

УДК 669.184-412:539.4.011

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В КОНЦЕВЫХ СЛЯБАХ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ

Лоза А.В., ассистент, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и прикладная механика»

*Чигарев В.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Металлургия и технология
сварочного производства» (chigarew07@rambler.ru)*

Рассохин Д.А., аспирант кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»

Шишкин В.В., к.т.н., доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»

Приазовский государственный технический университет
(87500, Украина, Мариуполь, ул. Университетская, д. 7)

Аннотация. При разливке стали на МНЛЗ качество всех заготовок является практически одинаковым за счет создания стабильных условий непрерывного литья. Последние (концевые) слябы имеют дефект в виде отклонения размеров поперечного сечения от заданных значений. Это приводит к дополнительным потерям металла на последующих металлургических переделах и уменьшает стоимость товарной продукции. В известных исследованиях и публикациях рассматривается технология непрерывного литья в установившиеся периоды. Переходные периоды изучены мало, так как в данном случае отсутствуют простые и надежные методы исследования теплообмена слитка с окружающей средой. В работе рассматриваются причины возникновения разноширинности в концевых непрерывнолитых стальных слябах. Выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния слитка после порезки его на мерные длины. Расчеты проводились для заготовок из углеродистых марок стали. Установлено, что несимметричное по длине заготовки тепловое поле может вызывать в ней напряжения, превышающие напряжения текучести в диапазоне температур 800 – 900 °С. Это обуславливает возможность появления остаточных деформаций и отклонения ширины заготовки от номинального значения. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что отклонение размеров поперечного сечения слябов происходит по следующим основным причинам: режим охлаждения хвостовой части слитка не является оптимальным; существует значительный перепад температур по длине концевой заготовки. Для уменьшения разноширинности непрерывнолитых стальных слябов, отлитых в период окончания разливки, необходимо усовершенствование технологии их охлаждения.

Ключевые слова: непрерывная разливка, слябы, высокие температуры, напряжения, деформации, геометрические размеры поперечного сечения, технология непрерывного литья, моделирование.

Технология получения стальных слябов при помощи МНЛЗ подразумевает стабильное и практически одинаковое качество всех слябов, полученных из одного непрерывного слитка. Это объясняется тем, что при непрерывной разливке все последовательно разливаемые порции жидкого металла проходят через одни и те же узлы оборудования при одинаковых условиях. В то же время концевые слябы (последние слябы в каждой серии плавок) могут иметь некоторые дефекты, например, отклонения от заданных размеров поперечного сечения, что ведет к образованию отсортировки во вторые сорта. Это влияет на стоимость готовой металлопродукции. Такие изменения размеров объясняются самой технологией разливки последних порций жидкого металла. Главной причиной искажения размеров поперечного сечения в общем случае считают уменьшение ферростатического давления столба жидкого металла на формирующийся слиток, который находится в двухфазном состоянии. Из-за этого уменьшается внутреннее давление от жидкой фазы слитка на затвердевшую корку и усадочные процессы протекают без торможения. В результате первоначально заданные размеры попе-

речного сечения могут уменьшаться, что приводит к определенной конусности сляба и связано с дополнительными потерями металла на последующих переделах. Поскольку изменение размеров поперечного сечения связано с напряженным состоянием непрерывного слитка, исследование напряжений является важной задачей для определения способов уменьшения указанных отклонений.

Вопросам технологии получения и качества непрерывного слитка посвящено много работ отечественных и зарубежных исследователей, однако основная их часть уделяет внимание установившимся режимам непрерывного литья, что нашло логическое воплощение в различных вариантах промышленной технологии производства. Это объясняется незначительной удельной долей слябов, отливаемых в переходные периоды разливки и недостаточной изученностью тепловых процессов, протекающих при этом. На сегодняшний день фактически отсутствуют достаточно простые и надежные методы исследования теплообмена слитка с охлаждающей средой в переходные периоды. Кроме того, дополнительные сложности на стадии моделирования динамических режимов разливки связаны с

тем, что действительные коэффициенты теплопередачи на разных участках МНЛЗ в переходные периоды постоянно изменяются.

Цель данной работы – рассмотрение причин отклонений ширины концевых непрерывнолитых стальных слябов от заданных размеров с целью определения путей уменьшения данного вида дефекта.

