

ЛИВАРНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 669.184-412:539.4.011

© Лоза А.В.¹, Чигарев В.В.², Рассохин Д.А.³, Шишкин В.В.⁴

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СЛИТКА

В работе выполнено аналитическое исследование влияния скоростного режима непрерывного литья слитков прямоугольного сечения на их напряженно-деформированное состояние в период окончания разливки. Скоростной режим оказывает существенное влияние на образование дефектов в литой заготовке. Возникающие напряжения могут вызывать появление трещин и остаточных деформаций, которые ухудшают качество товарной продукции.

Ключевые слова: непрерывная разливка, заготовки, технология непрерывного литья, скорость разливки, предел текучести, высокие температуры, напряжения, деформации, моделирование.

Лоза А.В., Чигарев В.В., Рассохин Д.А., Шишкин В.В. Вплив швидкісного режиму безперервного литва на змінення пружного стану зливка. У роботі виконано аналітичне дослідження впливу швидкісного режиму безперервного литва зливків прямокутного перетину на змінення їх пружно-деформований стан у період закінчення литва.

Ключові слова: безперервне литво, заготовки, технологія безперервного литва, швидкість литва, границя текучості, високі температури, напруги, деформації, моделювання.

A.V. Loza, V.V. Chigarev, D.A. Rassokhin, V.V. Shishkin. Influence of the velocity mode upon alternations in ingot's stressed state. The operation mode of continuous casting machines has a great influence on internal and surface defects of cast ingots. When a solidifying ingot passes along the process line of the continuous casting machine stress and deformations arise in its solidifying skin, it leading to cracks formation and determining the quality of production. The contemporary investigations are devoted mainly to the existing operation modes of continuous casting, in which the field of temperature distribution in ingot is stationary in the system of coordinates, linked with the crystallizer. Little attention has so far been paid to transition periods, due to difficulties of investigation and description of the processes happening during these periods. During the period of completion of continuous casting the rate of ingot's drawing is reduced to the minimal possible value, thus ensuring trouble-free operation of continuous casting machines, the tail part of slabs being cooled down in a greater degree than the bulk of slabs. At this temperature reduction in the tail part the metal gets into the area of resilience, it greatly increasing the likeness of surface cracks formation and other defects. Due to this reason it is very important to know the ingot's stress in its tail part. This problem can be solved by means of a mathematical model. This work presents a numerical simulation of a

¹ ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, loza_a_v@pstu.edu

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, chigarew07@rambler.ru

³ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, radullik@yandex.ru

⁴ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, shishkin_V_V@pstu.edu

stressed state of a steel slab on a horizontal section of a curved continuous caster. The data, regarding temperature and stresses distribution were obtained for the surface of the bulk of continuously cast ingot and its tail part. The value of stress in ingot's tail part can exceed its yield point, resulting in appearance of residual deformations and changes in ingot's width. Unfavourable distribution of temperature stresses can be altered by correction of cooling in the tail part of continuously cast ingot.

Keywords: *continuous casting, ingot, technology casting speed, yield point, high temperatures, stress, strain, deformation, computer simulation.*

Постановка проблеми. Режим работы машин непрерывного литья оказывает существенное влияние на внутренние дефекты и качество поверхности литой заготовки. При прохождении затвердевающего слитка по технологической линии МНЛЗ в затвердевшей корке возникают напряжения и деформации, которые обусловлены действием ряда технологических параметров, прежде всего – ферростатическим давлением жидкого металла, интенсивностью охлаждения, конструкцией и точностью настройки элементов зоны первичного и вторичного охлаждения. Возникающие напряжения влияют на образование трещин, что в конечном итоге определяет качество товарной продукции. Поэтому уточнение расчета напряженно-деформированного состояния играет важную роль для анализа технологии и её оптимизации.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы исследования напряженно-деформированного состояния непрерывного стального слитка рассматривались в работах целого ряда отечественных и зарубежных исследователей, в частности в работах А.И. Вейника, Л.С. Рудого, С.И. Марченко, В.Л. Данилова, Ю.А. Самойловича, А.В. Скворцова и др. При этом основная часть исследований посвящена установленным режимам непрерывного литья, что нашло воплощение в различных вариантах промышленной технологии производства. В то же время переходным периодам, к которым относится момент окончания разливки, уделено мало внимания, в связи со сложностями изучения и описания проходящих в эти периоды процессов. Именно в эти периоды изменяется ряд технологических параметров, что влечет за собой изменение напряженного состояния стального непрерывного слитка и может повлиять на его качество.

