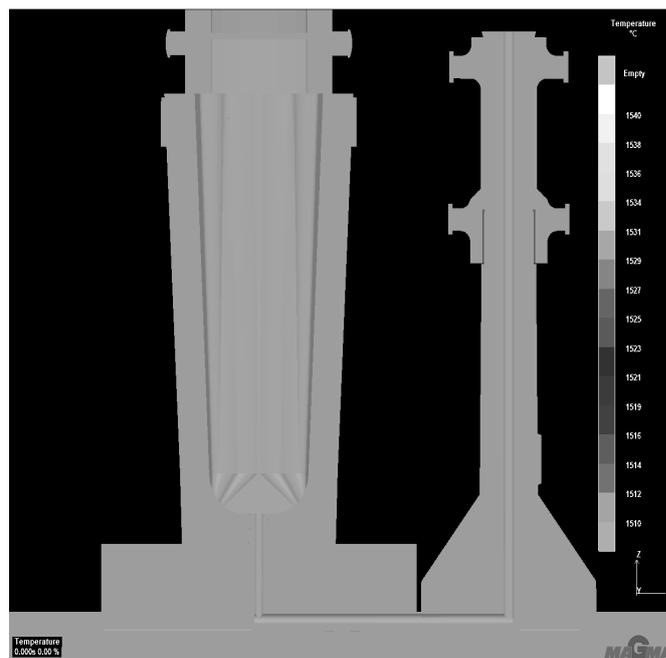


Рис. 2. Вид оснастки и схема разливки при получении листового слитка массой 50 т

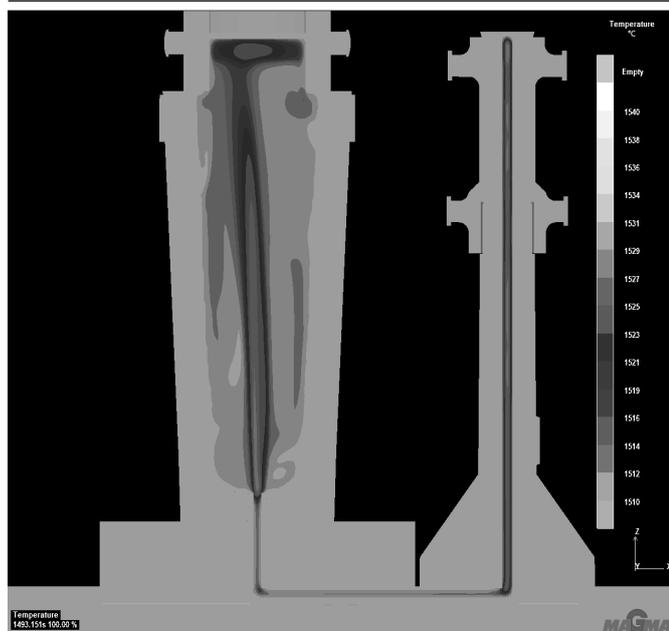


Рис. 3. Температурное поле слитка после окончания разливки

сток в донной части слитка, непосредственно примыкающий к месту поступления металла в изложницу. Такая картина распределения температуры в объеме залитого в изложницу металла является следствием сочетания гидродинамических процессов, характерных для сифонной разливки в целом, с особенностями металлических потоков, возникающих в рассматриваемых условиях получения конкретного слитка.

Программный пакет «MagmaSoft» рассчитывает при заливке и прогрев оснастки, который оказывает влияние в дальнейшем на условия теплоотвода от затвердевающего металла и учитывается при оценке хода кристаллизации. Так согласно результатам моделирования на время окончания заливки наиболее прогретой, до температуры 650–700 °С, является центральная по высоте зона изложницы. Донная часть изложницы вследствие охлаждающего действия поддона имеет температуру на 100–150 °С ниже. Также меньше по сравнению с изложницей прогрет прибыльной надставки, которая изолирована от горячего металла огнеупорным материалом.

