

ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛТЕТ ПО МЕТАЛУРГИЯ И МАТЕМАТИКА

КАТЕДРА "ФИЗИЧНА МЕТАЛУРГИЯ И ТОПЛИННИ АГРЕГАТИ"

инж. Мария Красиминова Иванова

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА
ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА АГРЕГАТИТЕ
В ЧЕРНАТА МЕТАЛУРГИЯ**

за придобиване на образователната и научна степен

"доктор"

по научната специалност

5.9. Металургия (Металургична теплотехника)

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ:

доц. д-р инж. Емил Михайлов

НАУЧНО ЖУРИ:

1. доц. д-р инж. Борис Стефанов – председател и рецензент
2. проф. д-р инж. Цоло Рашев - рецензент
3. доц. д-р инж. Явор Лукарски
4. доц. д-р инж. Любомир Анастиев
5. доц. д-р инж. Емил Михайлов

София, 2012

Дисертационният труд е изложен на 177 страници, включва 60 фигури, 11 таблици и 3 приложения. Използвани са 170 литературни източника. Номерата на фигурите, таблиците уравненията и схемите в автореферата съответстват на тези в дисертацията.

Дисертационният труд е обсъден на катедрен съвет на катедра “Физична металургия и топлинни агрегати” при ХТМУ – София на 10.07.2012 г.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в Научния отдел на Химикотехнологичен и металургичен университет – гр. София, бул. „Св. Климент Охридски” № 8, сграда А, етаж IV, стая 406.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 04.10.2012 от 14:00 часа в зала 424, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

Автор: Мария Красимилова Иванова

Заглавие: ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА
ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА АГРЕГАТИТЕ В ЧЕРНАТА МЕТАЛУРГИЯ

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години стоманодобивът в България се осъществява в условия на дъмпингова стратегия от страна на големи производители на стомана и валцувани изделия и непрекъснато повишаващи се цени на енергоносителите и стоманените вторични суровини. Всичко това би трябвало да бъде разгледано и на фона на настъпилата стагнация във всички отрасли, потребители на металургична продукция, като: машиностроене, строителство, корабостроене и т.н.

В тези условия развитието на стоманодобивното производство е възможно само чрез интензифицирането му и чрез повишаване на икономическата му ефективност.

За тази цел е необходимо да бъдат предприети мерки за намаляване на разхода на енергия и материали при производството на единица продукция чрез внедряване на нови и енергоефективни технологии и получаване на качествени продукти. В този смисъл оценката и изследването на технологичните процеси с цел подобряване на техните характеристики, повишаване на енергийната ефективност на агрегатите и тяхната надеждна работа е една изключително актуална задача.

Анализът на възможните за реализиране мероприятия показва, че основен фактор, влияещ съществено на икономията на гориво и енергия е съгласуването на работата на МНРС с тази на нагревателните пещи, обслужващи валцовите станове при реализация на така наречените „непрекъснати технологии”. В това направление основен подход, водещ до икономия на енергия е повишаването на температурата на зареждания в нагревателните пещи метал и отпадането на необходимостта от междинното нагряване чрез реализиране на така наречените “непрекъснати технологии”, въведени в практиката на водещите световни производства под формата на “директно валцуване” или “горещо зареждане”.

Цел и задачи на дисертационния труд

Имайки предвид характера на технологичните потоци и отчитайки техническото и технологично състояние на агрегатите, **целта на настоящия дисертационен труд може да бъде формулирана като „Изследване на възможностите за повишаване на енергийната ефективност на агрегатите от черната металургия при интегриране на процесите и внедряване на технология на „горещо зареждане””**.

Многообразието на факторите, влияещи върху реализацията на интегрираната технология „получаване на стомана-валцуван продукт” изисква прецизна икономическа оценка за нейната ефективност. Основен елемент при такава оценка е определянето на възможната икономия на енергия. На базата на такава оценка е необходимо да бъде избрана подходящата технология, съобразена с конкретните производствени условия.

За целта са необходими данни за температурното поле и средната температура на блоковете от момента на разливането им до момента на зареждането им в нагревателните пещи при отчитане на вида и продължителността на транспортните операции.

Когато температурата на блоковете е достатъчно висока, необходимостта от преддеформационно нагряване може да отпадне.

Организацията на интегрираното производство изисква съгласуване на процесите на: (i) получаване на течна стомана; (ii) рафиниране на стоманата в извънпещни инсталации; (iii) непрекъснато разливане на стоманата; (iv) транспортиране на метала до пещите за нагряване; (v) нагряване до зададена температура, необходима за валцуване; (vi) валцуване.

Реализирането на такава технология е възможно само при наличие на съвременна система за управление, която включва: (i) рационално планиране; (ii) разработване на времеви графици на операциите; (iii) система за следене на метала и определяне на топлинното състояние на всеки отделен блок във времето.

В зависимост от нивото на организиране на производството са възможни следните схеми [155]:

- Непрекъснато разливане – валцуване при студено зареждане, наричано накратко студено зареждане. Обикновено температурата на зареждане е под 400°C.

- Непрекъснато разливане – валцуване при горещо зареждане. В повечето случаи температурата на зареждане е в границите от 400 до 800°C [128].

- Непрекъснато разливане – валцуване при директно горещо зареждане, наричано “горещо зареждане” Температурата на зареждане варира в границите на 1000°C до 1100°C.

- Непрекъснато разливане – директно валцуване. Средната температура на метала преди валцуване е над 1100°C.

Най-важната предпоставка за ефективната реализация на горещото зареждане е отливането на блокове с гарантирано добро качество без дефекти, което позволява да бъдат зареждани в нагревателните пещи без инспектиране на качеството и почистване на повърхността. При горещото зареждане, горещите сляби се транспортират до нагревателните пещи с висока средна температура, без междинни престои и охлаждане.

За ефективната реализация на метода на “горещо зареждане” е необходимо познаването на температурното поле на метала и получаване на над 95% годно за валцуване количество метал.

Това налага провеждането на едно комплексно изследване на процесите на добиване, обработване и охлаждане на метала от разливането до зареждането му в нагревателната пещ и преддеформационното нагряване. Използването на математични модели в тези случаи в комбинация с данни за конструктивните особености и параметрите на работа и на базата на хронометраж на операциите, позволява да се съкрати значително обема на изследователската работа и да бъдат отчетени и редица фактори, за които в реалните условия се съди само по косвени показатели.

Получаването на тези резултати е възможно с помощта на числената реализация на алгоритъм, който включва:

- Математичен модел, описващ топлообмена, кристализацията и затвърдяването на блоковете при непрекъснато разливане на стоманата. Този модел трябва да отчита условията на топлообмен при използване на оптимизационни процедури, позволяващи подбиране на параметрите на охлаждане, гарантиращи получаването на метални блокове без дефекти.

- Математичен модел, описващ топлообмена при отчитане на охлаждането на метала, в зависимост от графика и вида на операциите на транспортиране на блоковете до нагревателните пещи. Този модел трябва да отчита възможните варианти на престой на блоковете в прокатните цехове.
- Математичен модел, описващ топлообмена и нагряването на метала в нагревателните пещи. Този модел трябва да отчита различното топлинно състояние на блоковете на входа на пещта и да позволява определяне на съответните топлинни и температурни режими на нагряване.

За ефективното управление на целия технологичен процес с on-line процедури е необходимо да бъде разработен обобщен алгоритъм, работещ в реално време при отчитане на температурното състояние на отделните блокове в зависимост от конкретните условия на производството и технологичната готовност на отделните агрегати.

Използвани методи

За постигане на поставената цел е прието да бъдат разработени математични мадели, отчитащи охлаждането на метала на отделните етапи от формирането на блоковете от машината за непрекъснато разливане на стоманата (МНРС) до горещото им валцуване.

При разработване математичните модели са използвани конструктивните параметри и технологични особености на реално работещи агрегати.

2. МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ НА ТОПЛООБМЕН ПРИ НЕПРЕКЪСНАТО РАЗЛИВАНЕ НА СТОМАНАТА, ТРАНСПОРТИРАНЕ НА МЕТАЛА И ПРЕДДЕФОРМАЦИОННО НАГРЯВАНЕ

2.1. Математическо моделиране на процесите на формиране на блока при непрекъснато разливане на стоманата

2.1.1. Описание на процеса на кристализация при непрекъснато разливане на стоманата

При разработване на математичен модел на охлаждането на метала, в МНРС могат да бъдат обособени две охлаждаеми зони:

- зона на първично охлаждане – във водоохлаждаемия кристализатор;
- зона за вторично охлаждане - серия от охлаждаеми подзони, където с помощта на охлаждащи струи се осъществява охлаждане с контролируема интензивност.

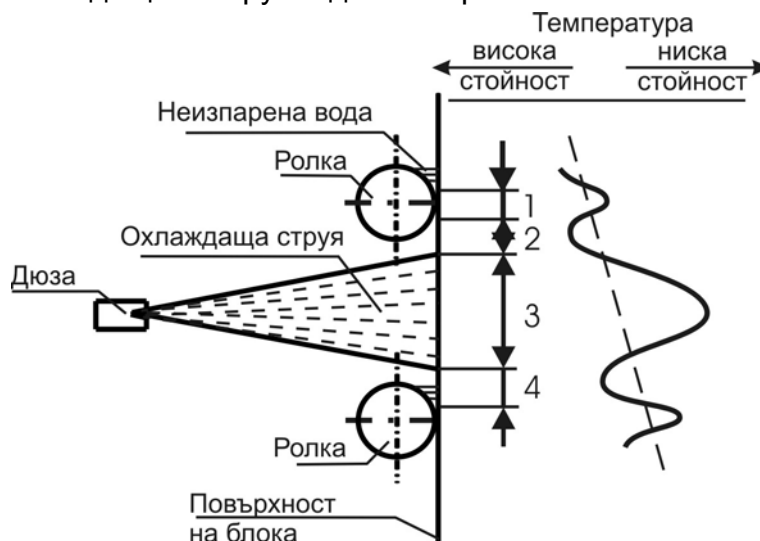
Кристализатора условно може да бъде разделен на два участъка:

1. Директен контакт на метала със стените на кристализатора до формиране на газова междина между метала и кристализатора
2. Теплоотдаване при наличие на въздушна междина.

След напускането на кристализатора метала постъпва в зоната на вторично охлаждане, където система от поддържащи ролки предпазва кората на блока от раздуване и пробив под въздействие на феростатичното

Зоната на охлаждане между две ролки може да бъде разделена на четири подзони с различна интензивност на охлаждане (фигура 2.1.1.4):

1. на контакт на блока с горната поддържаща ролка;
2. между горната поддържаща ролка и охлаждащата;
3. на директно охлаждане от водната;
4. между охлаждащата струя и долната ролка.



Фигура 2.1.1.4. Схема на подзоните между две ролки в зоната за вторично охлаждане.

Интервалът на безопасно изменение на охлаждащите параметри се характеризира с гранични стойности на коефициентите на топлоотдаване. При стойности по-високи от горната граница съществува опасност от появата на горещи пукнатини. При стойности по-ниски от долната граница съществува опасност от пробив под действие на феростатичното налягане.

Определяните коефициенти на топлоотдаване трябва да подsigуряват следните изисквания, които са ноложени като граничения при разработване на оптимизационни процедури в изчислителния алгоритъм:

- Дебелината на кората на изхода от кристализатора и в отделните зони за вторично охлаждане да не бъде по-ниска от определена допустима стойност, подsigуряваща безаварийна работа.
- Дълбочината на проникване на течната фаза (металургичната дължина) не трябва да бъде прекалено дълга – кристализацията трябва да завърши в зоната за вторично охлаждане, преди блока да бъде подложен на деформация от изтеглящите ролки.
- Максималната скорост на охлаждане в зоната за вторично охлаждане трябва да бъде по-ниска от 80°C/m [121].
- Максималното прогряване на повърхността след излизане на блока от зоната за вторично охлаждане трябва да бъде по-ниско от 50°C [121].
- Монотонно изменение на температурата по повърхността на блока.

