

М. В. Ефимов, президент ПАО «Энергомашспецсталь»

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

Н. И. Тарасевич**, д-р техн. наук, зам. директора

В. Г. Падалка, канд. техн. наук, инженер-исследователь

А. А. Селютин, техн. дир.

ПАТ «Энергомашспецсталь», Краматорск

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

**Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Влияние технологических параметров на плотность металла при получении крупных слитков

По результатам математического моделирования, с использованием критерия Ниямы, была выполнена оценка степени развития пористости в кузнечных слитках массой 355 т. Показано решающее влияние конусности слитка и отношения высоты к среднему диаметру на его физическую однородность. Утепление прибыли крупных слитков оказывает незначительное влияние на развитие в них усадочных дефектов. Существенное улучшение плотности осевой зоны таких слитков достигается при дополнительном подогреве металла в прибыли.

Ключевые слова: математическое моделирование, плотность металла, критерий Ниямы, конусность, высота и диаметр слитка, температура оснастки.

Одним из основных показателей качества стальных слитков является плотность литого металла. Особое внимание при этом уделяется осевой зоне, которая кристаллизуется в условиях затрудненного питания в последнюю очередь. Оценка плотности металла реальных крупных слитков путем их порезки и отбора образцов, помимо сложности и трудоемкости проведения таких работ, предполагает исключение дальнейшего использования достаточно дорогостоящей заготовки. А учитывая большую номенклатуру производства таких слитков и разнообразие вариантов их получения, подобные исследования лишены практического смысла.

Применяемые методы изучения условий формирования слитков путем лабораторных экспериментов на физических моделях [1, 2], ввиду различия в физических характеристиках моделирующих веществ и стали определенного химического состава, могут дать лишь качественную, далекую от реальности картину изменения плотности металла в различных зонах литой заготовки. Кроме того, при физическом моделировании трудно учесть многочисленные факторы, имеющие место в реальных условиях и оказывающие существенное влияние на условия формирования кристаллической структуры. Стоит лишь упомянуть такие показатели, как скорость заливки; гидродинамика заполнения формы; изменение температуры металла в процессе заливки; количество и время подачи утепляющих смесей для защиты зеркала металла; способы утепления прибыли и изменение теплоизоляционных характеристик применяемых материалов по мере их разогрева; зависимость теплофизических свойств металла от температуры; влияние изменения химического состава металла в процессе затвердевания на интервал кристаллизации.

Поэтому широкое распространение для оценки влияния различных факторов на качество получаемых литых изделий находят методы компьютерного моделирования, в основу которых положены математические модели [3–5]. Именно математическое моделирование позволяет максимально полно учесть все особенности производства металлических заготовок. Применительно к отливке стальных слитков математическое моделирование помимо таких основных показателей, как температурное поле, перераспределение конвективных потоков, оценка времени затвердевания, позволяет оценить и изменение плотности металла в различных объемах затвердевшего слитка. При этом в качестве показателя плотности и прогнозирования пористости в отливках наиболее часто используют так называемый критерий Ниямы, характеризующий степень питания жидким расплавом затвердевающих областей двухфазной зоны с учетом физических свойств металла, градиента температур и количества жидкой и твердой фазы в локальной зоне [6]. Расчет критерия Ниямы является стандартным для многих широко применяемых программных пакетов математического моделирования, его также используют для прогнозирования пористости в отливках [7, 8].

Принимая во внимание вышесказанное, для анализа качества кузнечных слитков использовали методы математического моделирования с оценкой плотности металла по критерию Ниямы.

Исследования проводили на примере моделирования формирования слитка стали 40X2H2МА массой 355 т, отливаемого на заводе «Энергомашспецсталь», (г. Краматорск) для нужд атомного энергомашиностроения. Геометрические параметры изложницы для получения 355-тонного слитка приведены на рис. 1 и в табл. 1.