Дальнейшее моделирование кристаллизации металла осуществлялось с учетом теплового состояния слитка и оснастки, которое было выявлено на момент окончания разливки. Отмеченные факторы – неравномерность температуры металла и температуры оснастки имеют очень важное значение с точки зрения формирования слитка, так как оказывают влияние на условия теплоотвода от различных по высоте его участков. Если бы моделировалось затвердевание металла после мгновенного заполнения изложницы, имеющей одинаковую температуру по высоте, жидким металлом определенной температуры, одинаковой для всего объема слитка, результаты такого моделирования не соответствовали бы тому, что происходит в реальных условиях.

Математическое моделирование затвердевания с помощью программного пакета «MagmaSoft» позволяет отследить изменение большого числа показате-

лей, имеющих отношение к затвердеванию металла, залитого в изложницу. Помимо сведений о температурном поле слитка и связанного с этим данных о времени полного затвердевания, динамики продвижения фронта кристаллизации, изменении объема (массы) жидкого и твердого металла, положения тех или иных изотерм, моделирование показывает наличие и места сосредоточения усадочных пустот и повышенной рыхлости, оценивает плотность металла, в том числе по критерию Ниямы [2]. А также рассчитывает степень напряженно-деформационного состояния как слитка, так и изложницы и даже степень ликвации растворенных в железе элементов.

Наиболее информативными и показательными, с точки зрения понимания условий формирования рассматриваемого слитка, являются данные о положении во времени изотерм ликвидуса и солидуса. То есть сведения о продвижении фронта начала и окончания кристаллизации металла. На рис. 4 в качестве примера показан вид затвердевающего слитка по двум осевым сечениям вдоль широкой и узкой его граней с выделением областей полностью затвердевшего металла, двухфазной области и оставшейся жидкой фазы.

Как следует из результатов моделирования, после окончания периода заливки возле стенок изложницы уже имеется корка затвердевшего металла с небольшой следующей за ней зоной двухфазного состояния. Только в донной части слитка в прилегающей к одной из граней изложницы области имеется довольно развитая двухфазная зона. Это результат ранее описанной неравномерности температурного поля слитка вследствие сифонной разливки. Количество жидкой незатвердевшей фазы к этому времени составляет около 90 % от всего объема залитого металла.

Первоначально по мере протекания процесса кристаллизации количество затвердевшего металла быстро увеличивается, а количество жидкого, естественно, уменьшается. Так спустя всего 40 минут после окончания разливки количество жидкой фазы составляет около 60 %. К этому времени еще сохраняется тепло перегрева металла, и область двухфазного состояния не получает значительного развития.

В дальнейшем темп нарастания твердой фазы снижается, а объем области двухфазного состояния наоборот увеличивается, и к 3 часам с начала периода затвердевания протяженность твердо-жидкой зоны (δ) по оси слитка составляет почти 35 % от высоты тела слитка (рис. 5).

Обращает на себя внимание то, что к этому времени (рис. 4, в), четко видно наличие сужения металлической ванны на уровне верха изложницы. Скорее всего, это следствие сочетания нескольких факторов. А именно, более низкой температуры металла и изложницы в этой области к моменту окончания разливки по сравнению с нижележащими уровнями, а также «углового эффекта» повышенного теплоотвода с верхней плоскости изложницы и в местах перехода от узкой ее грани к широкой.

Вышеописанная особенность формирования исследуемого листового слитка приводит к тому, что спустя около 3,5 часа с начала периода затвердева-