Качество и гарантированные показатели готовой продукции, в которых заинтересовано каждое предприятие, определяются установленной технологией производства и требованиями нормативно-технической документации. В общем случае качество конечной продукции зависит от точности соблюдения основных технологических показателей на каждом участке. К таким показателям относятся:

- соответствие каждой марки стали требуемому химическому составу;
- соблюдение температурного и скоростного режима разливки;
- длительное сохранение точности настройки поддерживающих слиток элементов первичного и вторичного охлаждения;
- соблюдение заданных режимов охлаждения и т. д.

Для основной массы разливаемых плавок в промышленных условиях [1, 2] указанные показатели строго регламентированы и, как правило, соблюдаются. Причем во многих случаях данные показатели могут иметь существенные различия для машин разной конструкции даже в пределах одного предприятия. Это связано с различиями по комплектации и времени ввода в действие разных МНЛЗ или различным объемом модернизации оборудования, которое постоянно совершенствуется. В то же время моменту переходных периодов работы МНЛЗ и, в частности, окончания разливки непрерывного слитка в технологической документации уделено достаточно мало внимания, что вынуждает обслуживающий персонал работать с использованием средневзвешенного подхода. Это может выражаться, например, в единой трактовке технологии окончания разливки для машин различной конструкции, несмотря на то, что необходимо учитывать даже небольшие изменения в условиях охлаждения слитка. Так, например, существуют разные инженерные методики расчета эффективного коэффициента теплоотдачи для кристаллизаторов с круглыми и щелевыми каналами, в которых учитываются сечение канала, расстояние между каналами, коэффициент теплопроводности материала стенок. Эти показатели для кристаллизаторов разных машин могут иметь различные значения [3]. При этом разные кристаллизаторы могут иметь различное тепловое сопротивление $R_{ст}$ от рабочей поверхности стенки до воды, которое определяется выражением

$$R_{ст} = \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{эф}},$$

где δ_c – расстояние между соседними каналами; λ_c – коэффициент теплопроводности материала стенки; $\alpha_{эф}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи, который зависит от конструктивных размеров и толщины карбонатных отложений на стенках охлаждающих каналов, влияющих на термическое сопротивление.

Кроме того, только изменение газового (воздушно-го) зазора между рабочей стенкой кристаллизатора и гарнисажем из-за изменения шероховатости поверхности гарнисажа может более чем вдвое менять общее термическое сопротивление между слитком и кристаллизатором [4]. Это является важной составной частью создания заданных условий формирования кристаллизующегося слитка, тем более, что расчет рационального профиля рабочих стенок производят для максимальной скорости разливки. При этом в динамическом режиме разливки плотность теплового потока q' от слитка к стенке в точке z (координата от уровня мениска жидкого металла) в момент времени τ является функцией z и τ , т. е. зависит от ряда параметров, что в общем случае определяется выражениями:

$$q'(z, \tau) = 0, \quad 0 < z < \Delta H(\tau);$$

$$q'(z, \tau) = q[\tau(z, \tau)], \quad \Delta H(\tau) < z < H_0,$$

где $\Delta H(\tau)$ – уровень мениска жидкого металла; H_0 – высота рабочей стенки кристаллизатора.

Поэтому усредненный подход для условий непрерывного литья на конкретной МНЛЗ может приводить к нежелательным вариантам технологии окончания разливки, что выражается в получении годной продукции (товарных слябов) с отклонениями в размерах поперечного сечения. В некотором смысле можно говорить о технологической наследственности ряда последовательных операций в сквозной металлургической технологии, которая в конечном итоге может приводить к получению готовой продукции с требуемыми показателями или с отклонениями.