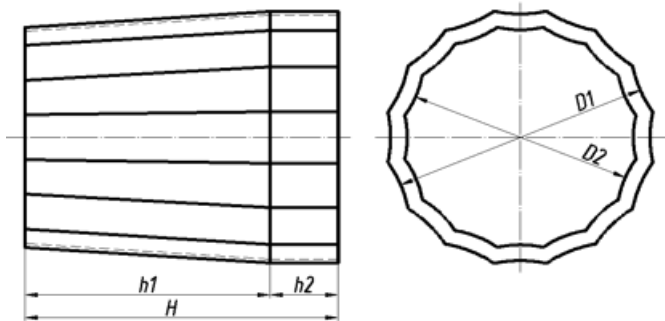


Рис. 1. Параметры изложницы для отливки 355-тонного слитка

Компьютерное моделирование проводили с использованием широко применяемого в литейном производстве программного комплекса LVMFlow, в основу которого положено моделирование литейных, тепловых и гидродинамических процессов.

Хорошо известно, что одними из основных параметров, которые влияют на условия формирования кузнечного слитка, являются его конусность и отношение высоты тела слитка к среднему диаметру H/D_{cp} [9–11]. Поэтому в настоящей работе для слитка заданной массы исследовали влияние именно этих двух факторов, а также степени утепления прибыли на пористость затвердевшего металла. При этом степень утепления прибыли моделировалась выбором температуры нагрева различных составных частей изложницы и прибыльной надставки.

При исходной конусности (К) слитка 13,5 % варьирование этим параметром осуществляли по двум вариантам (табл. 2). В первом варианте (вариант 1) изменение конусности производили за счет изменения нижнего диаметра слитка D_2 (рис. 1) и высоты его тела (H) для получения необходимой величины К. При этом слиткам различной К отвечали разные отношения высоты тела слитка к его среднему диаметру – H/D_{cp} . В этом варианте конусность менялась от 3 до 17 %. Во втором варианте (вариант 2) изменение К производилась за счет изменения верхнего диаметра тела слитка (уровень «заплечиков») и соответственно высоты H. Изменение К в этом варианте варьировалось от 5 до 20 %.

Для слитков с различной конусностью в варианте 1 на первом этапе (этап 1) моделировалась кристаллизация с температурой прибыли (чугунная надставка и ее футеровка) равной 800 °С при постоянных других начальных условиях. На втором этапе (этап 2) моделировалось формирование слитков при температуре прибыльной надставки 1200 °С, а температура ее футеровки – 1600 °С. На третьем этапе (этап 3)

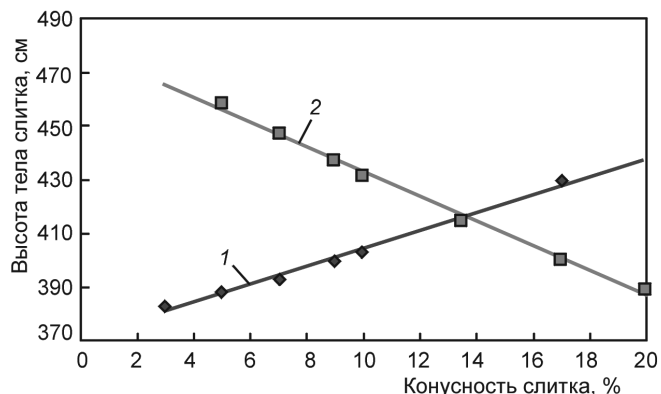


Рис. 2. Зависимость высоты слитка от его конусности: 1 – вариант (1); 2 – вариант (2)

температура прибыльной надставки составляла 1200 °С, температура ее футеровки – 1600 °С, а температура верхней части изложницы на расстоянии от верхнего среза равном h_2 (рис. 1) составляла 800 °С. Указанные выше температуры различных частей оснастки были выбраны для моделирования условий близких к тем, которые могут создаваться при усиленной теплоизоляции прибыли (этап 1), внешнем подогреве зеркала металла в прибыли при высоте ее около 1,5 м (этап 2) и внешнем подогреве зеркала металла в прибыли при укороченной надставке высотой 300–500 мм (этап 3).

Для варианта 2 изменение температурных условий моделирования было выполнено в соответствии с условиями только этапа 3 и только для слитков конусностью 13,5, 17 и 20 %.

На рис. 2 приведены зависимости высоты слитка от его конусности при изменении нижнего диаметра (вариант 1) и при изменении верхнего диаметра (вариант 2). Эти функциональные зависимости необходимо учитывать при рассмотрении результатов моделирования.