Цель статьи – анализ влияния снижения скорости литья в период окончания разливки на изменение напряжений в основном теле непрерывного стального слитка и его хвостовой части.

Изложение основного материала. Для каждой машины непрерывного литья скорость разливки и основные технологические параметры имеют значения, определенные конструкторскими расчетами и технологическими инструкциями. Это связано с заданной производительностью, оптимальными режимами работы оборудования и обслуживания МНЛЗ, а также качеством готовой продукции [1-3]. При этом существует определенное противоречие в технологии литья: в то время как расчет рационального профиля рабочих стенок кристаллизатора и основных конструкций в ЗВО производят для максимальных скоростей разливки, фактическую длительность переходных периодов, и в частности окончания разливки, определяют на основании разрозненных заводских данных. При работе машины на рабочих скоростях напряженное состояние слитка считается установленным и соответствующим расчетным конструкторским критериям. Согласно общепринятых положений по инженерной методике расчета температурных режимов разливки предполагается, что поле распределения температуры в слитке и системе координат, связанной с кристаллизатором, стационарно. При этом в любом поперечном сечении слитка, удаленном от мениска на заданное расстояние, распределение температуры неизменно во времени. Однако в периоды, когда скорость разливки значительно изменяется, и в частности – в период окончания разливки, с изменением скорости время нахождения слитка в ЗВО увеличивается, что предусмотреть не всегда возможно. Поэтому параметры технологии литья в этот период зачастую до настоящего времени определяют подбором. В этих случаях фактическое напряженное состояние слитка сильно зависит от решений, принимаемых обслуживающим МНЛЗ технологическим персоналом. Практика показывает, что в период окончания процесса разливки скорость вытягивания слитка уменьшают до минимально возможного значения для полного и надежного замораживания последних порций жидкого металла в кристаллизаторе. Без такой операции невозможно обеспечить безаварийную работу МНЛЗ. При этом хвостовую часть слитка заливают водой в течение нескольких минут практически без ориенти-

ровки на контрольно-измерительные приборы. Надежность замораживания хвоста слитка обеспечивается за счет визуального снижения температуры последних порций разливаемого металла ниже границы свечения (т.е. на уровне 500-600 °С, а возможно и ниже). При таких температурах металл попадает в область упругих деформаций, что значительно увеличивает вероятность возникновения трещин на поверхности и других дефектов. По этим причинам для хвостовой части слитка важно знать его напряженное состояние. Эта задача может быть решена с привлечением математической модели.

Известны работы по моделированию режимов разливки с переменной скоростью литья [4]. В расчетах получены температурные кривые охлаждения поверхности непрерывного слитка по середине широкой грани при переходных режимах МНЛЗ. Значения максимально допустимого времени при выдержке в переходном режиме получены из предположения что длительность переходного режима не должна быть больше времени, за которое температура поверхности слитка опускается ниже 700-800 °С. То есть фактически рассматриваются условия формирования основного тела непрерывного слитка при временном уменьшении подачи металла на МНЛЗ. Напряженное состояние хвостовой части слитка в этих расчетах не рассматривалось.

В современных машинах непрерывного литья рациональные значения основных параметров технологии (прежде всего – интенсивность вторичного охлаждения) напрямую связаны со скоростью разливки. Это позволяет автоматически управлять технологическим процессом, устранять возможные прорывы жидкого металла и снижать дефекты различного происхождения. Можно сказать, что скорость разливки напрямую определяет условия формирования слитка в линии МНЛЗ. Поэтому при исследовании технологии непрерывного литья в первом приближении можно рассматривать зависимость напряженного состояния стального слитка от скорости разливки жидкой стали. Наиболее сильно скорость разливки и все связанные с ней параметры технологии изменяются в период окончания процесса литья.