2.1.2. Математичен модел на процеса на формиране на металните блокове при непрекъснато разливане на стоманата

При описание на процеса на топлообмен при кристализация на метала в машини за непрекъснато разливане се използва диференциалното уравнение на топлопроводността с вътрешен топлинен източник на топлина [61,63,106 и др.]:

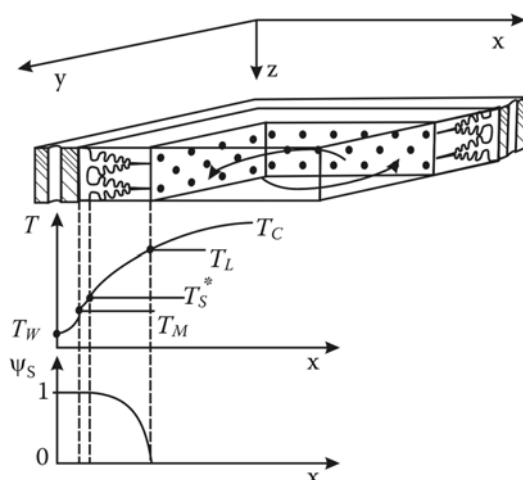
$$\rho_{eff}(T)C_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}[\lambda_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[\lambda_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial y}] \quad (2.1.2.21)$$

където: ρ_{eff} - плътност на метала, kg/m^3 ; T - температура на метала, K ; ψ_s - количество на твърдата фаза, изменящо се в диапазона $0 \div 1$; λ_{eff} - ефективен коефициент на топлопроводност на метала, отчитащ и конвективния пренос на топлина в течната фаза [106], W/(m.K) ; C_{eff} - ефективен топлинен капацитет на метала, отчитащ отделянето на топлината на фазовия преход, J/kgK .

При формулиране на математичния модел може да бъде разгледан тънък обемен елемент, който започва да се придвижва от менисуса и се движи по дължина на машината със скоростта на изтегляне на метала. Фигура 2.1.2.1 представя схема на кристализационен фронт за тънък хоризонтален елемент от метална сплав, който се движи по дължината на машината със скоростта на разливане. T_L е температурата на ликвидус на метала, а T_S е температурата на солидус на метала, K . T_C – температура на разливане.

Координатната система е ориентирана така, че оста X съвпада с широката страна на блока, оста Y съвпада с тясната страна на блока, а оста Z съвпада с технологичната ос на МНРС.

За решаване на уравнението на топлопроводността при две пространствени координати се използват следните начални и гранични условия:



Фигура 2.1.2.1. Схема на фронта на кристализация

$$\begin{aligned}
T(x, y, \tau)_{\tau=0} &= T_c(x, y) \\
-\lambda_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= q_1(y, \tau) \\
\lambda_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=S_2} &= 0 \\
\lambda_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=S_1} &= 0 \\
-\lambda_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} &= q_2(x, \tau)
\end{aligned} \tag{2.1.2.27}$$

Където T_c е температурата на разливане, К; τ е време, s; x, y - текущи координати, m; S_1, S_2 - съответно половината от широчината и дебелината на слитъка, m; q_1, q_2 - резултантни топлинни потоци по съответните повърхнини, W/m².

За областта на кристализатора топлинния поток се представя с:

$$q_i = h_m(T_M - T_W), \quad i=1, 2, \tag{2.1.2.28}$$

където q_i , е топлинен поток по повърхността, W/m²; T_M – повърхностна температура на метала, К; T_W – температура на охлаждащата вода в кристализатора, К; h_m - коефициент на топлоопреминаване, W/m²K.

За зоната на вторично охлаждане, q_i се определя с:

$$q_i = h_c(T_M - T_W) + \sigma_0 \varepsilon_M T_M^4, \quad i=1, 2, \tag{2.1.2.35}$$

където h_c коефициент на топлоотдаване с конвекция, W/m²K;

В зоната на топлоотдаване с излъчване топлинния поток се описва с:

$$q_i = \sigma_0 \varepsilon T^4, \quad i=1, 2. \tag{2.1.2.36}$$

За численото решаването на уравнение 2.1.2.21 е използвана явна схема на метода на крайните разлики.

2.2. Моделиране на процесите на топлообмен при транспортиране на блоковете от машината за непрекъснато разливане до пещите за преддеформационно нагряване

Реализацията на метода на “горещо зареждане” включва както технологични, така и организационни мероприятия, като най-важните от тях са пълната синхронизация на процесите и качеството на отлетите блокове. Неминуемо това е свързано с допълнителни инвестиции. Ето защо преди да бъде избран конкретния вариант на реализация по отношение на транспорт и складиране на блоковете по време на престой е необходимо да бъде направена една първоначална оценка на възможната икономия на енергия при различните варианти.

За подбирането на оптималните режими на нагряване в нагревателните пещи е необходимо да бъде направена оценка на топлинното състояние на блоковете и познаването на температурното поле на всеки един от тях от изхода на машината за непрекъснато разливане до зареждането му в нагревателните пещи, в зависимост от вида на транспортните операции с отчитане конкретното му местоположение при нареждането на блоковете един

върху друг при товарене за транспорт, по време на транспорта и след разтоварването им в прокатните цехове.

При отчитане на условията на топлообмен между отделните блокове и между блоковете и околната среда по време на транспорт и престой са взети под внимание следните транспортни операции:

1. Транспортиране на слябите от машината за газово рязане до мястото, където се изчаква да завърши леенето и се комплектува цялата плавка.
2. Складиране на щабел по реда на пристигането им, при което първата сляба постъпва най-отдолу, върху нея е втората и т. н. Прието е, че 100t метал (от един технологичен цикъл на електроудъговата пещ) се реди на един щабел. Тогава времето за нареждане на щабела е сума от продължителностите на операциите захващане, повдигане, транспортиране, спускане и оставяне.
3. Престой на слябите в щабела. Определя се за всяка сляба поотделно. Възможен е престой и след нареждане на целия щабел. По време на престоя отделните блокове, наредени един върху друг обменят топлина по между си чрез топлопроводност при наличие на контакт. В този период от време охлаждането става през околните повърхнини на щабела в резултат на радиация и конвекция.
4. Товарене на слябите в ж.п. вагони, при което блоковете се пренареждат. Подът и стените на вагоните са топлоизолирани с огнеупорен материал, а отгоре са открити. Блоковете от един щабел се транспортират с два вагона. Една композиция се състои от четири вагона или транспортира два щабела. При тази операция последният блок от разливането на метала се позиционира в основата на новонаредения щабел във вагона, а четвъртият е на горната повърхност в първия вагон, петият е в основата на подреждане във втория вагон, а първият, отлят от машината за непрекъснато разливане, се позиционира на повърхността на новоформирувания щабел във втория вагон.
5. Престой на слябите във вагоните. Определя се за всяка сляба поотделно и включва товаренето на вагоните и разтоварването им. Блокът от повърхността на щабела отдава топлината си към околната среда през горната повърхност. Долната му повърхност контактува с горната на блока, върху който е поставен. Всички блокове отдават топлина през страничните повърхнини в условията на радиационен топлообмен с топлоизолираните стени на вагоните и свободна конвекция.
6. Транспортиране до склада на нагревателните пещи (всички сляби са във вагоните).
7. Разтоварване в склада на нагревателните пещи, при което блоковете се пренареждат отново. Тук блокът от повърхността на първия вагон се позиционира в основата на новоизграждащият се щабел в цеха. Втория блок се поставя върху него и т.н. Блокът от повърхността на втория вагон се нарежда върху последния блок от

първия вагон (който е бил в основата на щабела на първия вагон при трънспортирането), а най-долния блок от втория вагон постъпва върху повърхността на новоизградения щабел в цеха. Предвидени са два варианта на складиране. Според единия слябите се редят на открити щабели в закрито помещение в близост до нагревателните пещи, като една плавка се нарежда на един щабел. Според втория вариант, слябите се поставят в топлоизолирани камери, които се покриват с капак. Подът, стените и капакът на камерите са облицовани с огнеупорни материали. Слябите от всеки щабел се нареждат една върху друга.

8. Престой в камерите или в откритите щабели. Определя се от асортиментната програма на стана. При престой в термоизолираните камери околната повърхнина на щабела влиза в радиационен топлообмен с топлоизолираните стени на камерата.
9. Изваждане на слябите от камерите или вземане на слябите от щабелите и поставяне върху зареждащия ролганг на пещите.
10. Транспортиране по ролганга от склада до нагревателните пещи и престой на слябите върху ролганга.

Математичното моделиране на охлаждането на метала след машината за непрекъснато леене е непосредствено свързано с начините за манипулиране и транспортиране на метала до нагревателните пещи. В най-общия случай, обаче, тя се свежда до решаването на уравнението на топлопроводността по две пространствени координати:

$$\rho(T)C(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right] \quad (2.2.1)$$

при съответните начални и гранични условия. Началното разпределение на температурата в блоковете се определя на базата на изчисления с математичен модел на работата на МНРС. Граничните условия се определят посредством зоналния метод на външния топлообмен за всяка конкретна транспортна операция. Локалните ъглови коефициенти, степените на чернота и коефициентите на конвективен топлообмен се изчисляват по общоприетата методика [88]. Поради наличие на симетрия изчисленията се провеждат за половината от напречното сечение на блоковете. Началните и гранични условия за блоковете от вътрешността на щабела имат следния вид:

$$\begin{aligned} T(x, y, \tau)_{\tau=0} &= T_{cc}(x, y) \\ -\lambda_{ef}(T)\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0} &= q(y, \tau) \\ \lambda_{ef}(T)\frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{y=2S_2} &= h_{icc}(T_{M2} - T_{M1}) \\ \lambda_{ef}(T)\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=S_1} &= 0 \\ -\lambda_{ef}(T)\frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{y=0} &= h_{icc}(T_{M1} - T_{M2}) \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

където T_{cc} е температурата по напречното сечение на метала на изхода от МНРС в К; S_1 , S_2 са половината от широчината и дебелината на блоковете в m; h_{tcc} – коефициент на контактното топлоотдаване в $W/(m^2K)$; T_{M1} и T_{M2} са температурите на долната и горна повърхност на блоковете в К.

За горната повърхност на щабела граничното условие има вида:

$$\lambda_{ef}(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=2S_2} = q(y, \tau), \quad (2.2.3)$$

където q се определя по формула 2.1.2.36.

Отчитането на топлообменните процеси на блоковете по време на транспортните операции дава възможност да бъде определено топлинното им състояние и температурното им поле на входа на нагревателните пещи.

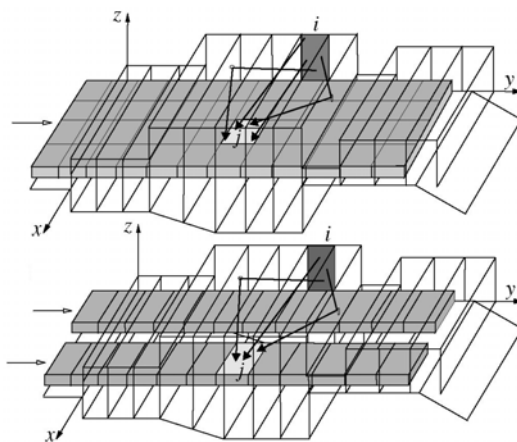
2.3. Моделиране на процесите на топлообмен при преддеформационно нагряване на метала

Целта на преддеформационното нагряване е довеждане на метала до зададена крайна температура при допустим температурен градиент преди излизането му от пещта с минимален разход на гориво и минимално количество окислен метал при реалния темп на валцуване.

За определяне на температурното поле в обема на метала се използва уравнение (2.2.1), за решаването на което трябва да бъдат отчетени конкретните условия, на базата на които се формират съответните гранични условия.

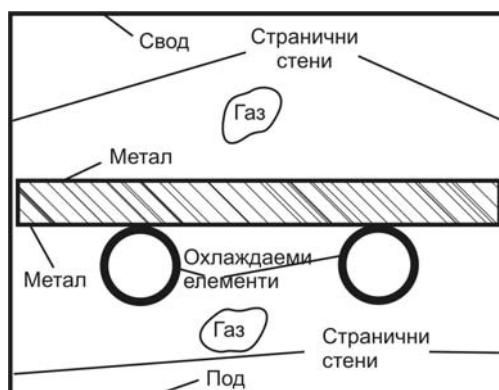
Резултантният топлинен поток, падащ върху повърхността на метала се използва като гранично условие за решаване на уравнението на топлопроводността, описващо температурното разпределение по напречното сечение на метала.

При определяне на граничните условия, необходими за решаване на уравнение (2.2.1) е използван зонален метод за описание на радиационния топлообмен. С помощта на този метод могат да бъдат определени топлинните потоци, излъчени и погълнати от горещите газове и всички повърхнини, участващи в топлообмена.



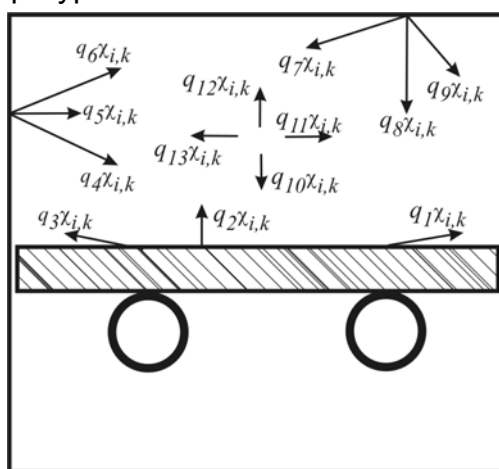
Фигура. 2.3.1.б. Схема на повърхностните и обемни зони и радиационните потоци за пещ с едноредно и двуредно зареждане.