Программа LVMFlow обеспечивает оценку критерия Нияма (КН) с помощью цветовой шкалы, в которой каждому оттенку цвета соответствует определенный интервал значения КН. При этом для металла с максимальной плотностью величина КН соответствует числу 3,00. Однако, как показал анализ полученных результатов, оценка пористости металла только с помощью цветовой шкалы критерия Нияма (КН ЦШ) не является достаточно полной, поскольку такой оценкой можно определить только степень пористости металла в области слитка, в которой, согласно моделированию, ожидается пористость. Поэтому для сравнительной оценки в целом качества слитков на основе КН авторами была предложена следующая методика. В каждом варианте моделирования опре-

Таблица 1

Геометрические параметры слитка массой 355 т (без прибыли)

Конусность, %	H/D_{cp}	H, мм	$D_{ср} = (D1 + D2)/2$, мм	D1, мм	D2, мм	h1, мм	h2, мм	Масса тела слитка, кг (по жидкому металлу)
13,5	1,29	4150	3200	3420	2980	3260	890	252938

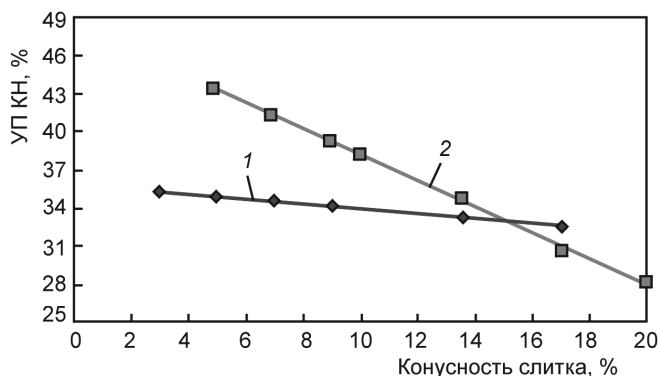


Рис. 3. Влияние конусности слитка на плотность по УП: 1 – вариант (1) начальные условия; 2 – вариант (2) начальные условия

делялось численное значение отношения протяженности зоны осевой пониженной плотности (ОПП), выделенной в теле слитке (без прибыли) на основе КН, к общей протяженности тела слитка. Полученную в результате таких измерений величину, выраженную в процентах, назвали комплексным условным показателем КН (УП КН). Он и был принят в качестве критерия оценки степени пористости слитков в приведенных ниже исследованиях. В то же время для оценки отдельных результатов использовалось и численное значение КН, определяемое по цветовой шкале в пределах от 0 до 3,00.

На рис. 3 и 4 приведены полученные данные влияния геометрических параметров моделируемого слитка на показатели их пористости. Как и следовало

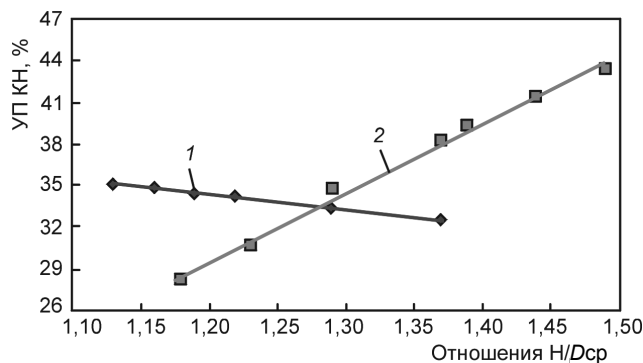


Рис. 4. Влияние отношения H/D_{cp} на плотность по УП КН. Обозначения те же, что и на рис. 3.

ожидать, с увеличением конусности слитка степень его пористости снижается (рис. 3). Причем до значений конусности около 14 % меньшая пористость присуща слиткам, чья конусность изменялась за счет уменьшения диаметра нижней части слитка. При большей конусности предпочтение имеют слитки, изменение конусности которых осуществлялось за счет увеличения размеров верхней части изложницы. Такую особенность необходимо иметь ввиду при проектировании формы для отливки крупных слитков.