Одним из основных факторов технологической наследственности, который влияет на возможность появления сразу нескольких видов дефектов, можно считать формирование напряженного состояния слитка в условиях одновременного действия нескольких процессов, основные из которых – затвердевание слитка изнутри и сложный теплоотвод от наружной поверхности. В промышленных условиях технологический процесс непрерывного литья построен таким образом, чтобы в течение всего цикла разливки оба процесса проходили в соответствии с закономерностями, заложенными в технологию. Это выражается в поддержании заданной температуры поверхности сляба и обеспечении сквозного затвердевания поперечного сечения на заданном участке металлургической длины ручья МНЛЗ. При этом расчетные закономерности нарастания толщины твердой корки слитка и поддержания требуемой тем-

пературы его поверхности должны обеспечиваться заданными коэффициентами теплоотвода от поверхности, что реализуется соблюдением требуемых расходов воды и воздуха и правильной работой охлаждающих устройств зоны вторичного охлаждения [5 – 7]. В установленном режиме работы каждое сечение непрерывного слитка формируется в одних и тех же условиях за счет последовательного прохождения охлаждающих устройств, работающих с различной интенсивностью в каждой зоне, но неизменяемой во времени. Другая картина наблюдается в переходные периоды и, в частности, при отливке концевых слябов. При окончании разливки скорость литья уменьшают для захлаживания «хвоста» слитка, причем критерием служит не расчетный заранее предусмотренный режим, а получаемое по факту надежное замораживание зеркала жидкого металла в кристаллизаторе. На практике время замораживания зеркала металла может изменяться в значительных пределах. Это зависит от конкретных технических приемов, используемых технологическим персоналом. При этом охлаждение последнего, концевого сляба практически может сильно отличаться от охлаждения предыдущих частей слитка. Фактически различные части концевого сляба могут иметь разное напряженное состояние. Поскольку деформации определяются возникающими напряжениями, несимметричное напряженное состояние в концевой части слитка при замораживании жидкой лунки может существенно влиять на отклонение размеров поперечного сечения последнего сляба. Кроме того, в силу непрерывности слитка МНЛЗ и достаточно малой скорости разливки, неодинаковые условия охлаждения торцов создаются при разрезании слитка на части машинами газовой резки. Например, при скорости разливки 0,6 м/мин, разница во времени между выполнением последующих резов одного слитка может составлять более 15 мин (для слябов длиной 10 м). При этом передний торец сляба интенсивно охлаждается, в то время как задний в момент резки, наоборот, разогревается от пламени газового резака. Эта разница в температурах противоположных торцов должна изменять напряженное состояние заготовки. При температурах слитка, соответствующих пребыванию его в зоне газовой резки, металл находится в области упругопластических деформаций. Поэтому неравномерный разогрев непрерывнолитой заготовки может вызвать большее расширение тех участков, которые соответствуют более горячему сечению слитка. Это может привести к остаточным деформациям по ширине сляба, поскольку он находится в области упругопластического состояния. Деформации сляба в поперечном сечении от несимметричного распределения температур по его длине обычно не учитываются. На сегодняшний день из нескольких факторов, влияющих на остаточную деформацию сляба по ширине, не установлены главные факторы, а также степень их влияния на искажение поперечных размеров.

В связи с этим было проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния сляба после порезки его на мерные длины. Моделирование температурных полей и напряженного состояния сляба, получаемого из непрерывно литого слитка, выполнялось в расчетной программе ABAQUS с использованием метода конечных элементов. В основе модели лежит уравнение теплопроводности с соответствующими краевыми условиями. В данной работе использована методика, реализованная с помощью трехмерной пространственной модели. Расчеты проводили для условий одного из металлургических комбинатов с криволинейной МНЛЗ, зона вторичного охлаждения которой включает роликовые секции и форсуночное водовоздушное охлаждение. Расчеты проводились для прямоугольных слитков с размерами поперечного сечения 250×1600 мм. Методика теоретического исследования заключалась в следующем:

- находится функция, описывающая температурное поле сляба;
- определяется функция, описывающая поле термических напряжений;
- вычисляется амплитуда условных термоупругих напряжений в материале сляба;
- определяются значения термоупругопластических деформаций.

При моделировании поведения слитка было принято допущение о равномерном распределении механических свойств материала по длине заготовки. На противоположных по длине заготовки торцах в качестве граничных условий задавались температуры с разницей (перепадом) значений от 50 до 300 °С. При выполнении моделирования первоначально получали поле распределения температур в поперечном сечении (рис. 1) и по поверхности непрерывнолитой заготовки (рис. 2). Полученные значения были использованы для определения напряжений и деформаций, возникающих в заготовке при задаваемых температурных перепадах (рис. 3, 4).