За определяне на граничните условия към горната и долната повърхност на метала, за пещ с двустранно нагряване напречното сечение се разделя на две области- горна и долна, в които условията на топлообмена са различни. Схема на напречното сечение на пещта е представена на фигура 2.3.2. В долната област са разположени елементите, по които става транспортирането на метала. Отделните зони в рамките на един изчислителен участък имат постоянна температура.



Фигура 2.3.2.Схема на напречното сечение на пещта.

При разглеждане на радиационния топлообмен системата се разделя на краен брой повърхностни (n) и обемни (m) зони, в границите на които температурата и степента на чернота се приемат постоянни. Схема на напречното сечение на пещта с топлинните потоци в горната нагревателна зона е представена на фигура 2.3.3.



Фигура 2.3.3. Схема на напречното сечение на пещта с топлинните потоци в горната нагревателна зона.

Алгоритъма на решаване на задачата за нагряване на метални блокове включва:

- определяне на скоростните, температурните и концентрационни полета в обемните зони за даден момент от време при зададени режимни параметри на въздуха и газа за съответната конструкция на горивоизгарящите устройства при използване на уравнение (2.3.8).

- решаване на задачата за радиационния топлообмен, която дава граничните условия, описани със система уравнения (2.3.3).
- изчисляване на температурното поле в метала и огнеупорната изолация на пещта по уравнение (2.2.1) при определените начални и гранични условия.

Тези изчислителни процедури се повтарят за следващата стъпка във времето.

Описаният математичен модел може да бъде използван в два режима:

- за определяне на температурните режими на нагряване при равномерен темп на валцуване;
- в on-line режим за установяване на минималния разход на гориво при променлив темп на валцуване и променлива температура на зареждания метал при спазване на условията за качеството на нагряваните блокове. За този случай са предвидени и съответните оптимизационни процедури.

Описаните по-горе математични модели позволяват на базата на данните за температурното поле на блоковете да бъде проведена оценка на разхода на енергия за нагряване в зависимост от вида на транспортните операции (начална температура на зареждане).

3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ НА ОХЛАЖДАНЕ И ТЕМПЕРАТУРНОТО СЪСТОЯНИЕ НА МЕТАЛА ПРИ НЕПРЕКЪСНАТО РАЗЛИВАНЕ НА СТОМАНАТА, ТРАНСПОРТИРАНЕ НА МЕТАЛА И ПРЕДДЕФОРМАЦИОННО НАГРЯВАНЕ

3.1. Изследване на процесите на охлаждане и температурното състояние на метала в машини за непрекъснато разливане на стоманата

3.1.1. Изследване на процесите на охлаждане и температурното състояние на метала в машината за непрекъснато разливане на полуфабрикати за дълги продукти

За установяване на температурното разпределение по напречното сечение на блоковете, средномасовата температура на метала и остатъчното топлосъдържание е разработен математичен модел на процесите на кристализация и охлаждане, който е адаптиран към конструктивните параметри на определена машина за непрекъснато разливане на дълги продукти (блуми). Като обект на изследване е приета радиална МНРС с радиус 10 m, дължина на кристализатора 1,0 m и технологична дължина 19,14 m.

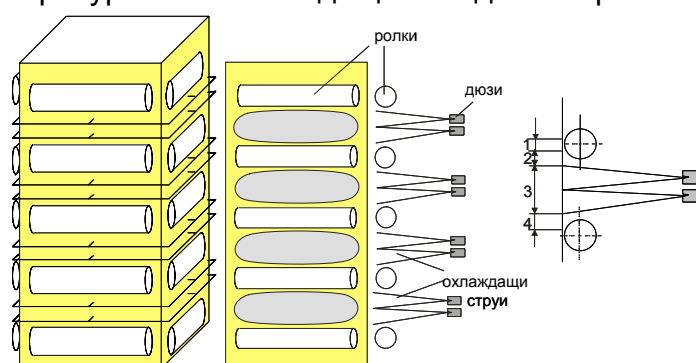
При отчитане на параметрите на охлаждащата система зоната за вторично охлаждане (ЗВО) е разделена на четири подзони, а пространството между две ролки е разделено съответно на четири сектора:

- 1) на контакт на блока с горната опорна ролка;
- 2) между горната опорна ролка и струята;
- 3) на пряко охлаждане от водовъздушните струи;
- 4) между водовъздушните струи и долната опорна ролка.

Схемата на ЗВО е представена на Фигура 3.1.1.1., където различните охлаждащи зони от ЗВО са означени с римски цифри, а на отделните сектори - с арабски.

За провеждане на изследването, настройка и адаптация на модела, е проведен промишлен експеримент, при който са отчетени параметрите на работа на реална машина за непрекъснато разливане. При експеримента са отчетени:

- количеството вода за охлаждане на кристализатора;
- количествата вода за охлаждане на отделните подзони в зоната за вторично охлаждане;
- температурата на разливания метал, измерена в междинната кофа;
- температурата на охлаждащата вода и скоростта на разливане.



Фигура 3.1.1.1. Схема на зоните и секторите (1÷4) на охлаждане в ЗВО.

В същото време, с помощта на инфрачервена камера е измервана температурата на повърхността на металния блок в областта под бункера, в който се намира ЗВО.

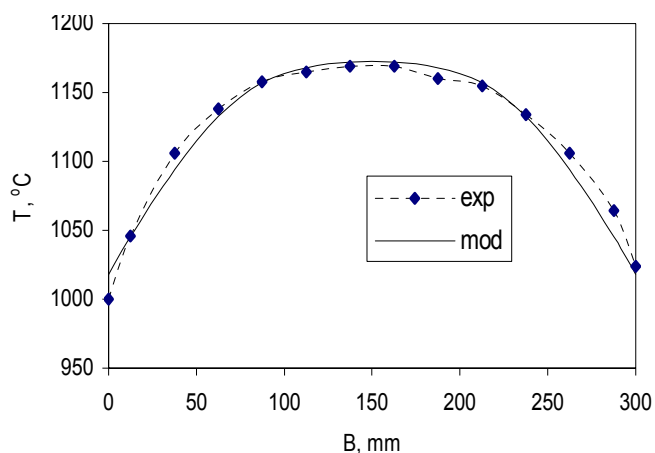
На основата на анализ на параметрите на разливане, конструктивните параметри и експериментални измервания на температурата на повърхността на блока е проведена настройка и

За конкретната конструкция на охлаждащите дюзи, при използване на характеристиките на охлаждане и стойностите за плътностите на оросяване са определени зоните от повърхността на блока, които се покриват директно от водните струи и интензивността на охлаждане под действие на водните струи, както и свързаните с тях стойности на коефициентите на топлоотдаване в ЗВО, представени в таблица 3.1.1.3

Сравнителният анализ между измерените и предсказани по модела стойности е представен на Фигура 3.1.1.2.

Таблица 3.1.1.3.

Зона	$\alpha, \text{W/ m}^2\text{K}$
Зона I	340
Зона II	280
Зона III	260
Зона IV	-



Фигура 3.1.1.2.

Анализът на получените числени стойности позволява да приемем, че определените параметри на охлаждане и повърхности от повърхността на блока, подложени на директно оросяване от водовъздушните струи имат добро съвпадение.

Анализът на резултатите от таблица 3.1.1.2 показва, че за целите на конкретното изследване и настройка може да бъде прието, че процесът е проведен при средна температура на разливане 1535 и средна скорост на разливане $V = 0,75 \text{ m/min}$.

В процеса на изследване са определени граничните стойности на коефициентите на топлоотдаване в отделните сектори от подзоните, разположени между две опорни ролки и по-специално в зоните на оросяване от водните струи в рамките на всяка зона от вторичното охлаждане.

Резултатите за горната граница на охлаждане и скорост на разливане $0,9 \text{ m/min}$ при отчитане само на напрегнатото и деформационно състояние на блока са представени на фигура 3.1.1.4. С плътни линии са означени температурите на различни разстояния от повърхността ($0 \div 0,125 \text{ m}$), а с прекъсната линия – стойностите на коефициентите на топлоотдаване α .

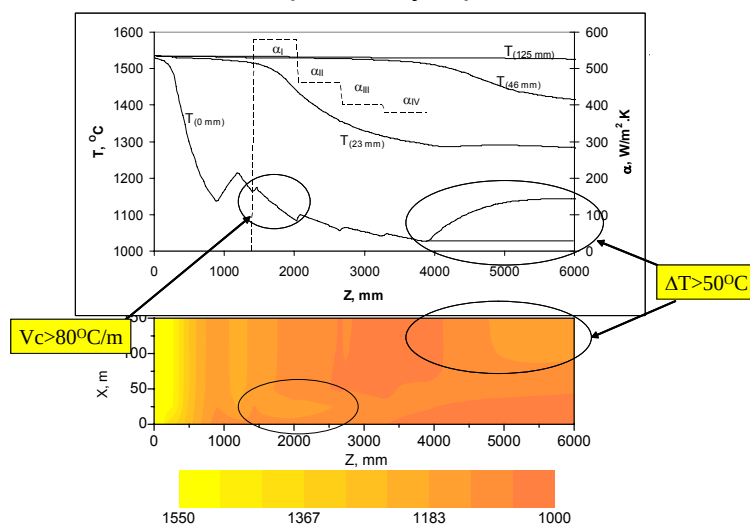
От фигурата се вижда, че при този режим на охлаждане скоростта на охлаждане в първа охлаждаема зона е 133°C/min . След излизане от зоната за вторично охлаждане повърхностната температура нараства със 118°C . Това може да доведе до влошаване на качеството, защото скоростта на охлаждане на повърхността не трябва да надвишава 80°C/m , нарастването на температурата на повърхността след излизане от ЗВО трябва да бъде по-ниска от 50°C и завършването на процесите на кристализация да бъде границата на контролируемото охлаждане на ЗВО[24,121.]. Затова такива режими трябва да бъдат избягвани.

От фигура 3.1.1.4. се вижда, че върху повърхността има зони с неравномерно изменение на температурите, т.е. зоните, директно покривани от охлаждащите струи имат по-ниска температура, а други се прогряват, което е предпоставка за получаване на дефекти.

За изпълнение на цитираните по-горе ограничения, наложени от изискванията за получаване на качествени блокове, в изчислителния алгоритъм на математичния модел са разработени оптимизационни процедури, с помощта на които да бъде направена корекция на зоните от повърхността на блока, които да бъдат охлаждаани директно от

водовъздушните струи и стойностите на коефициентите на топлоотдаване, гарантиращи покриване на наложените изисквания, свързани с получаване на качествени блокове.

С помощта на усъвършенствания изчислителен алгоритъм са проведени изследвания при различни скорости на охлаждане, за които са наложени упоменатите по-горе ограничения по отношение на скоростта на охлаждане ($V_c < 80^\circ\text{C/m}$) на повърхността на блока, температурата на прогряване ($\Delta T < 50^\circ\text{C}$), след излизане от ЗВО и дълбочината на проникване на течната фаза. Паралелно с това, в резултат на оптимизационните процедури е направена корекция на зоните от повърхността на блока, които трябва да бъдат покривани директно от охлаждащите струи с цел получаване на монотонно изменение на температурното поле по повърхността на блока, без локални прогрявания в посока, перпендикулярна на посоката на изтегляне.



Фигура 3.1.1.4. Изменение на температурата по вертикалното напречно сечение и за половината от горната повърхност на блока за скорост на разливане $V = 0,9 \text{ m/min}$ и висока интензивност на охлаждане.

Получени са резултати за стойностите на коефициентите на топлоотдаване и зоните от повърхността, които трябва да бъдат покривани директно от водните струи.

Резултатите за изменението на температурата по вертикалното напречно сечение и за половината от горната повърхност на блока за скорости $0,6 \text{ m/min}$ и $0,9 \text{ m/min}$ са представени съответно на Фигури 3.1.1.5 и 3.1.1.7.

От Фигура 3.1.1.5 се вижда, че изменението на температурата в ЗВО има постоянна скорост на охлаждане от $11,4^\circ\text{C/m}$, а от Фигура 3.1.1.7, за скорост $0,9 \text{ m/min}$, стойността за скоростта на охлаждане е $11,8^\circ\text{C/m}$.

За различните скорости на разливане, температурите на прогряване по повърхността на блока при напускане на ЗВО са както следва: при $0,6 \text{ m/min}$ – 27°C и при $0,9 \text{ m/min}$ – 41°C .