В общем случае напряженное состояние непрерывного слитка при рабочих скоростях разливки может быть определено на любом участке его в линии МНЛЗ. При этом нужно иметь в виду, что при движении хвостовой части непрерывного слитка вдоль роликового аппарата постоянно существует перепад значений температур между затвердевшим хвостом и предыдущими участками кристаллизующегося двухфазного слитка. Этот перепад температур является максимальным в зоне под кристаллизатором и постепенно уменьшается по мере продвижения слитка к зоне газовой резки, т.е. происходит постепенное выравнивание температурного поля. При наиболее высоких температурах слитка в ЗВО под кристаллизатором твердая оболочка слитка обладает большим запасом пластичности. Это выражается в проявлении т.н. ползучести стальной оболочки, которую некоторые исследователи описывают при помощи специального математического аппарата. Теоретически наиболее неблагоприятное состояние слитка с точки зрения максимальных напряжений должно соответствовать участкам с температурой, при которой сильно проявляются упругие свойства стального слитка, а именно при температурах ниже 800°С. При таких температурах значительно возрастает модуль упругости стали и уменьшается возможность релаксации напряжений за счет пластических деформаций. Наиболее низкой температурой поверхности в линии МНЛЗ непрерывный сляб обладает на участке окончания металлургической длины машины. Здесь определенная область хвостовой части слитка может иметь температуру 800°С и ниже, в зависимости от условий процесса литья на конкретной машине.

В связи с этим было проведено численное моделирование напряженного состояния стального сляба на горизонтальном участке технологической линии криволинейной МНЛЗ. Для исследования напряженного состояния был использован метод конечных элементов. Моделирование температурных полей и напряженного состояния сляба, получаемого из непрерывно литого слитка, выполнялось в расчетной программе ABAQUS при помощи трехмерной пространственной модели. Данная методика опробована и широко применяется для определения напряжений в конструкциях при сложных видах нагружения [5].

Теоретическое исследование заключалось в следующем:

- 1) определение функции, описывающей температурное поле сляба;
- 2) определение функции, которая описывает поле термических напряжений;
- 3) вычисление амплитуды условных термоупругих напряжений в материале сляба;
- 4) определение значений термоупругопластических деформаций.

Расчеты проводили для условий одного из украинских металлургических комбинатов с

криволинейной МНЛЗ. Рассматривалось состояние слитка с прямоугольным поперечным сечением 250x1600 мм при отливке углеродистых марок стали. Коэффициенты теплообмена принимались на основании опытных данных [6, 7].

Анализ экспериментальных данных [8, 9] показывает, что с уменьшением скорости вытягивания слитка в период окончания разливки изменяется температурное поле в хвостовой части. Исследования других авторов [10] свидетельствуют о том, что на практике невозможно получить ни монотонного изменения плотности орошения охладителем поверхности непрерывнолитого слитка, ни монотонного распределения температуры поверхности заготовки по длине зоны вторичного охлаждения. Можно лишь ставить задачу получения распределения температуры поверхности сляба по длине ЗВО, которое в наибольшей степени приближено к действительному. В связи с этим в данном исследовании решали задачу нахождения распределения температуры поверхности последних метров непрерывного слитка в зависимости от задаваемой температуры торцевой части его хвоста. Распределение температуры по поверхности основного тела слитка и его хвостовой части представлены на рис. 1.

Полученные результаты показывают, что в период окончания разливки уменьшение скорости литья изменяет и температурное поле слитка, и картину распределения напряжений в нем. Расчет напряженного состояния проводился для непрерывнолитых слябов из углеродистых марок стали. Напряженное состояние непрерывного слитка представлено на рис. 2.

Исследование напряжений по широкой грани слитка позволило выявить различия в распределении напряжений. Более высокие значения напряжений получены вдоль середины широкой грани и вдоль узких граней сляба. Т. е. образование поверхностных трещин наиболее вероятно в указанных областях. Это обусловлено соответствующим распределением термических напряжений. Максимальные значения напряжений наблюдаются на боковой (узкой) грани на расстоянии 2-3 метра от торцевой части хвоста слитка. Эта область ориентировочно соответствует области образования наибольшей конусности в концевых слябах.

В случае уменьшения перепада температур по длине последнего (концевого) сляба максимальные значения напряжений в нем уменьшаются (рис. 3).