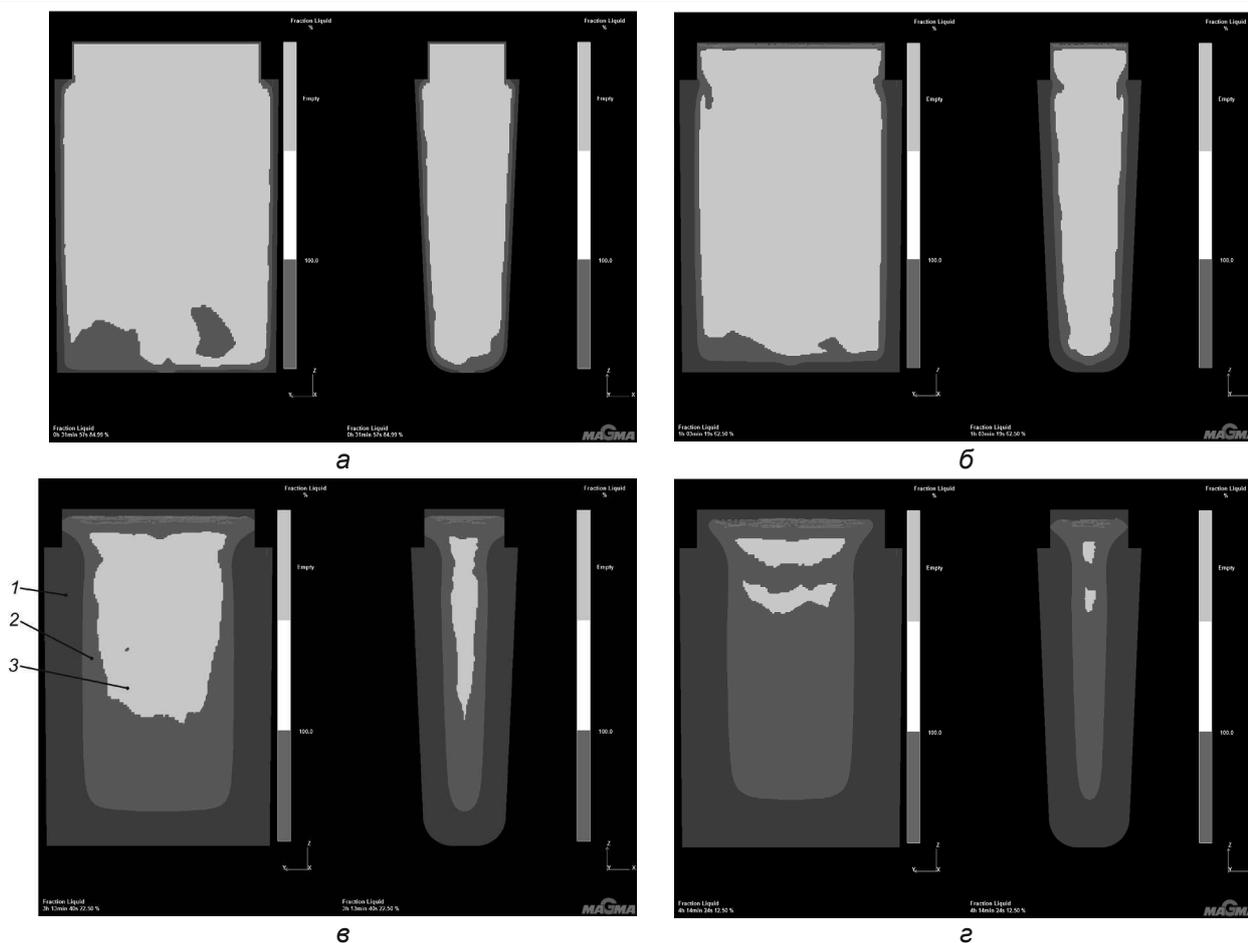


Рис. 4. Вид формирующегося слитка спустя: 6 мин (а), 38 мин (б), 2 ч 49 мин (в) и 4 ч 50 мин (г) после окончания разливки: 1 – полностью затвердевший металл; 2 – двухфазная область; 3 – жидкий металл

ния, двухфазная зона в верхней части слитка полностью перекрывает остающуюся ниже еще незатвердевшую жидкую часть слитка. Хорошо это видно на приведенной на рис. 4 (г) картине положения областей твердой, жидко-твердой и жидкой фаз после 3 ч 50 мин после окончания разливки. Поэтому с этого времени затрудняется поступление жидкого металла из прибыли в тело слитка и подпитка претерпеваю-

щего усадку незакристаллизовавшегося металла. В итоге после полного затвердевания всего металла, которое согласно моделированию наступает спустя примерно 7 ч 50 мин после окончания разливки, в осевой верхней зоне слитка образуется усадочная полость, как это показано на рис. 6. Да и вся центральная зона слитка, ввиду формирования здесь протяженной области двухфазного состояния почти