При изпълнение на наложените ограничения, за конкретната конструкция на машината за непрекъснато разливане получените резултати за интензивността на охлаждане при долната и горна граница на охлаждане съвпадат, поради което за различните скорости на изтегляне на блока от кристализатора е представен по един режим.

Получените стойности за параметрите на охлаждане удовлетворяват наложените по-горе ограничения. Следователно, може да бъде препоръчано определените стойности за коефициентите на топлоотдаване да бъдат съгласно представените в таблица 3.1.1.4.

Получените резултати за температурното разпределение за $\frac{1}{4}$ от обема на блока за различни позиции на контролното сечение при различни скорости на разливане са представени на фигура 3.1.1.8- 3.1.1.10.

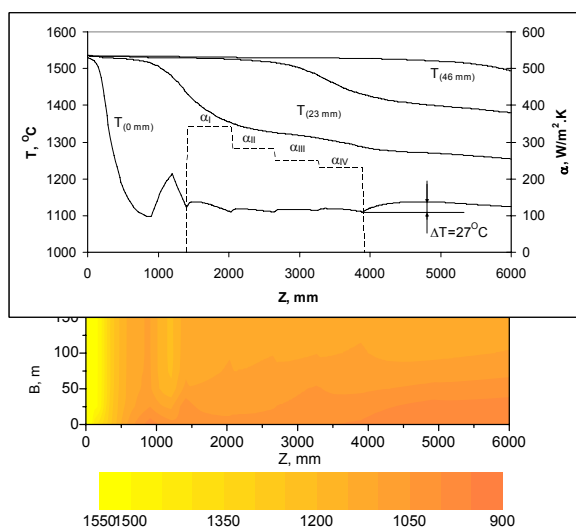
Температурното разпределение в кристализирания метал (без течната фаза) за $\frac{1}{4}$ от обема на блока е представено на Фигура 3.1.1.11.

Получените резултати за температурното разпределение по повърхността за $\frac{1}{4}$ от обема на блока е представено на фигура 3.1.1.12 .

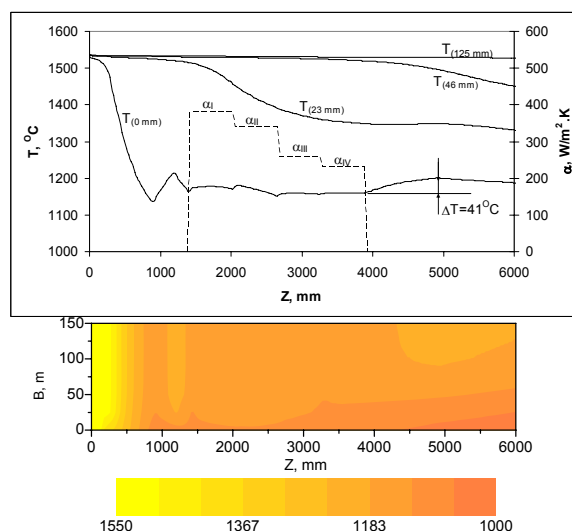
Таблица 3.1.1.4. Препоръчителни стойности на коефициентите на топлоотдаване в зависимост от скоростта на разливане на метала.

Зона	α , W/m ² .K		
	V =0,6 m/min	V = 0,75 m/min	V = 0,9 m/min
I	340	360	380
II	280	280	340
III	250	260	260
IV	230	230	230

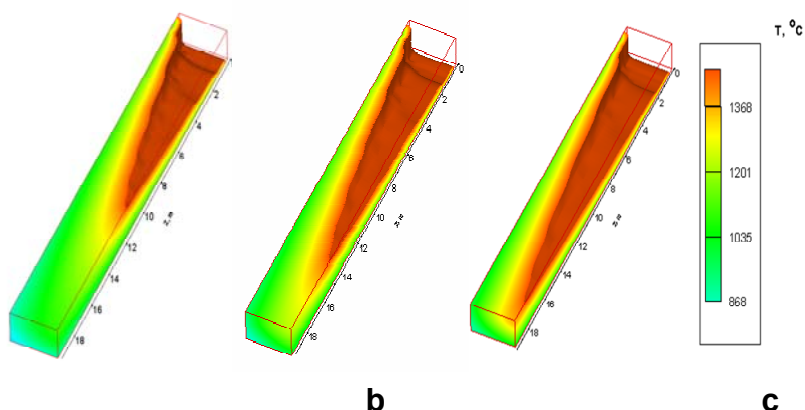
В резултат на изследването е установена и максимално допустимата скорост за описаната по-горе конструкция на ЗВО. При скорости по-високи от 1 m/min в първа охлаждаема зона съществува опасност от пробив. Поради тази причина за запазване на качеството на метала, при конкретната конструкция скорости, по-високи от 1 m/min не се препоръчват.



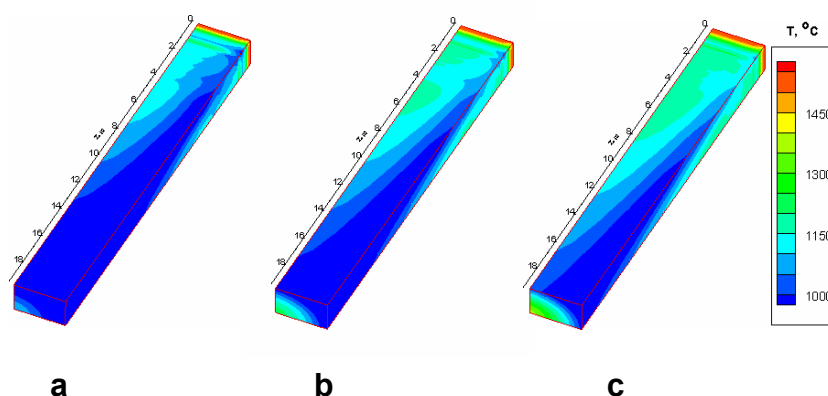
фигура 3.1.1.5.



Фигура 3.1.1.7.



Фигура 3.1.1.11. Температурно разпределение в $\frac{1}{4}$ от обема на блока:
a – 0,6 m/min; **b** – 0,75 m/min; **c** – 0,9 m/min



Фигура 3.1.1.12. Температурно разпределение по повърхността за $\frac{1}{4}$ от обема на блока: **a** – 0,6 m/min; **b** – 0,75 m/min; **c** – 0,9 m/min

Стойностите за средната температура ($T_{сс}$) и топлосъдържанието ($Q_{сс}$) на блока на изхода от МНРС като функция от скоростта на изтегляне са представени в Табл. 3.1.1.5.

Табл.3.1.1.5.

	V = 0,6 m/min	V = 0,75 m/min	V = 0,9 m/min
$T_{сс}, ^\circ\text{C}$	927	1027	1099
$Q_{сс}, \text{kJ/kg}$	640	709	795

От таблица 3.1.1.5 се вижда, че средната температура на метала се променя в границите на 927 до 1100 $^{\circ}\text{C}$, а топлосъдържанието – от 640 kJ/kg до 795 kJ/kg, което е 48 до 59% от началното топлосъдържание.

3.1.2. Изследване на процесите на охлаждане и температурното състояние на метала в машината за непрекъснато разливане на полуфабрикати за плоски продукти

За изследване на процесите на охлаждане и температурното поле по повърхността и в обема на метала при непрекъснато разливане на полуфабрикати за плоски продукти (сляби) е проведено числено изследване на процесите на охлаждане. За провеждане на изследването е разработен математичен модел, основаващ се на описаните в глава 2.1. теоретични постановки, описващ процесите на охлаждане и кристализация и позволяващ

определяне на параметрите на охлаждащата система, гарантиращи получаването на качествени блокове.

За целта са разработени оптимизационни процедури, с помощта на които се реализират наложените ограничения по отношение на скоростта на охлаждане, дълбочината на проникване на течната фаза и прогряването на повърхността на блока на изхода от ЗВО.

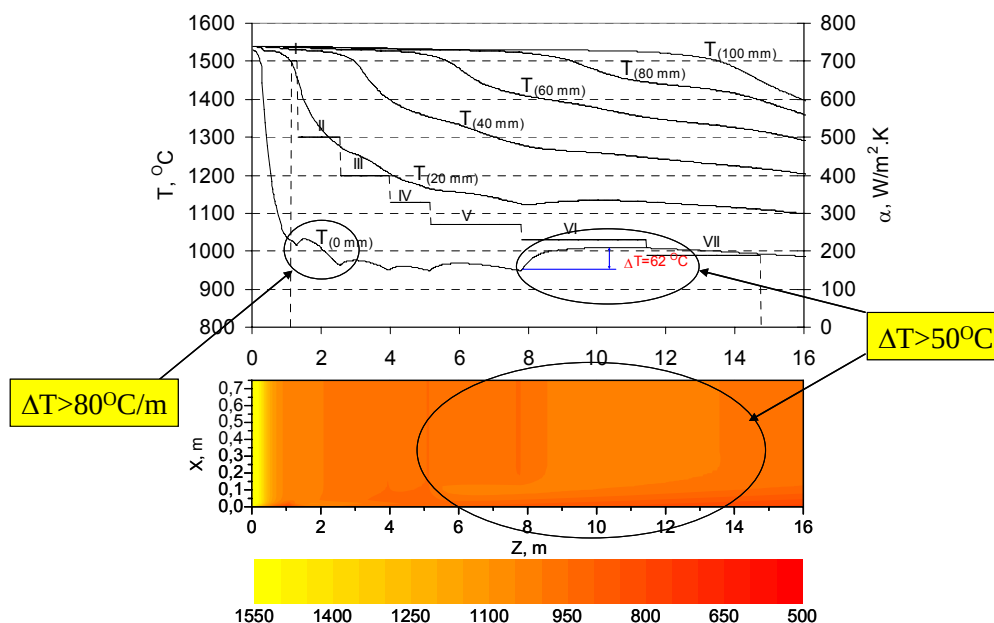
При разработване на математичния модел, за целите на изследването са отчетени параметрите на реално работеща машина за непрекъснато разливане. Като обект на изследване е приета радиална МНРС с радиус 12 m, дължина на кристализатора 1,2 m и технологична дължина 24,4 m.

В процеса на изследване са определени граничните стойности на коефициентите на топлоотдаване за всяка зона от вторичното охлаждане и областите от повърхността на блока, които трябва да бъдат покривани директно от охлаждащите струи за подsigуряване на оптималните условия на охлаждане, описани при предходното изследване.

Получените резултати за скорост на разливане 0,9 m/min без съобразяване със споменатите вече допълнителни изисквания са илюстрирани на Фигура 3.1.2.1.

От фигурата се вижда, че температурата на повърхността при скорост на разливане 0,9 m/min и висока интензивност на охлаждане във втора зона се променя от 1032°C до 963°C за разстояние 0,85m или това е 81°C/m. При излизане от участъка на охлаждане прогряването на повърхността е 62°C. Също така, от Фигура 3.1.2.1. се вижда, че съществува и зона на прогряване по дължина на горната повърхност на блока, водеща до появата на неравномерност на температурното поле на повърхността.

На фигурата 3.1.2.1 се вижда наличието на участъци с неравномерно изменение на температурата на повърхността, т.е. областите, които се покриват с водните струи са с по-ниски температури, а съседните на тях се прогряват, което е предпоставка за появата на дефекти.



Фигура 3.1.2.1.

Ето защо са проведени серия изчисления, при които с помощта на оптимизационни процедури са определяни площите от повърхността на блока, които да бъдат покривани директно от охлаждащите струи и необходимите коефициенти на топлоотдаване, при които скоростта на охлаждане на повърхността на блока да не надвишава $80^{\circ}\text{C}/\text{m}$, прогряването след излизане от ЗВО да не надвишава 50°C и кристализацията на блока да завършва в рамките на контролируемото охлаждане на ЗВО. Изследването е проведено в диапазона на изменение на скоростта на разливане от $V=0,5\div0,9\text{ m}/\text{min}$.

Част от получените резултати при определените коефициенти на топлоотдаване за температурите по повърхността и в обема по надлъжната ос на блока, при така наложените ограничения, са представени на фигури 3.1.2.3 и 3.1.2.7. На тези фигури е илюстрирано изменението на температурите от повърхността до центъра на блока през 20 mm, определените коефициенти на топлоотдаване за горната граница на интензивността на охлаждане и дължината на отделните зони на охлаждане.

С плътни линии са означени температурите на различни разстояния от повърхността ($0\div0,1\text{ m}$), а с прекъсната линия – стойностите на коефициентите на топлоотдаване α .

При същата скорост на разливане и ниска интензивност на охлаждане (фигура 3.1.2.3) се *наблюдава* приблизително постоянен наклон на линията, характеризираща температурата на повърхността, при което охлаждането е $19^{\circ}\text{C}/\text{m}$. При напускане на участъка на охлаждане прогряването на повърхността не се наблюдава.