Как известно, склонность к образованию горячих трещин, при прочих равных условиях, определяется в основном величиной и темпом усадки. В двухфазном непрерывном слитке при одновременном протекании усадочных процессов и кристаллизации новых слоев формирующейся корки величина и темп усадки зависят от условий теплоотвода, особенно когда корка является недостаточно прочной и проявляет свойства податливости. Таким образом, неблагоприятное распределение температурных напряжений можно изменять режимом теплоотвода от слитка в зоне вторичного охлаждения.

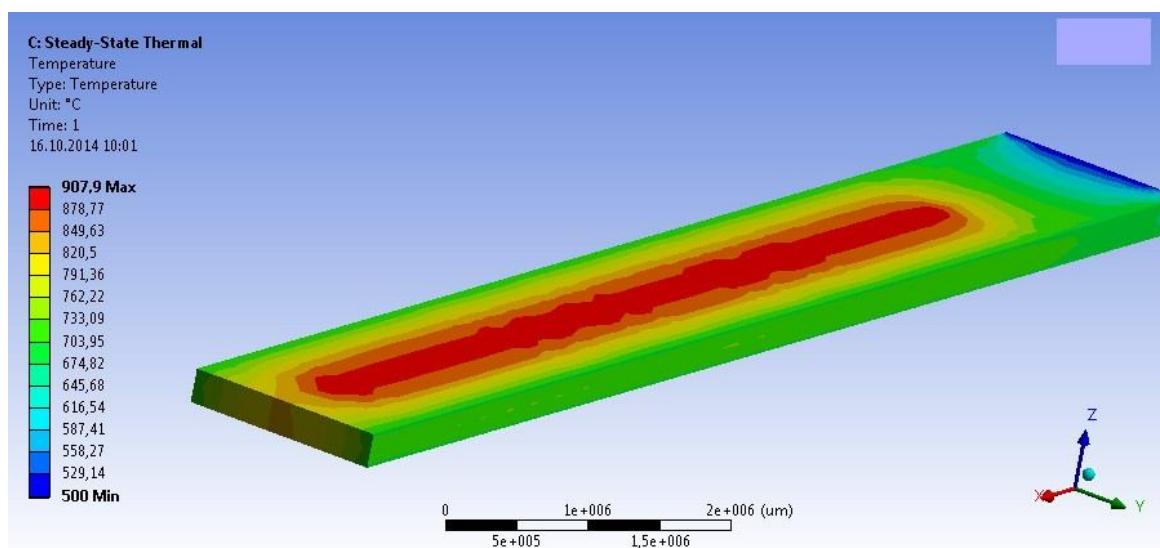


Рис. 1 – Распределение температур на поверхности основного тела непрерывного слитка и его хвостовой части