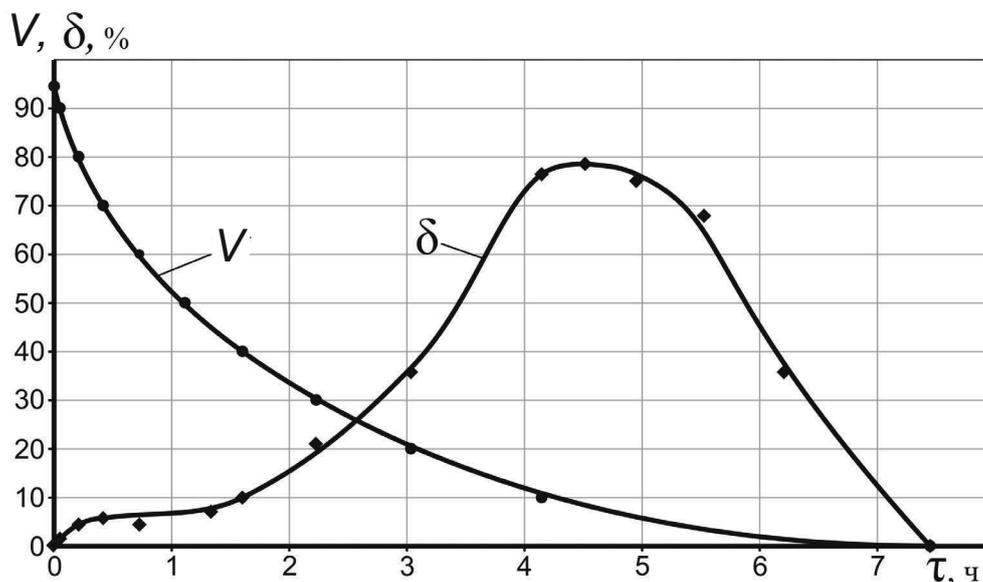


Рис. 5. Изменение объема жидкой фазы (V) и протяженности двухфазной зоны по оси слитка (δ)