Обращает на себя внимание то, что при первом варианте моделирования сравнительно небольшое различие в пористости при малой (3–5 %) и большой (13–17 %) конусности слитка. Связано это с тем, что слитки с конусностью 3–5 % имеют отношение их высоты к среднему диаметру (H/D_{cp}) около 1,1 (рис. 4,

Таблица 2

Результаты моделирования слитка массой 355 т

Конусность слитка, %	Высота тела слитка, см	Отношение высоты тела слитка к среднему диаметру, H/D_{cp}	Вариант моделирования	ОПП в теле слитка, % (УП КН)
3	382,5	1,13	Вариант 1, начальные условия	35,27
5	388,0	1,16		34,89
7	393,5	1,19		34,50
9	399,5	1,22		34,12
10	402,5	1,23		33,93
13,5	415,0	1,29		33,40
17	429,0	1,37		32,59
5	458,4	1,49	Вариант 2, начальные условия	43,33
7	447,0	1,44		41,30
9	436,4	1,39		39,27
10	431,5	1,37		38,25
13,5	415,0	1,29		33,40
17	400,0	1,23		30,59
20	388,5	1,18		28,11
3	382,5	1,13	Вариант 1, этап 1	31,97
5	388,0	1,16		31,36
7	393,5	1,19		30,75
10	402,5	1,22		29,84
13,5	415,0	1,23		28,77

Продолжение таблицы 2

Конусность слитка, %	Высота тела слитка, см	Отношение высоты тела слитка к среднему диаметру, H/D_{cp}	Вариант моделирования	ОПП в теле слитка, % (УП КН)
3	382,5	1,13	Вариант 1, этап 2	21,97
5	388,0	1,16		21,71
7	393,5	1,19		21,45
10	402,5	1,23		21,06
13,5	415,0	1,29		20,60
3	382,5	1,13	Вариант 1, этап 3	0
5	388,0	1,16		0
7	393,5	1,19		0
10	402,5	1,23		0
13,5	415,0	1,29		0
13,5	415,0	1,29	Вариант 2, этап 3	0
17	400,0	1,23		0
20	388,5	1,18		0

табл. 2). А как показано в работе [11] при таком H/D_{cp} даже в слитках с нулевой конусностью создаются условия направленного затвердевания без образования грубых дефектов усадочного происхождения. При моделировании по второму варианту при малой конусности слитка отношение H/D_{cp} уже не соответствует требованию направленного затвердевания, и в таких слитках образуются усадочные дефекты [11].

Из результатов моделирования также следует, что, несмотря на значительную по объему прибыль (около 28 % от массы слитка), даже при конусности 20 % слитки имеют достаточно протяженную область пониженной плотности. Незначительное влияние на пористость слитков такой массы, как показали результаты моделирования (этап 1), оказывает и повышенное утепление прибыли слитков.

Существенно улучшить плотность металла удастся только при повышении температуры оснастки (этапы 2 и 3). Причем уже при моделировании по этапу 2, несмотря на наличие достаточно протяженной области пониженной плотности (около 20 % от длины слитка), плотность металла в ней довольно высокая (табл. 2, рис. 5). Так при моделировании с начальными условиями по вариантам 1 и 2, минимальные значения показателя КН ЦШ находятся преимущественно в пределах 1,3–1,6 или на уровне 50 % КН ЦШ. Примерно на таком же уровне этот показатель находится при изменении температурных условий для варианта 1 по этапу 1 (температура прибыли – 800 °С). Однако при изменении температурных условий для варианта 1 по этапу 2 (температура прибыли – 1200 °С, температура футеровки прибыли – 1600 °С), показатель КН ЦШ значительно выше и при принятой на заводе конусности 13,5 % не опускается ниже величины 2,6 или 87 % максимального значения КН ЦШ. Полное отсутствие пористости с показателем 3,0 для КН ЦШ наблюдается при моделировании по этапу 3 (температура прибыли – 1200 °С, температура футеровки прибыли – 1600 °С и температурой верхней части изложницы – 800 °С).