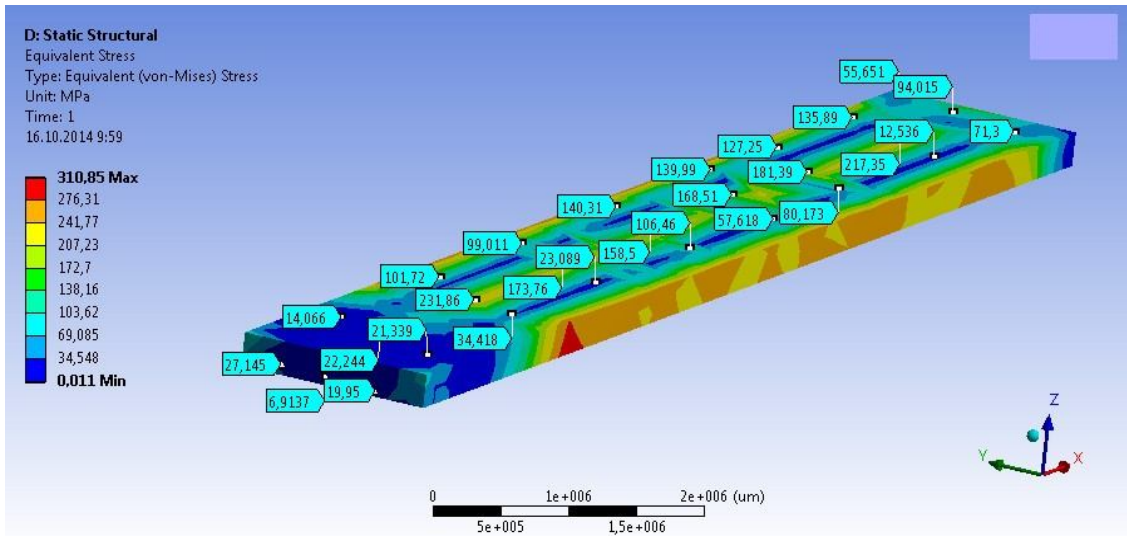


Рис. 2 – Распределение эквивалентных напряжений в хвостовой части непрерывно-го слитка при заданной температуре хвостовой части 500°C

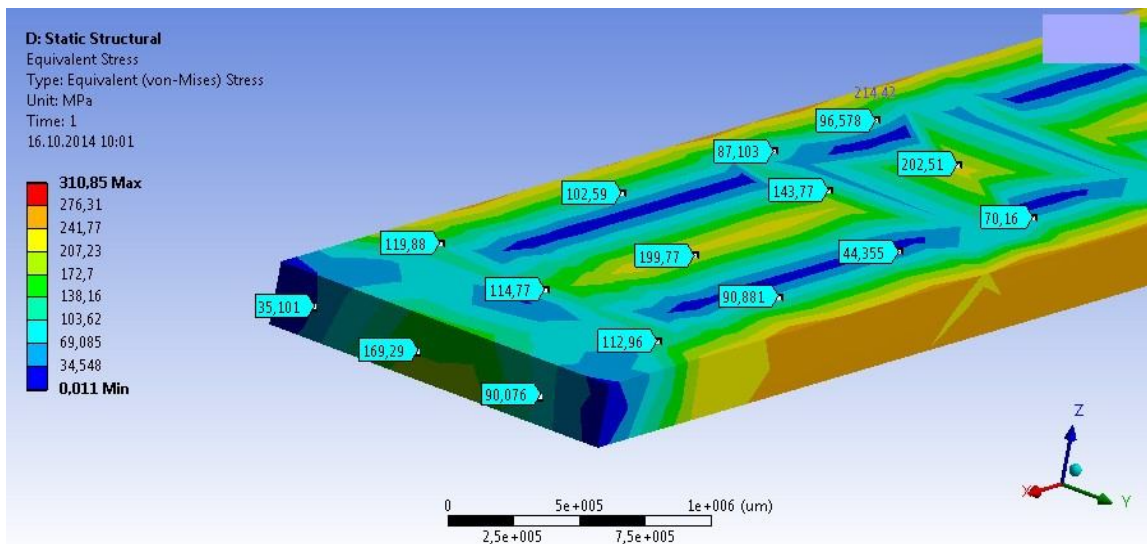


Рис. 3 – Распределение напряжений в хвостовой части непрерывного слитка при температуре его хвостовой части 700°C

Выводы

1. Скорость разливки определяет температурное поле непрерывного стального литка и его напряженное состояние. В период окончания литья скорость разливки резко снижается, что изменяет напряженное состояние в хвостовой части слитка.
2. Величина напряжений в хвостовой части слитка может превышать предел текучести, что обуславливает значительную вероятность появления остаточных деформаций и изменения ширины заготовки на её последних метрах. Наиболее вероятно образование трещин по широкой грани – вдоль ребер и по середине широкой грани.
3. Неблагоприятное распределение температурных напряжений может быть изменено корректировкой охлаждения хвостовой части непрерывного слитка.

Список использованных источников:

1. Контроль процесса затвердевания слитка, отливаемого на МНЛЗ / О.В. Носоченко [и др.] // Непрерывное литье стали. – М. : Metallurgia, 1981. – №7. – С. 44-49.
2. Влияние некоторых технологических параметров на качество макроструктуры непрерывно-