При скорост на разливане $0,9\text{ m}/\text{min}$ и ниска интензивност на охлаждане (фигура 3.1.2.7) се наблюдава скорост на охлаждане $8,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ прилипса на прогряване на повърхността.

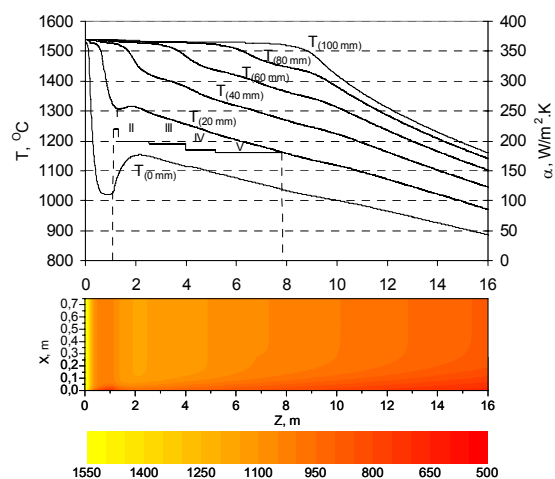
От получените резултати и представените фигури за изменението на температурата на повърхността се вижда, че определените коефициенти на топлоотдаване и области, които да бъдат охлаждани директно от охлаждащите струи подсигурават равномерно изменение на температура по повърхността (в напречна посока на движение на блока) без локални преохлаждания и прогрявания, и удовлетворяват наложените по-горе ограничения.

От фигури 3.1.2.3 и 3.1.2.7 се вижда, че за установените режими на охлаждане блока напуска ЗВО без прогряване на повърхността. Тези режими са в съответствие с наложените по-горе ограничения.

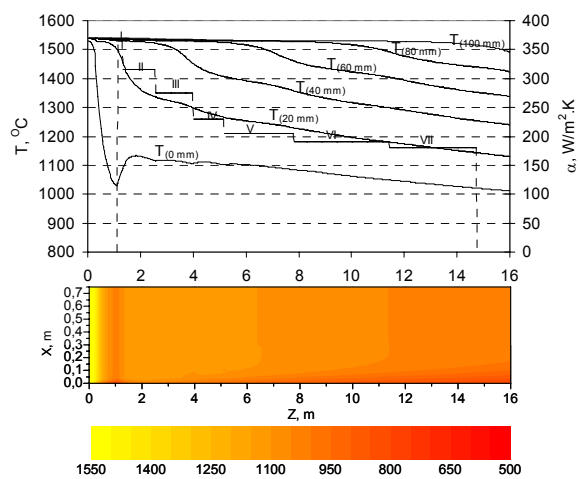
Температурното разпределение по повърхността на блока при скорости на разливане $0,5\text{ m}/\text{min}$, $0,7\text{ m}/\text{min}$ и $0,9\text{ m}/\text{min}$ е представено на фигура 3.1.2.11.

Паралелно със споменатите до момента резултати е следено и изменението на дебелината на кората и края на процеса на кристализация на блока. От изследването е установено, че при увеличаване на скоростта на разливане от $0,5$ до $0,7\text{ m}/\text{min}$ дължината на течната фаза се увеличава с 39%, а при увеличаване до $0,9$ с 84%.

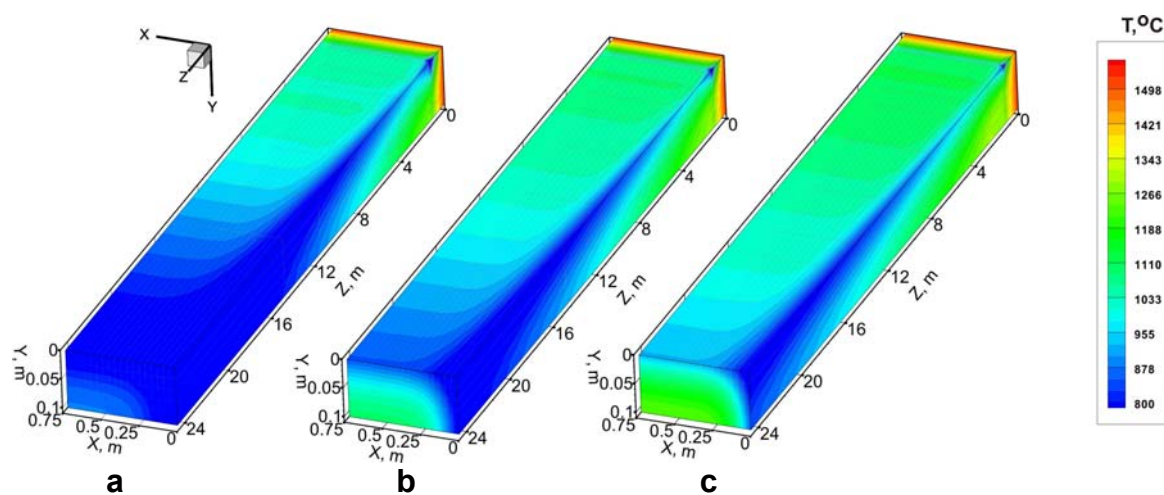
Температурното разпределение в кристализирания метал (без течната фаза) и дълбочината на проникване на течната фаза за $\frac{1}{4}$ от обема на блока е представено на фигура 3.1.2.12, а температурното разпределение в кристализирания метал за $\frac{1}{4}$ от обема на блока е представено на фигура 3.1.2.13.



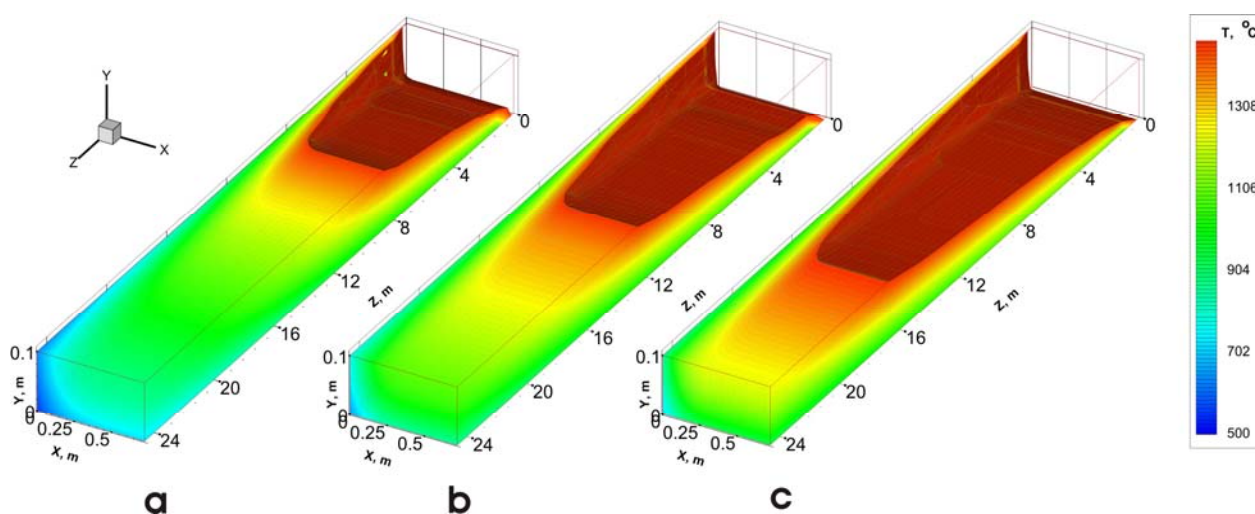
Фигура 3.1.2.3.



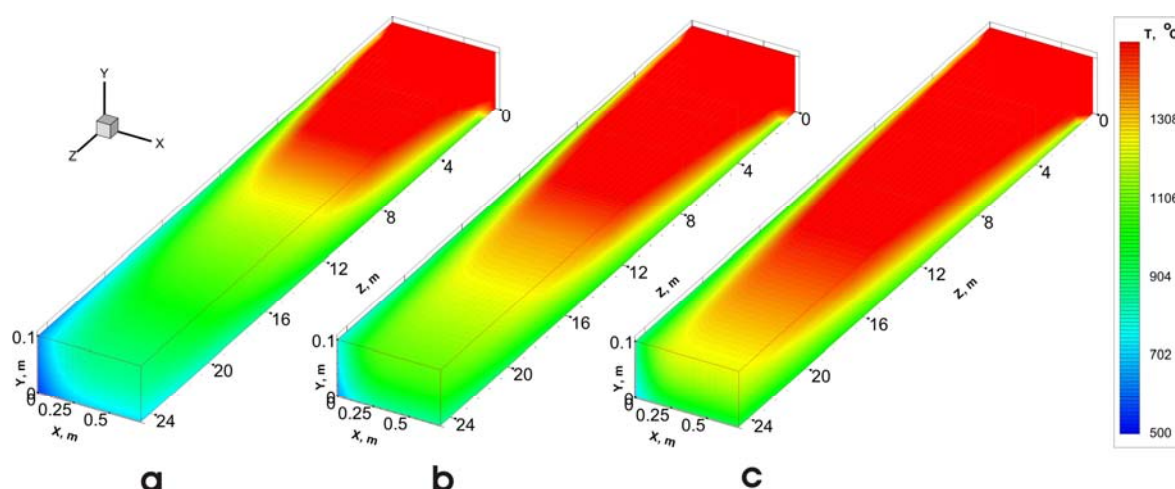
Фигура 3.1.2.7.



Фигура 3.1.2.11.
0,5 m/min- **a**, 0,7 m/min – **b**, 0,9 m/min – **c**.



Фигура 3.1.2.12. Разпределение на температурите в твърдата фаза за 1/4 от обема на блока при скорости на разливане:
0,5 m/min- **a**, 0,7 m/min – **b**, 0,9 m/min – **c**.



Фигура 3.1.2.13. Разпределение на температурите в 1/4 от обема на блока при скорости на разливане : **a**- 0,5 m/min; **b**- 0,7 m/min; **c**- 0,9 m/min и висока интензивност на охлаждане.

В резултат на проведените изследвания може да бъде препоръчано интензивността на охлаждане в отделните зони да бъде съгласно преставените в таблица 3.1.2.2 стойности.

От таблицата се вижда, че с увеличаване на скоростта на изтегляне стойностите на коефициентите на топлоотдаване, които характеризират режимите с висока и ниска интензивност се изменят във все по-тесни граници, като при скорости 0,7 и 0,9 m/min, те практически се свеждат до един режим, който трябва да бъде спазван.

Таблица 3.1.2.2. Обобщение на получените резултати за параметрите на охлаждане.

Зона	α [W/m ² .K]					
	V = 0,5 m/min		V = 0,7 m/min		V = 0,9 m/min	
	α_H	α_B	α_H	α_B	α_H	α_B
	220	365	340	370	365	370
II	200	280	300	300	315	320
III	195	250	260	260	275	275
IV	185	190	220	230	230	230
V	180	180	190	190	205	205
VI	-	-	-	-	190	190

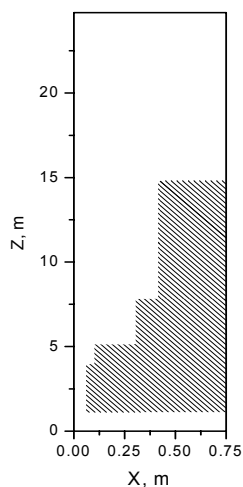
Определените области от повърхността на блока, които трябва да бъдат покривани директно от охлаждащите струи за подsigуряване на оптималните условия на охлаждане са визуализирани на фигура 3.1.2.14.

Температурно разпределение по напречното сечение на метала на изхода от МНРС при трите разгледани скорости на разливане е представено на фигура 3.1.2.15.

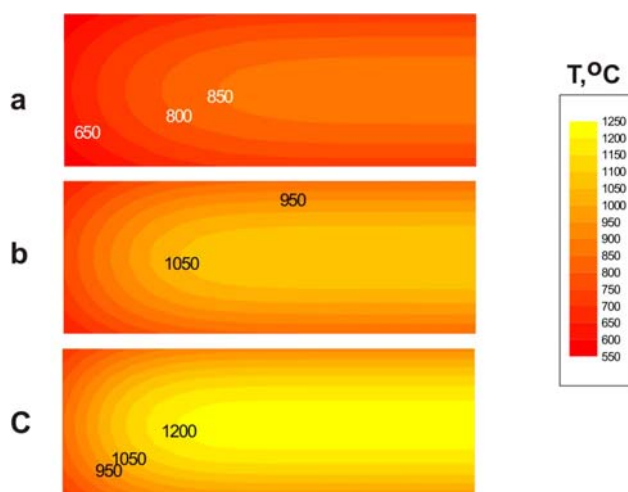
Средномасовата температура ($T_{сс}$) на изхода от МНРС в зависимост от скоростта на изтегляне са представени в таблица 3.1.2.3. В тази таблица е представена информация за средното топлосъдържание ($Q_{сс}$) в абсолютни единици и като процент от началното топлосъдържание ($I_{сс}$). Тези стойности са визуализирани на фигура 3.1.2.16.