Анализ полученных результатов показывает, что в случае перепадов температур по длине в одной заготовке один из торцов с более высокой температурой должен иметь больший размер по ширине. Разница в ширине торцов одного сляба сечением 250×1600 мм длиной 8000 мм из углеродистых марок стали при наличии перепада температур 250 °С по длине заготовки, согласно расчетной модели, может достигать 10 мм. Уменьшение перепада температур по длине сляба приводит к снижению разницы в ширине торцов. Напряжения в металле от возникающего теплового расширения на отдельных участках могут превышать предел текучести. По результатам экспериментальных исследований [8 – 10] напряжения течения углеродистых марок стали в диапазоне температур от 800 до 900 °С изменяются ориентировочно от 55 до 30 МПа. Согласно результатам, полученным при моделировании, темпе-

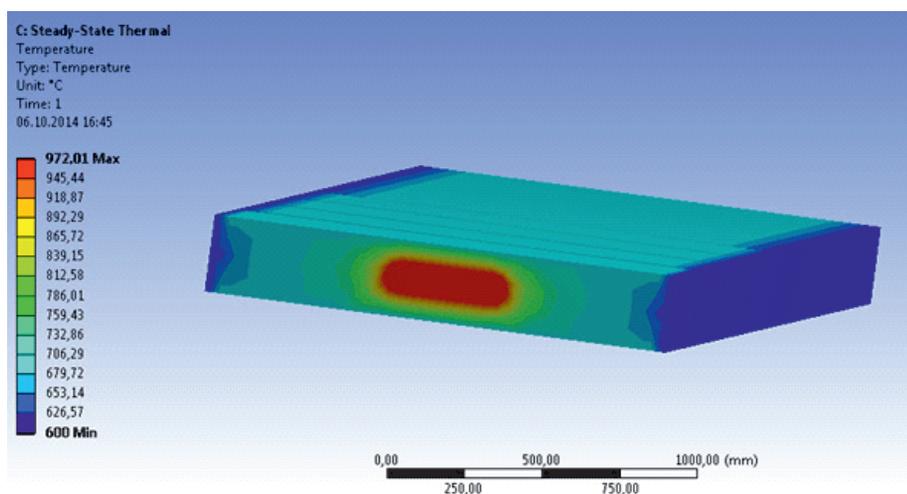


Рис. 1. Моделирование распределения температур в поперечном сечении непрерывнолитого стального слэба

Fig. 1. Modeling of the temperature distribution in the cross section of continuously casted steel slab