- литых слябов / А.М. Поживанов [и др.] // Непрерывное литье стали. – М. : Metallurgy, 1981. – №7. – С. 52-56.
3. Сладкоштеев В.Т. Качество стали при непрерывной разливке / В.Т. Сладкоштеев, В.И. Ахтырский, Р.В. Потанин. – М. : Metallurgy, 1964. – 68 с.
 4. Математическое моделирование затвердевания непрерывного слитка при переходных режимах / Л.И. Урбанович [и др.] // Непрерывное литье стали. – М. : Metallurgy, 1978. – №5. – С. 5-9.
 5. Исследование напряжений в стенке чаши шлаковоза / Д.А. Рассохин, В.В. Чигарев, А.В. Лоза, В.В. Шишкин // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту. – 2013. – №27. – С. 172-176. – (Серія : Технічні науки).
 6. Исследование теплообмена при взаимодействии водовоздушного факела форсунки с непрерывно отливаемым слитком в зоне вторичного охлаждения / Е.П. Парфёнов // Совершенствование конструкций, исследование и расчет машин непрерывного литья заготовок / ВНИИМЕТМАШ. – М. : ВНИИМЕТМАШ. – 1987. – С. 68-77.
 7. Исследование теплообмена и гидродинамики при форсуночном охлаждении непрерывно-литого слитка / Л.И. Урбанович [и др.] // Проектирование и анализ работы машин непрерывного литья в НИИ «Уралмаш» / ВНИИМЕТМАШ. – М. : ВНИИМЕТМАШ. – 1984. – С. 85-93.
 8. Оптимизация режима вторичного охлаждения непрерывно-литых слябов / А.А. Смирнов [и др.] // Сталь. – 1995. – №12. – С. 30-32.
 9. Нисковских В.М. Машины непрерывного литья слябовых заготовок / В.М. Нисковских, С.Е. Карлинский, А.Д. Беренов. – М. : Metallurgy, 1991. – 271 с.
 10. Разработка рациональных режимов вторичного охлаждения непрерывно-литых слябов / А.М. Столяров [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – №2. – С. 55-57.

Bibliography:

1. Control of the process of solidification of the ingot is cast on the caster / O.V. Nosochenko [et al.] // Continuous casting of steel. – М. : Metallurgy, 1981. – №7. – P. 44-49. (Rus.)
2. Influence of some technological parameters on the quality of the macrostructure of continuously cast slabs / A.M. Pozhivanov [et al.] // Continuous casting of steel. – Moscow : Metallurgy, 1981. – №7. – P. 52-56. (Rus.)
3. Sladkoshteev V.T. Quality steel in the continuous casting / V.T. Sladkoshteev, V.I. Akhtyrsky, R.V. Potanin. – М. : Metallurgy, 1964. – 68 p. (Rus.)
4. Mathematical modeling of solidification during continuous ingot transients / L.I. Urbanowicz [et al.] // Continuous casting of steel. – М. : Metallurgy, 1978. – №5. – P. 5-9. (Rus.)
5. Investigation of stresses in the wall of the cup slag / D.A. Rassokhin, V.V. Chigarev, A.V. Loza, V.V. Shishkin // Reporter of the priazovskiyi state technical university. – 2013. – №27. – P. 172-176. – (Section: Technical sciences). (Rus.)
6. Study of heat transfer in the interaction of the water-air torch nozzles continuously cast ingot in the secondary cooling zone / E.P. Parfenov // Improvement of structures, study and calculation of continuous casting machines / VNIIMETMASH. – М. : VNIIMETMASH. – 1987. – P. 68-77. (Rus.)
7. Study of heat transfer and hydrodynamics at the nozzle cooling continuously cast ingot / L.I. Urbanowicz [et al.] // Design and analysis of continuous casting machines in SRI "Uralmash" / VNIIMETMASH. – М. : VNIIMETMASH. – 1984. – P. 85-93. (Rus.)
8. Optimization of secondary cooling a continuously cast slabs / A.A. Smirnov [et al.] // Steel. – 1995. – №12. – P. 30-32. (Rus.)
9. Niskovskih V.M. Slab continuous casting machine workpieces / V.M. Niskovskih, S.E. Carlin, A.D. Beren. – Moscow : Metallurgy, 1991. – 271 p. (Rus.)
10. Development of rational modes of secondary cooling a continuously cast slabs / A.M. Stolyarov [et al.] // Math. Universities. Iron and steel. – 2004. – №2. – P. 55-57. (Rus.)

Рецензент: А.Д. Размышляев
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.10.2014