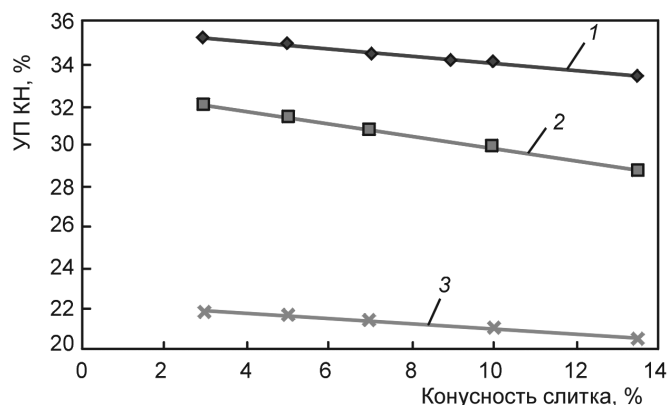
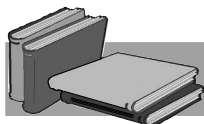


Рис. 5. Влияние конусности и температуры оснастки на плотность металла: 1 – вариант 1, начальные условия; 2 – вариант 1, этап 1; 3 – вариант 1, этап 2

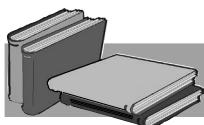
Выводы

Результаты моделирования формирования кузнечного слитка, с использованием в качестве оценки плотности металла условного показателя критерия Ниямы, подтверждают решающее влияние конусности и отношения высоты к среднему диаметру на его физическую однородность. Также, согласно результатам математического моделирования, при производстве крупных слитков только при дополнительном подогреве металла в прибыли возможно полностью подавить развитие в них дефектов усадочного происхождения.



ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашкин А. Н., Толстых Д. С., Мальгинов А. Н., Дуб В. С. Изучение влияния геометрии слитка на особенности его затвердевания на основе холодного моделирования. Часть I // *Металлург.* – 2014. – № 2. – С. 68–71.
2. Влияние геометрии и условий затвердевания слитков спокойной стали на качество поковок роторов турбогенераторов / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк и др. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2011. – т. 13, № 1(2). – С. 452–455.
3. Компьютерное моделирование процессов формирования крупных стальных кузнечных слитков / О. А. Бройтман, А. В. Монастырский, И. А. Иванов и др. // *Литейщик России.* – 2011. – № 10. – С. 7–15.
4. Trovant M., Argypoulos S. A. Mathematical Modeling and Experimental Measurements of Shrinkage in the Casting of Metals // *Canadian Metallurgical Quarterly.* – 1996. – Vol. 35, no.1. – P. 75–84.
5. Gu J. P., Beckermann C. Simulation of Convection and Macrosegation in Large Steel Ingot // *Metallurgical and Materials Transactions.* – 1999. – Vol. 30A, May. 1. – P. 1357–1368.
6. Коротченко А. Ю. Критерии образования усадочной пористости в отливках. // *Литейщик России.* – 2010. – № 4. – С. 43–47.
7. Палаткин С. В., Зюбан Н. А., Руцкий Д. В. Исследование влияния скорости разливки на структуру и дефекты стального слитка. // *Металлургические процессы и оборудование.* – 2013. – № 1. – С. 12–18.
8. Сусло Н. В., Калинин В. Т. Моделирование процессов кристаллизации чугуновых мелющих шаров в кокиле усовершенствованной конструкции // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. – № 5. – С. 30–32.
9. Смирнов А. Н., Макуров С. Л., Сафонов В. М., Цупрун А. Ю. Крупный слиток. – Донецк: Вебер, 2009. – 279 с.
10. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: *Металлургия*, 1976. – 552 с.
11. Назаратин В. В., Берман Л. И., Ефимов М. В., Селютин А. А., Явтушенко П. М., Зинченко В. Г. Изготовление кузнечных слитков без осевых усадочных дефектов. Ч. 1 // *Металлург.* – 2012. – № 1. – С. 39–44.