От таблица 3.1.2.3. се вижда, че на изхода от машината за непрекъснато разливане на стоманата в зависимост от скоростта на разливане средномасовата температура е в границите на 850°C до 1150°C, а

топлосъдържанието на метала е 590 до 790 kJ/kg, което е 44 до 58 % от началното за процеса на разливане.



Фигура 3.1.2.14.



Фигура 3.1.2.15. Температурно разпределение по напречното сечение на метала на изхода от МНРС: **a**- 0,5 m/min; **b**- 0,7 m/min; **c**- 0,9 m/min.

Таблица 3.1.2.3. Средномасова температура и средно топлосъдържание на метала на изхода от МНРС.

V, m/min	T _{ср} , °C	Q _{ср} , kJ/kg	I _{ср} , %
0,5	854	593,38	44,05
0,6	944	653,46	48,51
0,7	1045	719,99	53,45
0,8	1102	757,48	56,23
0,9	1149	788,57	58,54

Получените резултати могат да бъдат използвани като начално температурно състояние на метала при изследване на топлинното състояние на блоковете при транспортирането им и престоя в прокатния цех.

3.2. Изследване на процесите на охлаждане и температурното състояние на метала при транспортиране на блоковете от машината за непрекъснато разливане до печите за преддеформационно нагряване

За определянето на оптималните режими на нагряване (подсигуряващи качествено нагряване на блоковете и минимален разход на енергия) в нагревателните печи е необходимо познаването на температурното поле на всеки един от тях от изхода на машината за непрекъснато разливане до зареждането му в нагревателните печи в зависимост от вида на транспортните операции, с отчитане конкретното му местоположение при нареждането на блоковете един върху друг при товарене за транспорт, по време на транспорта и след разтоварването им в прокатните цехове.

За определяне на температурното разпределение в обема на блоковете и провеждане на оценка на топлинното им състояние е разработен математичен модел, описващ процесите на топлообмен при престой и транспортиране на метала от машината за непрекъснато разливане на стоманата до печите за преддеформационно нагряване. Математичния модел (описан в глава 2.2.) отчита топлинното и температурно състояние на всеки отделен момент от времето по хода на транспортните операции. Като възможности за престой на блоковете в прокатния цех са предвидени два варианта на престой на блоковете, подредени един върху друг:

- о на открито в цеха;
- о в термоизолирана камера.

При описания на условията на топлообмен по време на транспорт са отчетени следните транспортни операции:

- транспортиране на блоковете от машината за газово рязане;
- складиране и подреждане;
- товарене на ж.п. вагони, при което блоковете се пренареждат;
- транспортиране;
- разтоварване и престой на склад на открито или в топлоизолационни камери, при което блоковете отново се пренареждат;
- зареждане на блоковете в нагревателните печи.

Изследването със създадения за целта изчислителен алгоритъм е проведено при отчитане на температурните полета по напречното сечение на блоковете на изхода от СМНРС при скорости на изтегляне на блока и средни температури, съгласно представените в таблица 3.2.1

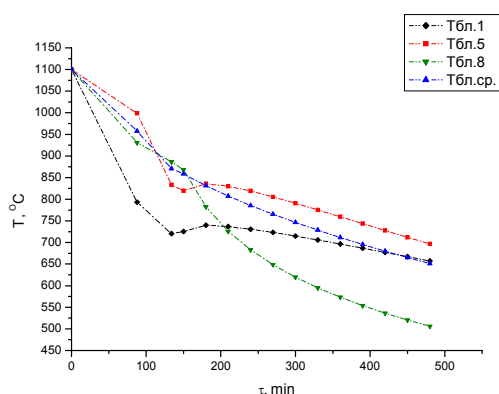
Таблица 3.2.1. Средна температура на метала на изхода от СМНРС при съответните скорости на разливане.

V, m/min	T _{ср} , °C
0,7	1045
0,8	1102
0,9	1149

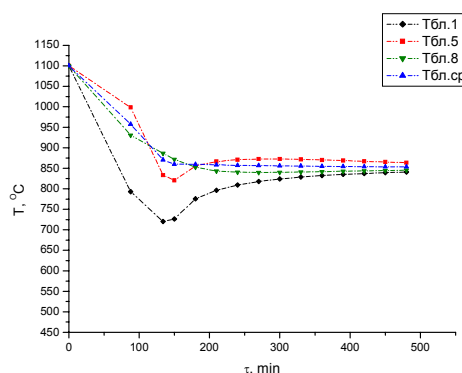
При проведените изчисления са получени резултати за температурното състояние на блоковете, топлосъдържанието им и остатъчната топлина в зависимост от начина на съхранение в прокатния цех.

Изменението на средната температура на първия, петия и осмия блок и средната температура на целия щабел в зависимост от времето при вариант на съхранение в прокатния цех на открит щабел за температурното поле на изхода от СМНРС, характерно за скорост на разливане $V=0,8\text{m/min}$ са представени на фигура 3.2.1. Резултатите за температурното разпределение при престой в термоизолирана камера са представени на фигура 3.2.2.

От фигурата се вижда, че по пътя до прокатния цех (с приблизително времетраене 150 min) блоковете се охлаждат с 340°C до 860°C . По време на престой от 80 min на открит щабел в цеха (330 min след края на разливането) средномасовата температурата на щабела продължава да намалява до стойности 728°C , а при 330 min престой в цеха температурата достига до 651°C . При тази средномасова температура средното топлосъдържание на блоковете в щабела е 394 kJ/kg , което е 29% от началното топлосъдържание на метала при разливането му в МНРС. Средната температура на блоковете на шестия час след разливането е съответно 657°C за първия, 696°C – за петия и 506°C за осмия, което показва, че максималната разлика между средната температура на блоковете е 190°C .



Фиг. 3.2.1.



Фигура 3.2.2.

В прокатния цех, блоковете които няма да бъдат заредени веднага в нагревателните пещи, могат да бъдат складирали в топлоизолирани камери вместо да престояват на открито. При такъв вариант на изпълнение топлинните загуби са по-малки и температурата на зареждане в пещите е по-висока.

От фигурата се вижда, че по време на транспорт до прокатния цех (с приблизително времетраене 150 min) средната температура на щабела се изменя от 1100°C в описаните по-горе граници, тъй като независимо от начина на съхранение в прокатния цех, условията за транспортиране са еднакви. По време на престой от 80 min в термоизолираната камера в цеха (330 min след края на разливането) средната температурата на щабела продължава да намалява до стойности 855°C , а при 330 min престой в цеха, температурата достига до 848°C , т.е. намалява незначително. При тази средна температура средното топлосъдържание на блоковете в щабела е 584 kJ/kg , което е 44% от

началното топлосъдържание на метала при разливането му в МНРС. Тези цифри недвусмислено показват възможностите за съхранение на топлината на блоковете при използване на топлоизолирани камери.

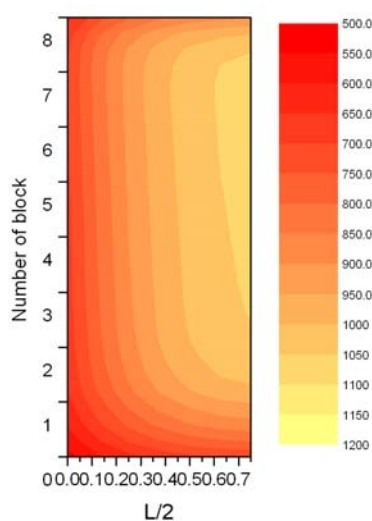
Средната температура на блоковете на шестия час след разливането е съответно 840°C за първия, 863 °C – за петия и 845 °C за осмия, т.е. максималната температурна разлика е 23°C, което показва, че при дълъг престой използването на топлоизолираните камери подsigурява както съхраняване на топлината на блоковете, така и еднакво топлинно състояние, което е от важно значение при разработването на режимите на нагряване на метала.

Температурното разпределение за $\frac{1}{2}$ от напречното сечение на блоковете, подредени на щабел за различни моменти от време при начално температурно поле, характерно за изхода от МНРС при скорост на разливане $V=0,7\text{m/min}$ е представено фигура 3.2.3. На фигурите с индекси **a** са означени температурните полета при престой на открито, а с **b** при престой в термоизолирана камера.

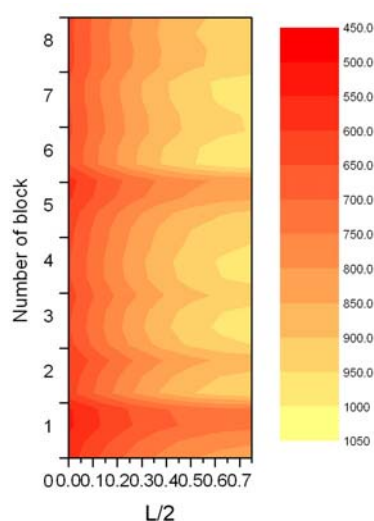
Изменението на средната температура на щабела при транспорт и престой в прокатния цех е представено на фигура 3.2.6.

От фигурата се вижда, че средната температура на блоковете при престой в термоизолираната камера е 848°C при съответната за това време на престой от 651 °C на щабела на открито, което е с приблизително 200 °C по-високо или с 195 kJ/kg по-високо топлосъдържание.

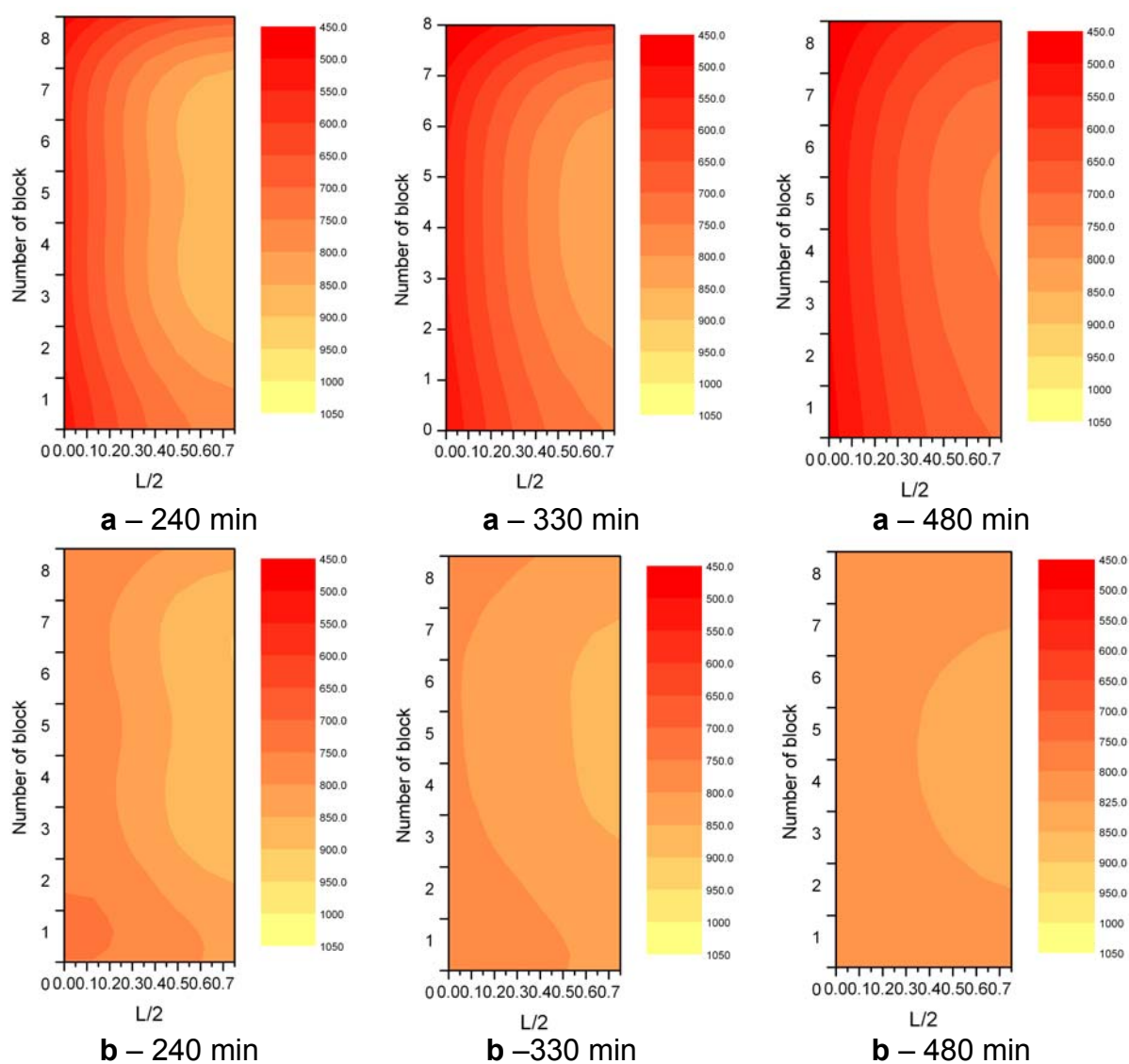
Получените резултати при проведеното изследване при престой на блоковете на открит щабел са обобщени в таблица 3.2.1. От таблицата се вижда, че в зависимост от скоростта на разливане и съответстващата им средна температура на 150 min след края на разливането средното топлосъдържание на щабела е 43-46% от началното топлосъдържание, на 330 min то е в границите на 33 до 37%, а при 480min-28-30%.