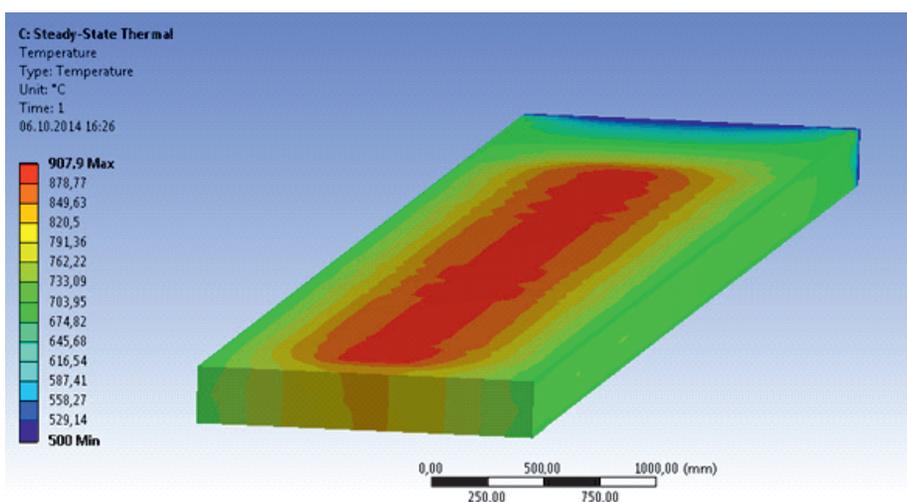


Рис. 2. Распределение температур на поверхности конечной заготовки

Fig. 2. The temperature distribution on the surface of the final ingot

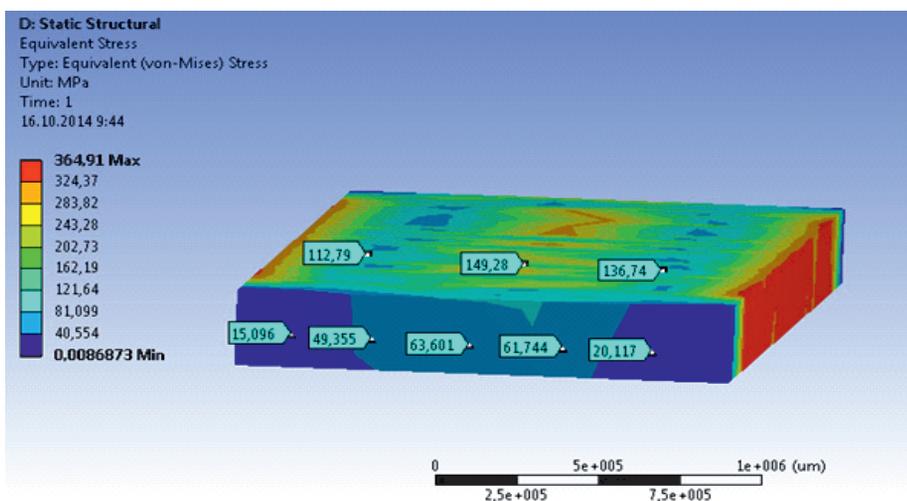


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в конечной заготовке

Fig. 3. Equivalent stresses in final ingot

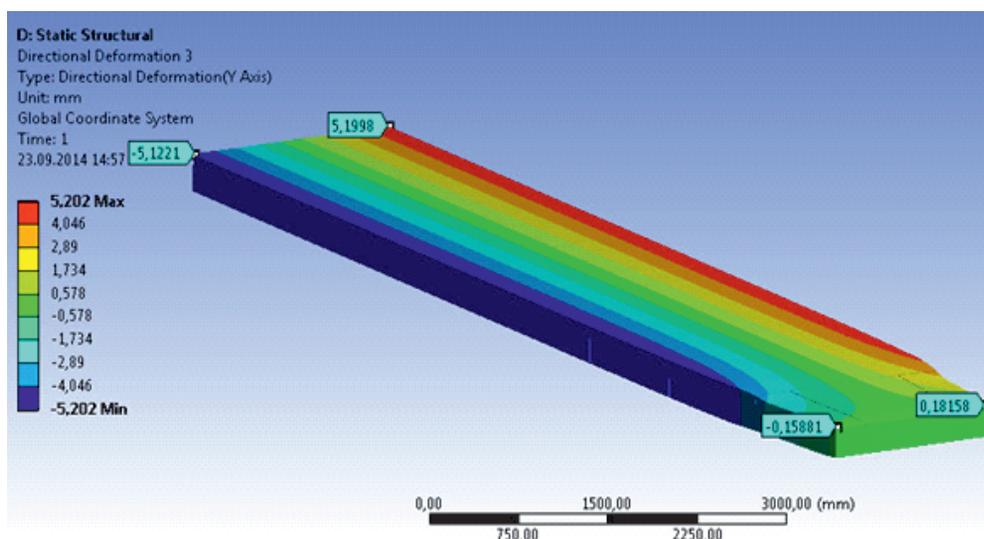


Рис. 4. Деформации в концевой заготовке при неравномерном по ее длине нагреве

Fig. 4. Deformation in final ingot at heating, uneven by its length

ратурные напряжения в слябах могут превышать указанные напряжения течения стали, что обуславливает возможность появления остаточных деформаций. Из-за этого существует потенциальная опасность возникновения разноширинности в непрерывнолитых стальных слябах. Частично данная проблема может быть решена в интервале температур пластических деформаций за счет обеспечения заданных по расчету скоростей охлаждения заготовок после их порезки на мерные длины [11].