REFERENCES

1. Romashkin A. N., Tolstykh D. S., Mal'ginov A. N., Dub V. S. (2014). Izuchenie vliianiia geometrii slitka na osobennosti ego zatverdevaniia na osnove kholodnogo modelirovaniia. Chast' I [*Study of influence of ingot geometry on its solidification peculiarities on base of cold modeling. Part I*]. *Metallurgist*, no. 2, pp. 68–71 [in Russian].
2. Ziuban N. A., Rutskii D. V., Gamaniuk S. B. et al. (2011). Vliianie geometrii i uslovii zatverdevaniia slitkov spokojnoi stali na kachestvo pokovok rotorov turbogeneratorov [*Influence of geometry and solidification conditions of calm steel ingots on turbogenerator rotor forgings quality*]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo centra Rossiiskoi akademii nauk*, vol. 13, no. 1(2), pp. 452–455 [in Russian].
3. Broitman O. A., Monastyrskii A. V., Ivanov I. A. et al. (2011). Komp'uternoe modelirovanie protsessov formirovaniia krupnykh stal'nykh kuznechnykh slitkov [*Computer simulation of forming processes for large steel forging ingots*]. *Liteishchik Rossii*, no.10, pp. 7–15 [in Russian].
4. Trovant M., Argypoulos S. A. (1996). Mathematical Modeling and Experimental Measurements of Shrinkage in the Casting of Metals. *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 35, no.1, pp. 75–84 [in English].
5. Gu J. P., Beckermann C. (1999). Simulation of Convection and Macrosegation in Large Steel Ingot. *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 30A, May, 1, pp. 1357–1368 [in English].
6. Korotchenko A. Yu. (2010). Kriterii obrazovaniia usadochnoi poristosti v otlivkakh [*Criteria of shrinkage porosity formation in castings*]. *Liteishchik Rossii*, no. 4, pp. 43–47 [in Russian].
7. Palatkin S. V., Ziuban N. A., Rutskii D. V. (2013). Issledovanie vliianiia skorosti razlivki na strukturu i defekty stal'nogo slitka [*Investigation of pouring speed influence on structure and defects of steel ingot*]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*, no. 1, pp. 12–18 [in Russian].
8. Suslo N. V., Kalinin V. T. (2011). Modelirovanie protsessov kristallizatsii chugunnykh meliushchikh sharov v kokile usovershenstvovannoi konstruksii [*Modelling of cast iron grinding balls crystallization in advanced chill mold*]. *Metallurgicheskaia i gornorudnaia promyshlennost'*, no. 5, pp. 30–32 [in Russian].
9. Smirnov A. N., Makurov S. L., Safonov V. M., Tsuprun A. Yu. (2009). Krupnyi slitok [*Large ingot*]. Donetsk: Veber, 279 p. [in Russian].
10. Efimov V. A. (1976). Razlivka i kristallizatsiia stali [*Pouring and crystallization of steel*]. Moscow.: *Metallurgii*, 552 p. [in Russian].
11. Nazaratin V. V., Berman L. I., Efimov M. V., Seliutin A. A., Yavtushenko P. M., Zinchenko V. G. (2012). Izgotovlenie kuznechnykh slitkov bez osevykh usadochnykh defektov. Chast' 1 [*Manufacture of forging ingots without shrinkage defects. Part I*]. *Metallurg.*, no. 1, pp. 39–44 [in Russian].

Анотація

Єфімов М. В., Біктагіров Ф. К., Тарасевич М. І., Падалка В. Г., Селютін О. А.
Вплив технологічних параметрів на густину металу при одержанні великих зливків

За результатами математичного моделювання, з використанням критерію Ніями, було зроблено оцінку ступеню розвитку пористості в ковальських зливках масою 355 т. Показано вирішальний вплив конусності зливка і відношення висоти до середнього діаметру на його фізичну однорідність. Утеплення надливу великих зливків незначно впливає на розвиток в них усадкових дефектів. Істотне покращення густини осьової зони таких зливків може бути досягнуто при додатковому підігріві металу в надливі.

Ключові слова

Математичне моделювання, густина металу, критерій Ніями, конусність, висота і діаметр зливка, температура оснащення.

Summary

Efimov M., Biktagirov F., Tarasevich N., Padalka V., Seliutin A.
Influence of technological parameters on metal density at large ingots manufacturing

The estimation of porosity degree in forging ingots with a mass of 355 tons was made according to results of mathematical modeling using Niyama criterion. The decisive influence of ingot taper and height-average diameter ratio on its homogeneity was shown. The heating-up of large ingots heads has low effect on their shrinkage defects development. A significant improvement of such ingots centre density is reached by additional metal heating in head.

Keywords

Mathematical modeling, metal density, Niyama criterion, taper, ingot height and diameter, tools temperature.

Поступила 28.08.17