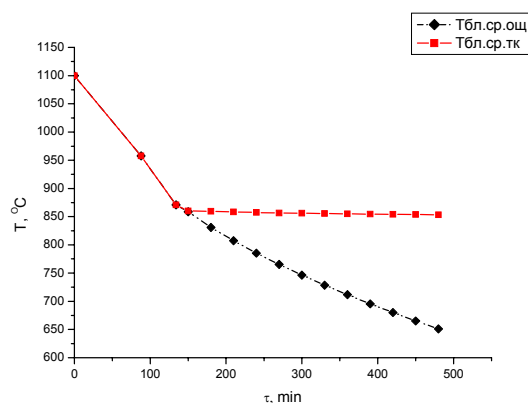
Фигура 3.2.3. **a** и **b** – 90min



Фигура 3.2.3. **a** и **b** – 150min



Фиг. 3.2.3. Температурно разпределение по напречното сечение на блоковете за различни моменти от време при начална средна температура на щабела 1050°C .



Фиг. 3.2.6. Изменение на средната температура на щабела в зависимост от времето при престой на открит щабел и в теплоизолирана камера.

Таблица 3.2.1.

	Време след края на разливането на МНРС								
	$\tau=150$ min			$\tau=330$ min			$\tau=480$ min		
Тсс, °C	Т, °C	Qcc, kJ/kg	Icc, %	Т, °C	Qcc, kJ/kg	Icc, %	Т, °C	Qcc, kJ/kg	Icc, %
1050	830	577	43	707	442	33	633	380	28
1100	860	590	45	728	466	35	651	394	29
1150	890	618	46	748	490	37	667	407	30

Аналогични резултати, получени и за вариант на престой на щабела в термоизолирана камера са представени в таблица 3.2.2. От таблицата се вижда, че на 150 min след края на разливането топлосъдържанието е аналогично на това от случая за открит щабел, тъй като до този момент блоковете се транспортират до прокатния цех и непосредствено след като са разтоварени там. На 330 min след края на разливането средното топлосъдържание на блоковете е 43%-46%, като до 480 min след разливането охлаждането е пренебрежимо.

Таблица 3.2.2.

	Време след края на разливането на МНРС								
	$\tau=150$ min			$\tau=330$ min			$\tau=480$ min		
Тсс, °C	Т, °C	Qcc, kJ/kg	Icc, %	Т, °C	Qcc, kJ/kg	Icc, %	Т, °C	Qcc, kJ/kg	Icc, %
1050	830	577	43	829	576	43	827	574	43
1100	860	590	45	855	594	45	848	589	44
1150	890	618	46	880	612	46	878	610	46

Получените резултати за температурното поле и топлинното състояние на блоковете при транспортирането им и престой в прокатния цех могат да бъдат разглеждани като начални условия при определяне на оптималните режими на преддеформационно нагряване.

Получените резултати могат да бъдат използвани за провеждане на предварителна икономическа оценка за ефективността от прилагането на „горещо зареждане“, на базата на която да бъде избрана подходящата технология, отчитаща начините на транспорт и съхранение на блоковете, съобразена с конкретните производствени условия.

3.3. Изследване на температурното състояние на метала при преддеформационно нагряване

За успешното реализиране на метода на „горещо зареждане“ е необходимо установяване на количествени зависимости между температурата на заредения метал, темпа на валцуване, респ. средната производителност, разхода на гориво и количеството на обгара. На базата на резултатите от такова изследване може да се направи количествена оценка за ефективността от разработването на технология за работа с горещо заредени блокове.

За реализация на технология за „горещо зареждане“ и управление на производствения процес е създаден математичен модел на нагряването на метала за определяне на температурните режими в зависимост от:

- местоположението на отделните блокове в работното пространство;
- температурното им състояние;
- химичния състав на метала;
- размерите и
- времето, в което трябва да напуснат пещта.

За провеждане на изследването е разработен и реализиран изчислителен алгоритъм, позволяващ определяне на топлинните и температурни режими на нагряване на метала, при отчитане на описаните по-горе изисквания. Изчислителния алгоритъм предвижда определяне на температурното поле на метала съгласно математичния модел, описан в глава 2.3.

За описание на външния топлообмен е използван зонален метод, позволяващ определянето на резултатните топлинни потоци, които са зададени като гранични условия за решаване на уравнение (2.2.1).

Създадения математичен модел може да бъде използван в два режима:

- о за определяне на температурните режими на нагряване при равномерен темп на валцуване;
- о в on-line режим за установяване на минималния разход на гориво при променлив темп на валцуване и променлива температура на зареждания метал при спазване на условията за качеството на нагряваните блокове. За този случай са предвидени и съответните оптимизационни процедури.

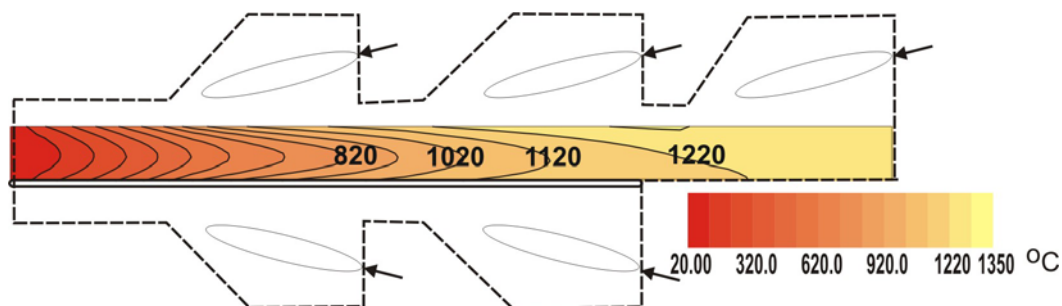
Числената реализация на описания по-горе алгоритъм позволява да бъдат определени оптималните режими на нагряване при съответните начални условия. На базата на изчисления разход на енергия за реализация на тези режими, при гарантирано качество на нагряването, може да бъде направена оценка за ефективността от прилагането на тази технология. Определени са:

- Температурите на газа по нагревателни зони.
- Относителния разход на топлина.
- Разхода на гориво по нагревателни зони.
- Температурата на топлинната изолация по нагревателни зони.
- Средните температури на метала на определени позиции в пещта.
- Температурното поле в блоковете.

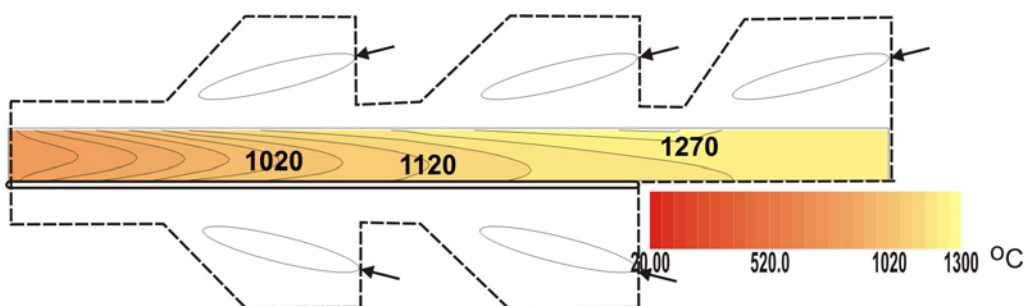
Резултатите от проведените изчисления са представени в таблици в приложенията към дисертационния труд.

На фигури 3.3.1 и 3.3.2 за илюстрация са представени резултати от симулационни изследвания с помощта на описания алгоритъм за температурното поле на блоковете по дължината нагревателна пещ с тласкач за два гранични варианта за температурата на метала при зареждането - 20^oC и 800^oC. Пещта има размери 29 m x 8,7 m и се състои от четири зони: методична, два броя високотемпературни нагревателни зони и изравнителна зона, в която нагряването е едностранно. Размерите на блоковете са 0,2m x 1,0m x 7,5m.

От фигурите се вижда, че в резултат на по-ниските температури в долните технологични зони, дължащи се на водоохлаждаемите елементи и ограниченията, наложени от технологията на нагряване, свързана с намаляване на количеството на окисления метал по долната повърхност на блоковете, нагряването е несиметрично, като температурата на горната повърхност е по-висока от тази по долната.



Фигура 3.3.1. Температурно разпределение по напречното сечение на блоковете по дължина на пещта при $T_{ар}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



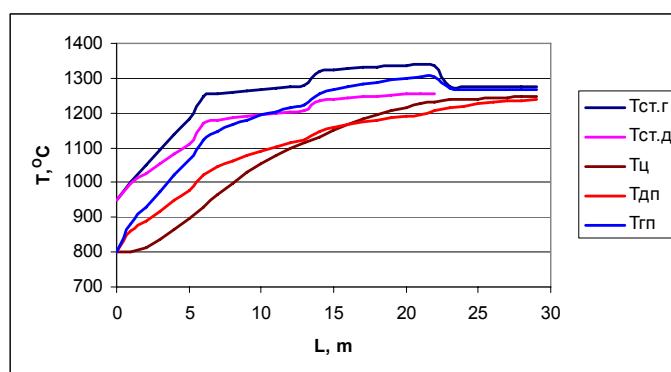
Фигура 3.3.2. Температурно разпределение по напречното сечение на блоковете по дължина на пещта при $T_{ар}=800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температурните полета по дължина на пещта при производителности 150t/h, 130 t/h, 110t/h, 90 t/h и 70 t/h и средни температури на зареждане 800°C , 600°C , 400°C , 200°C и 20°C са представени в Приложение 3.

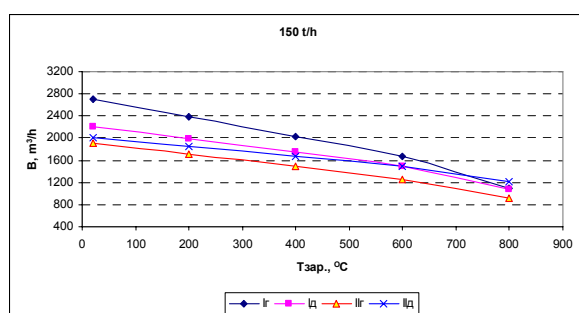
Получените стойности за температурния профил по дължина на пещта за температурата на стените в горната($T_{ст.г}$) и долна($T_{ст.д}$) отопляема зона и горната ($T_{гп}$) и долна повърхност($T_{дп}$) и центъра($T_{ц}$) на блока за производителност 150 t/h и средна температура на зареждане на метала в пещта $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ е представено на фигура 3.3.3.

Резултатите за разхода на газ по зони при различните производителности на пещта G в зависимост от средната температура на зареждане на метала са представени на фигури 3.3.4. и 3.3.8, където с Iг и Id са обозначени първа горна и долна нагревателна зона на пещта, IIг и IIд – съответно втора горна и долна нагревателна зона и IIIг – изравнителната нагревателна зона на пещта.

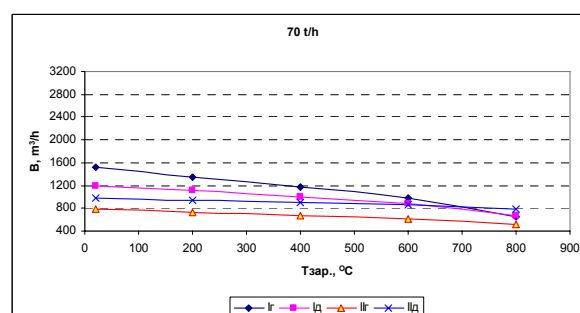
Получените резултати за температурните режими на нагряване при различни средни температури на зареждане на метала като функция от производителности на пещта G са представени на фигури 3.3.9. и 3.3.13, където с Iг и Id са обозначени първа горна и долна нагревателна зона на пещта, IIг и IIд – съответно втора горна и долна нагревателна зона и IIIг – изравнителната нагревателна зона на пещта.