В то же время изучение практических данных по эксплуатации слябовых МНЛЗ показывает, что для концевых слябов фактическое отклонение размеров в одной заготовке шириной 1900 – 2000 мм может достигать 40 мм (основной диапазон отклонений размеров составляет 20 – 30 мм). Слябы с номинальной шириной 1500 – 1600 мм имеют отклонения размеров по ширине не более 30 мм. При этом отклонение размеров (ширины слябов) изменяется в значительных пределах в разных сериях даже на одной машине. Это связано с различиями в режимах охлаждения последних метров непрерывнолитых заготовок, которые обусловлены человеческим фактором. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что максимальное отклонение ширины сляба шириной 1500 – 1600 мм составляет 30 мм. Лишь часть остаточных деформаций заготовки (30 – 35 %) можно объяснить неравномерным нагревом ее по длине. Очевидно, что более значимым фактором является режим охлаждения формирующегося слитка в условиях изменяющегося ферростатического давления при окончании розливки.

Таким образом, за счет совершенствования технологии непрерывной разливки (обеспечения меньших значений перепадов температур по длине сляба и оптимизации режима охлаждения концевой части непре-

рывного слитка) можно влиять на уменьшение отклонений поперечных размеров концевых слябов.

Выводы. Температурное поле слябов, отлитых в переходных режимах, может значительно отличаться от основного тела непрерывного слитка. Несимметричное распределение температур приводит к возникновению напряжений, которые могут вызывать остаточные деформации.

Концевые слябы подвержены несимметричным тепловым нагрузкам на нескольких участках по длине МНЛЗ, основные из которых – первые секции охлаждения и зона машин газовой резки.

Для уменьшения отклонений в размерах поперечного сечения концевых непрерывнолитых стальных слябов необходимо дополнительное усовершенствование технологии их охлаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сладкошteeв В.Т., Ахтырский В.И., Потанин Р.В. Качество стали при непрерывной разливке. – М.: Металлургия, 1964. – 68 с.
2. Теория непрерывной разливки / В.С. Рутес, В.И. Аскольдов, Д.П. Евтеев и др. – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.
3. Звягин В.В., Целиков А.А., Шусторович В.М. // Сб. тр. «Создание и исследование сталеплавильных агрегатов и машин непрерывного литья высокой производительности» – М.: ВНИИ-МЕТМАШ, 1982. С. 47 – 58.
4. Зайцев А.И., Лейтес А.В., Либерман А.Л. Физико-химические основы нового метода управления отводом тепла от слитка к кристаллизатору // Сталь. № 3. 2003. С. 70 – 74.
5. Белый В.А. Перспективы совершенствования формы сечения непрерывнолитой заготовки // Сталь. № 9. 2008. С. 24 – 27.
6. Смирнов А.А., Паршин В.М., Парфенов Е.П. Оптимизация режима вторичного охлаждения непрерывнолитых слябов // Сталь. № 12. 1995. С. 30 – 32.
7. Парфенов Е.П., Кобелев В.А., Гельфенбейн Е.В. Исследование теплообмена при взаимодействии водовоздушного факела форсунки с непрерывно отливаемым слитком в зоне вторичного охлаждения // Сб. тр. «Совершенствование конструкций, иссле-

- дование и расчет машин непрерывного литья заготовок». – М.: ВНИИМЕТМАШ, 1987. С. 68 – 77.
8. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слывовых заготовок – М.: Металлургия, 1991. – 271 с.
 9. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

10. Материалы в машиностроении: выбор и применение: Справочник в 5 томах. Т. 2. Конструкционная сталь / под ред. И. В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1967. – 496 с.
11. Пат. 92044 Украина. Способ корректировки ширины непрерывнолитых слывов / В.В. Шишкин, А.В. Лоза; опубл. 25.07.2014. Бюл. № 14.

Поступила 19 ноября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 3, pp. 197–202.