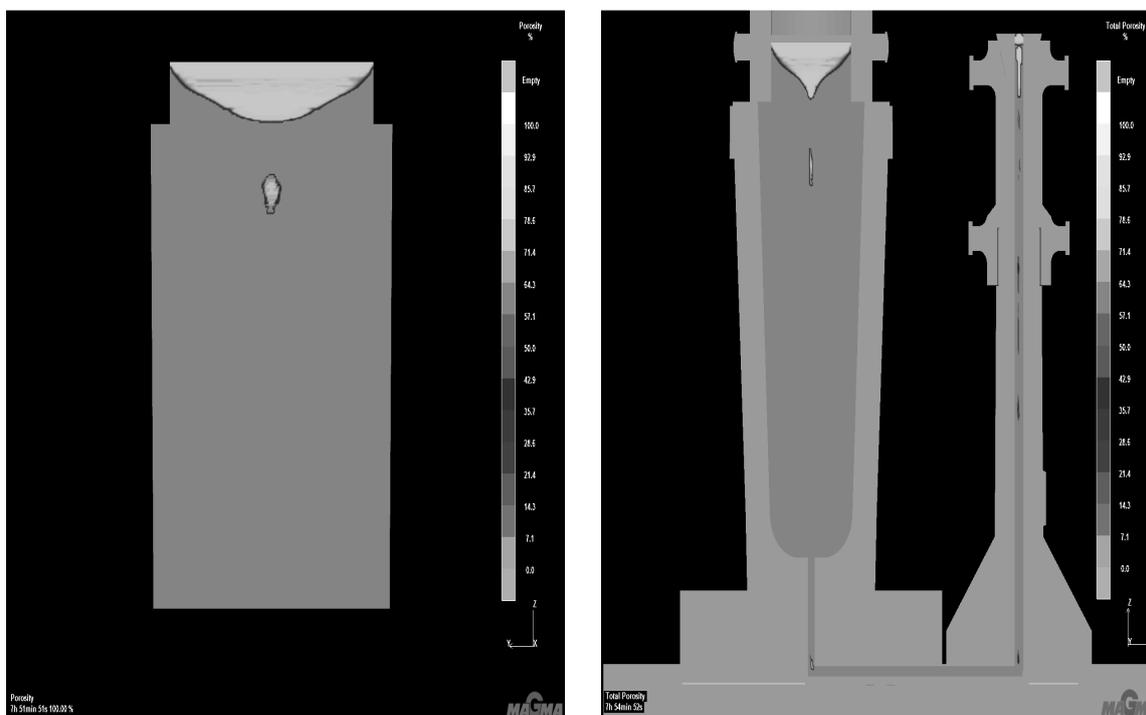


Рис. 6. Вид и расположение общей пористости в листовом слитке массой 50 т

на всю его высоту, имеет повышенную пористость.

Таким образом, результаты математического моделирования формирования 50-тонного листового слитка свидетельствуют, что при его производстве он в центральной области имеет дефекты усадочного происхождения, которые получают наибольшее развитие в подприбыльной его части на расстоянии 300–500 мм от верха тела слитка. Поэтому после прокатки таких слитков на плиты большой толщины они и выявляются при ультразвуковом контроле.

Учитывая проблемы с производством толстых плит из подобных 50-тонных слитков, ведется поиск способов повышения их качества. Одним из таких путей является использование технологии электрошлакового переплава (ЭШП) [3]. Однако себестоимость слитков ЭШП более чем в два раза выше, по сравнению с традиционным методом литья в изложницы.

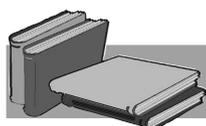
Как следует из вышеприведенных результатов моделирования, для исключения усадочных дефектов необходимо предотвратить образование «моста» из затвердевающего металла на уровне верхнего среза изложницы на ранних стадиях формирования рассматриваемого слитка. Для этого требуется достаточно длительное время обеспечивать температуру металла в проблемной зоне выше температуры нижележащих слоев. Традиционными методами – увеличением степени теплоизоляции прибыли и ее объема достичь таких условий, скорее всего, будет сложно или даже невозможно.

В работе [4] на примере математического моделирования формирования крупного кузнечного слитка с оценкой плотности металла по критерию Ниямы было показано, что только при дополнительном подогреве металла в прибыли возможно полностью подавить развитие дефектов усадочного происхождения. Из известных методов подвода дополнительного тепла к прибыли стальных слитков в промышленности

нашли применение разработки, основанные на электрошлаковых технологиях. Это способы электрошлакового обогрева и электрошлаковой подпитки ЭШО, ЭШО(п), БЭСТ И ТРЕСТ – процессы [5–7]. В том числе применительно к производству крупных листовых слитков [8]. Необходимо отметить, что отсутствие твердой корки на зеркале металла при электрошлаковом обогреве прибыли дает возможность помимо собственно подвода тепла к слитку еще и активно вмешиваться в процессы его затвердевания используя, например, перемешивание жидкой сердцевины слитка тем или иным методом с целью не только борьбы с усадочными дефектами, но и для подавления развития ликвационных процессов.

Выводы

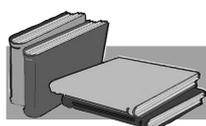
Результаты компьютерного моделирования отливки 50-тонного листового слитка с использованием программного пакета «MagmaSoft» позволяют наглядно представить процессы теплообмена, которые происходят при разливке и затвердевании металла и определяют его физическую и химическую неоднородность. Для разработки реалистичных технологий улучшения качества слитка необходимо исследовать влияние на процессы теплообмена методов дополнительного воздействия на условия формирования слитка (подвод дополнительного тепла, подпитка, внешнее воздействие и др.). Ввиду того, что возможности моделирования с использованием программного пакета «MagmaSoft» в этом плане ограничены, могут быть использованы методы физического моделирования с анализом имеющихся и вновь полученных результатов, а также данных изучения качества реальных слитков, полученных с воздействием различных факторов на процесс затвердевания.



ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Тарасевич И.Н., Дудченко А.В. Сравнительный анализ систем компьютерного моделирования металлургических и литейных процессов. *Металл и литье Украины*. 2010. № 5. С. 20–25.
2. Коротченко А.Ю. Критерии образования усадочной пористости в отливках. *Литейщик России*. 2010. № 4. С. 43–47.
3. Чжоу-хуа Цзян, Сю Чень, Синь Ген, Цян Ю. Металлургические характеристики крупных слябов, полученных электрошлаковым переплавом. *Современная электрометаллургия*. 2018. № 2. С. 19–27.
4. Ефимов М.В., Биктагиров Ф.К., Тарасевич Н.И. и др. Влияние технологических параметров на плотность металла при получении крупных слитков. *Металл и литье Украины*. 2017. № 8–10. С. 25–30.
5. Биктагиров Ф.К., Шаповалов В.А., Ефимов М.В. и др. Повышение качества крупных слитков. *Современная электрометаллургия*. 2011. № 1. С. 7–11.
6. Махнер П. Опыт производства крупных кузнечных слитков с помощью БЭСТ-процесса и состояние технологии электрошлаковой подпитки. *Электрошлаковый переплав*, вып. 6. Киев: Наукова думка, 1983. С. 306–316.
7. Базеви С., Скели М., Репетто Е. Способ ТРЭСТ для производства валов роторов высокого давления из хромомолибденованадиевой стали. *Электрошлаковый переплав*, вып. 6. Киев: Наукова думка, 1983. С. 317–321.
8. Плекингер Е., Штраубе, Махнер П., Вайс Ф. Использование БЭСТ-процесса для производства листовых слитков. *Электрошлаковый переплав*, вып. 5. Киев: Наукова думка, 1979. С. 267–269.

Поступила 03.07.2019



REFERENCES

1. Tarasevich, N.I., Korniets, I.V., Tarasevich, I.N., Dudchenko, A.V. (2010). Comparative analysis of computer modeling systems for metallurgical and foundry processes. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 5, pp. 20–25 [in Russian].
2. Korotchenko, A. Yu. (2010). Criteria for the formation of shrinkage porosity in castings. *Liteishchik Rossii*, no. 4, pp. 43–47 [in Russian].
3. Zhou-hua Jiang, Xu Chen, Xin Geng, Qiang Yu. (2018). Metallurgical characteristics of large slabs, produced by electroslag remelting. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, no. 2, pp. 19–27 [in Russian].
4. Efimov, M.V., Biktagirov, F.K., Tarasevich, N.I. et al. (2017). Influence of technological parameters on metal density at large ingots manufacturing. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 8–10, pp. 25–30 [in Russian].
5. Biktagirov, F.K., Shapovalov, V.A., Efimov, M.V. et al. (2011). Improving the quality of large ingots. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, no. 1, pp. 7–11 [in Russian].
6. Mahner, P. (1983). Experience in the production of large forging ingots using the BEST process and the state of the technology of electroslag feed. *Electroslag remelting*, Iss. 6. Kyiv: Naukova dumka, pp. 306–316 [in Russian].
7. Bazevi, S., Skeli, M., Repetto, E. (1983). Method TREST for the production of high-pressure rotor shafts from chrome-molybdenum-vanadium steel. *Electroslag remelting*, Iss. 6. Kyiv: Naukova dumka, pp. 317–321 [in Russian].
8. Plekinger, E., Shtraube, Mahner, P., Wais, F. (1979). Using the BEST process for the production of sheet ingots. *Electroslag remelting*, Iss. 5. Kyiv: Naukova dumka, pp. 267–269 [in Russian].

Received 03.07.2019

Анотація

Ф.К. Біктагіров, д-р техн. наук, ст. наук. співр., пров. наук. співр., e-mail: biktagirov@paton.kiev.ua; **В.О. Шаповалов**, чл.-кор. НАН України, проф., зав. відділу, e-mail: shapovalov@paton.kiev.ua; **О.В. Гнатушенко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр., e-mail: sasha-1978@ukr.net; **Р.Ю. Качан**, пров. інженер, e-mail: kachan808@gmail.com

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна

Комп'ютерне моделювання формування 50-тонного листового злитка

Статтю присвячено дослідженню особливостей формування 50-тонного листового злитка зі сталі типу 15Г2СФ, що йде на виготовлення товстолистового прокату. З використанням програмного пакету «МагмаSoft» виконано комп'ютерне моделювання розливки і затвердіння металу. Показано, що після закінчення розливки сифонним способом метал у центральній осевій зоні злитка має більш високу температуру у порівнянні з розташованими вище горизонтами.

Також більш прогрітою, до температури 650–700 °С, є центральна за висотою зона виливниці.

Згідно з результатами моделювання, повний час затвердіння металу при отриманні даного злитка складає близько 8 годин. У міру затвердіння металу збільшується протяжність двофазної зони і, починаючи приблизно з 2 годин після закінчення розливки, темп нарощування об'єму рідко-твердої області різко зростає. Так, через 3 години з початку періоду затвердіння протяжність двофазної зони за всією злитка складає близько 35 % від висоти тіла злитка, а через 4,5–5 годин – вже майже 80 %. Моделювання показує, що поступово відбувається звуження металеві ванни на верхньому рівні виливниці, та через 3,5 години після закінчення розливки двофазна зона у верхній частині злитка повністю перекриває розташовані нижче області рідкого стану. Тому з цього часу ускладнюється надходження рідкого металу із надливу вглиб злитка, що призводить до утворення на відстані 300–500 мм від його верху усадкових порожнин і підвищеної пористості металу.

Виявлені особливості формування 50-тонного листового злитка свідчать про наявність у ньому дефектів усадкового походження, які можуть бути виявлені при ультразвуковому контролі товстолитового прокату. Тому необхідно підвищувати якість вихідної литої заготовки, наприклад, використовуючи технологію електрошлакового обігріву та підживлення, яка дозволяє підвищити не тільки фізичну, а й хімічну однорідність подібних злитків.

Ключові слова

Плоский злиток, моделювання, «MagmaSoft», розливка, температура металу, затвердіння, двофазна зона, усадкові дефекти.

Summary

F.K. Biktagirov, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Leading Researcher, e-mail: biktagirov@paton.kiev.ua; **V.A. Shapovalov**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Department Head, e-mail: shapovalov@paton.kiev.ua; **A.V. Gnatushenko**, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, e-mail: sasha-1978@ukr.net; **R.Yu. Kachan**, Leading engineer, e-mail: kachan808@gmail.com

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Computer modelling of 50-ton sheet ingot forming process

This article is devoted to investigation of peculiarities of 50-ton sheet ingot formation from steel of the type 15Г2СФ, which is used to manufacture steel plates. With the use of the software package “MagmaSoft” computer simulation of casting and solidification of metal was performed. It is shown, that after completion of siphon casting, the metal in central axial zone of the ingot has a higher temperature than the overlying horizons. Central zone by height of the mold is also more heated to a temperature of 650–700 °C.

According to the simulation results, the total solidification time of the metal upon making this ingot is about 8 hours. As the metal solidifies, the length of the two-phase zone increases and, starting from about 2 hours after the end of casting, the rate of the liquid-solid state volume growth increases sharply. By 3 o'clock from the beginning of the solidification period, the length of the two-phase zone along the ingot axis is about 35 % of the ingot body height, and by 4.5–5 hours it is already almost 80 %. Modeling shows that a narrowing of the metal bath at the top of the mold gradually occurs and by 3.5 hours after the end of the casting, the two-phase zone in the upper part of the ingot completely covers the underlying areas of the liquid state. Therefore, from this time on, it is difficult for liquid metal to flow deep down in the ingot, which leads to the formation of shrinkage voids and increased metal porosity at the distance of 300–500 mm from the ingot top.

The revealed features of 50-ton sheet ingot formation indicate the presence of shrinkage origin defects in it, which can be detected with ultrasonic thick plates testing. Therefore, it is necessary to improve the initial cast billet quality, for example, using the electroslag heating and feed technology, that allows you to improve both physical and chemical homogeneity of such ingots.

Keywords

Flat ingot, modelling, «MagmaSoft», casting, metal temperature, solidification, two-phase zone, shrinkage defects.