RESEARCH OF DEFORMATIONS IN FINAL SLABS AT CONTINUOUS CASTING OF STEEL

Loza A.V., Senior Lecturer of the Chair "Theoretical and Applied Mechanics"

Chigarev V.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Metallurgy and Welding Technology"

(chigarew07@rambler.ru)

Rassokhin D.A., Postgraduate of the Chair "Mechanical equipment of ferrous metallurgy plants"

Shishkin V.V., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Theoretical and Applied Mechanics"

Azov State Technical University (7, Universitetskaya str., Mariupol, 87500, Ukraine)

Abstract. At casting of steel on CCM quality of all ingots is almost identical by creating stable conditions of continuous casting. The final slabs have a defect in the form of the cross-sectional dimensions - the deviation from the desired values. This leads to additional losses of metal in subsequent metallurgical redistribution and reduces the cost of commodity products. The prior studies and publications consider continuous casting technology in the established periods. Transition periods have been poorly studied because there are no simple and reliable methods of investigation of heat exchange of the ingot with the environment during these periods. This article discusses the causes of different widths of the final continuously casted steel slabs. The numerical modeling of the stress-strain state of the ingot after cutting to length it was made. Calculations were performed for ingots made of carbon steel grades. It was established that the asymmetric in length billet thermal field may cause it stress exceeding the yield stress in the temperature range 800 – 900 °C. This leads to the possibility of residual strain and deflection width of the ingot from the nominal value. Comparison of calculated and experimental data showed that the deviation of the cross-sectional dimensions of slabs occurs for the following reasons:

1. Cooling mode of the tail section of the ingot was not optimal.
2. There was a significant temperature gradient along the length of the end of the ingot.

To reduce the different widths of continuously casted steel slabs during the end of the casting it is necessary to improve their cooling technology.

Keywords: continuous casting, slabs, high temperatures, stresses, deformations, geometrical dimensions of the cross section, process of continuous casting, computer simulation.

REFERENCES

1. Sladkoshteev V.T., Akhtyrskii V.I., Potanin R.V. *Kachestvo stali pri nepreryvnoi razlivke* [The quality of steel at continuous casting]. Moscow: Metallurgiya, 1964, p. 68. (In Russ.).
2. Rutes V.S., Askol'dov V.I., Evteev D.P. Genkin V.Ya., Chigrinov M.G., Manokhin A.I. *Teoriya nepreryvnoi razlivki* [Theory of continuous casting]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 296 p. (In Russ.).
3. Zvyagin V.V., Tselikov A.A., Shustorovich V.M. *Sozdanie i issledovanie staleplavil'nykh agregatov i mashin nepreryvnogo lit'ya vysokoi proizvoditel'nosti* [Creation and research of units and continuous casting machines of high performance]. Moscow: VNIIMetmash, 1982, pp. 47–58. (In Russ.).
4. Zaitsev A.I., Leites A.V., Liberman A.L. Physico-chemical basis of the new control method of heat transfer between ingot and mold. *Stal'*. 2003, no. 3, pp. 70–74. (In Russ.).
5. Belyi V.A. Improving the cross section of continuous-cast billet. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 9, pp. 752–755.
6. Smirnov A.A., Parshin V.M., Parfenov E.P. Optimization of secondary cooling of continuously cast slabs. *Stal'*. 1995, no. 12, pp. 30–32. (In Russ.).
7. Parfenov E.P., Kobelev V.A., Gel'fenbein E.V. *Issledovanie teploobmena pri vzaimodeistvii vodovozdushnogo fakela forsunki s nepreryvno otliyaemym slitkom v zone vtorichnogo okhlazhdeniya* [Investigation of heat transfer in the interaction of the water-air torch nozzle with continuously casted ingot in the secondary cooling zone]. In: *Sovershenstvovanie konstruksii, issledovanie i raschet mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok* [Improving the design, research and calculation of CCM]. Moscow: VNIIMetmash, 1987, pp. 68–77. (In Russ.).
8. Niskovskikh V.M., Karlinskii S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepreryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok* [Slab continuous casting machines]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 271 p. (In Russ.).
9. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. etc. *Marochnik stalei i splavov* [Grade list of steels and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 639 p. (In Russ.).
10. *Materialy v mashinostroenii: vybor i primenenie: spravochnik v 5 t. T. 2. Konstruksionnaya stal'* [Materials in mechanical engineering, vols. 1–5. Vol. 2: Constructional steel]. Kudryavtsev I.V. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1967. 496 p. (In Russ.).
11. Shishkin V.V., Loza A.V. *Sposob korrektyrovki shiriny nepreryvnolitykh slyabov* [Method of adjusting the width of continuously casted slabs]. Patent no. 92044 Ukraine. *Byulleten' izobretenii*. 2014, no. 14. (In Russ.).

Received November 19, 2014