Фигура 3.3.3.



Фигура 3.3.4.



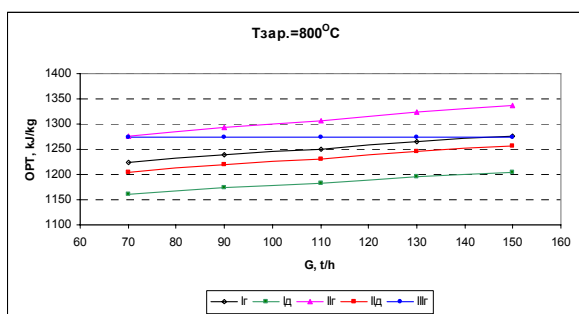
Фигура 3.3.8.

Специфичният разход на топлина ОПТ при нагряване на блоковете в зависимост от производителността G и температурата на зареждане $T_{зар}$ са визуализирани на фигура 3.3.14.

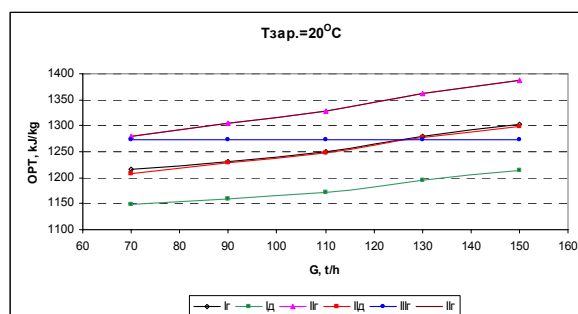
Анализът на получените резултати показва, че разходът на енергия при производителност 150 t/h може да бъде намален от 1985 kJ/kg при температура на зареждане 20 °C до 1334 kJ/kg за 600 °C и 973 kJ/kg за 800 °C, което представлява съответно 33 и 51% икономия. Аналогични стойности се получават и при производителност от 130 t/h. Прилагането на горещо зареждане при ниски производителности от 70 t/h на печта довежда до икономия на енергия до 33%.

С помощта на разработения математичен модел е проведено допълнително изследване за установяване на възможностите за повишаване на производителността на печта. За целта е извършена адаптация на математичния модел. Получените резултати са представени в табличен вид в Приложение 4. Анализът на резултатите показва, че производителността би могла да бъде повишена до 210 t/h, при която температурата във втора горна зона трябва да бъде повишена до 1375 °C. При по-високата производителност за провеждане на процеса на нагряване е необходимо прилагане на високи температури, при които съществува реална опасност от затапяне и прегаряне на повърхността на метала. Поради тази причина по-висока производителност от 210 t/h не се препоръчва.

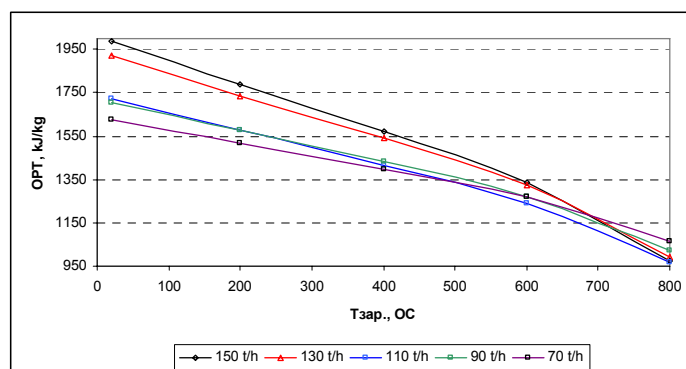
Резултатите от работата на математичния модел позволяват да бъде оптимизиран броя на работещите нагревателни печи със съответните режими на нагряване и производителности в зависимост от степента на синхронизиране на работата на машината за непрекъснато разливане с валцовия стан.



Фигура 3.3.9.



Фигура 3.3.13.



Фигура 3.3.14.

Разработения алгоритъм за изчисление с помощта на създадения математичен модел на нагряването на метала в пещите за преддеформационно нагряване при зададена часова производителност на прокатния стан, асортимент, температури на зареждане и на изваждане на нагрявания метал и регламентирани престои на стана позволява да бъдат изчислени температурните и топлинни режими на пещите, осигуряващи нагряване с минимални разходи и позволява да бъде направена оценка на експлоатационните разходи и необходимите капиталовложения.

3.4. Разработване на технология за управление на комплекса „непрекъснато разливане – прокатен стан”

Представените от различните изследвания резултати недвусмислено показват ползата от организиране на горещо зареждане, ефективната реализация на което е свързана с разработване на система за съгласуване на производствените операции между машината за непрекъснато разливане, нагревателните пещи и валцовия стан и управление на процесите, гарантиращо получаване на качествена продукция с минимални разходи.

Това наложи описаните до момента математични модели с техните изчислителни алгоритми да бъдат обединени в един общ алгоритъм, който по своята същност представлява технология за управление на комплекса „непрекъснато разливане – прокатен стан”, динамично съгласуваща работата на отделните агрегати с действителните условия на производството в реално време.

Работата на този алгоритъм позволява проследяване на топлинното състояние на отделните блокове от началото на кристализацията му в МНРС

до излизането му от пещите за преддеформационно нагряване с отчитане на конкретното му местоположение във всеки момент от времето.

Изчислителния алгоритъм включва:

- определяне на оптимални режими на охлаждане и температурното и топлинно състояние на блока в МНРС;
- определяне на температурното и топлинно състояние на всеки блок по време на транспортните операции и престой в прокатния цех в зависимост от конкретното му местоположение и начин на съхранение до началото на преддеформационното нагряване;
- определяне на оптималните режими на преддеформационно нагряване в зависимост от температурата на зареждане, производителността и производствената програма на стана и организацията на работа на целия комплекс с отчитане на предстоящите престои и реалната и необходима производителност на отделните агрегати от общия технологичен цикъл.

Получени основни резултати, изводи и заключения

С помощта на разработените математични модели е симулирано охлаждането на блоковете от формирането им в машината за непрекъснато разливане на стоманата до горещото им валцуване. Получени са резултати за оптималните режими на охлаждане при непрекъснато разливане, гарантиращи получаването на бездефектна продукция. На базата на температурното разпределение в обема на блоковете на изхода от МНРС е направена оценка на остатъчното топлосъдържание на блоковете в зависимост от скоростта на разливане. Получените резултати за температурното разпределение на изхода от МНРС са използвани като входни данни за изследване на охлаждането на блоковете по време на транспорт и престой в прокатния цех. За целта с разработения математичен модел е проследено температурното състояние на всеки отделен блок в зависимост от конкретното му разположение в щабела, времената на транспорт и престой и начините на съхранение на метала преди зареждане в нагревателните пещи. Получено е температурното разпределение на напречното сечение на блоковете и е направена оценка на остатъчното топлосъдържание преди валцуване. Разгледани са два варианта на престой в прокатния цех - на открит щабел и в топлоизолирана камера. Получените резултати за температурното поле от този етап на изследването са използвани като входни данни за симулиране на процесите на преддеформационно нагряване с помощта на разработения за целта математичен модел. Получени са оптималните топлинни и температурни режими на нагряване. На базата на тези резултати е направена оценка на необходимия разход на енергия в зависимост от началната температура на метала и производителността на прокатния стан.

Получените резултати недвусмислено показват предимствата на „горещото зареждане“ пред класическите технологии на работа.

Разработените математични модели и обобщен алгоритъм могат да бъдат прилагани за предварителна оценка на ефективността от интегрирането на процесите на непрекъснато разливане с горещото валцуване при внедряване на „горещо зареждане“ в условията на подобни производства.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научни приноси

1. Разработени са два математични модела, описващи процесите на охлаждане и кристализация на метала в радиална блумова и криволинейна слябова машина за непрекъснато разливане на стоманата, позволяващи с помощта на оптимизационни процедури да бъдат определяни параметрите на охлаждащата система, гарантиращи получаването на качествени блокове.
2. Разработен е математичен модел, описващ процесите на топлообмен при престой и транспортиране на метала от машината за непрекъснато разливане на стоманата до пещите за преддеформационно нагряване, отчитащ топлинното и температурно състояние на всеки блок във всеки момент от времето по хода на транспортните операции в зависимост от конкретното им местоположение в щабела.
3. Разработен е математичен модел на преддеформационното нагряване на метала за определяне на оптималните топлинни и температурни режими на нагряване в зависимост от температурното поле на блоковете на входа на пещта, размерите им, химичния състав на метала и оставащото време за нагряване.

Научно-приложни и приложни приноси

1. Разработени са процедури за определяне на оптималните параметри на охлаждане на метала в процеса на непрекъснато разливане, гарантиращи получаването на блокове с високо качество и без дефекти при спазване на ограничения по отношение на скоростта на охлаждане, температурата на прогряване повърхността на блока след излизане от ЗВО, завършването на кристализацията в областта на контролируемото охлаждане на ЗВО и областите от повърхността на блока, които трябва да бъдат покривани директно от охлаждащите струи.
2. Разработените математични модели на процесите на кристализация и топлообмен в МНРС и получените резултати за параметрите на охлаждащата система могат да бъдат приложени за управление на процесите на охлаждане и аранжиране на охлаждащата система в зависимост от характеристиките на използваните дюзи.
3. Установено е, че при увеличаване на скоростта на разливане от 0,5 до 0,9 m/min дължината на течната фаза се увеличава с 84%, при което за конкретните конструкции на изхода от блумовата машина за непрекъснато разливане на стоманата, топлосъдържанието на метала се изменя в границите на 48 до 59%, като за слябовата МНРС тези стойности са 44 до 58 % от началното топлосъдържание на стоманата.

4. Изследвано е температурното разпределение в обема на блокове по време на транспортиране и престой в склада на прокатното производство. Направена е оценка на топлинното състояние на блоковете и остатъчното топлосъдържание, което може да бъде оползотворено при „горещо зареждане“ в нагревателните пещи. Установено е, че при дълъг престой средната температура на щабела в термоизолационната камера е по-висока с 200 °C в сравнение с тази при престой на открито, при което топлосъдържанието е по-високо с 195 kJ/kg или с 15%.
5. Разработени са температурни режими на нагряване на блоковете в нагревателните пещи, в зависимост от производителността на пещта и началното топлинно и температурно състояние на метала.
6. На базата на разработените математични модели на кристализацията и охлаждането на метала в машината за непрекъснато разливане на стоманата, на охлаждането на блоковете при транспортирането им до прокатния цех, с отчитане на вариантите на престой преди нагряване и математичния модел на нагряване на метала в нагревателните пещи с техните изчислителни алгоритми е изграден един общ алгоритъм, представляващ технология за управление на комплекса „непрекъснато разливане – прокатен стан“, динамично съгласуващ работата на отделните агрегати с действителните условия на производството в реално време.
7. Получените резултати от математичния модел, описващ процесите на топлообмен при престой и транспортиране на метала от машината за непрекъснато разливане на стоманата до пещите за преддеформационно нагряване, могат да бъдат използвани за провеждане на предварителна икономическа оценка за ефективността от прилагането на „горещо зареждане“, на базата на която да бъде избрана подходящата технология, отчитаща начините на транспорт и съхранение на блоковете, съобразена с конкретните производствени условия.
8. Установено е, че при въвеждане на организация на „горещо зареждане“ на блоковете в нагревателните пещи, в зависимост от производителността на пещта и нивото на съгласуване на работата на агрегатите от целия технологичен поток при преддеформационно нагряване икономията на енергия може да достигне до 51%.
9. Разработените модели може да бъдат прилагани за провеждане на анализи и да бъдат използвани като симулатори за студентите, обучавани в областта на металургията и материалознанието.

**СПИСЪК
на научните публикации
инж. Мария Иванова**

Публикации

1. Михайлов Ем., В. Петков, А. Велчев, М. Иванова, Диагностика на състоянието на огнеупорната изолация на високотемпературно оборудване, Научни известия на НТСМ, ISSN1310-3946, XVI, 1 (111) Юни 2009, 285-291.
2. Mihailov Em., V.Petkov, M.Ivanova, Determination of cooling parameters during continuous casting of blooms, Structural Integrity and Life, Vol. 10, No 3, 2010, pp.215-218.

Доклади

3. Михайлов Ем., А. Велчев, П. Попгеоргиев, М. Иванова, Изследване на възможностите за намаляване на топлинните загуби с водоохлаждаемия свод при електродъгови инсталации за извънпещно обработване на стоманата, Сборник доклади: "Развитие- бъдеще, перспективи и иновации в науката -2005", 23-24 юни, 2005
4. Михайлов Ем., А. Велчев, П. Попгеоргиев, М. Иванова, Термична ефективност на свръхмощна електродъгова пещ, Сборник доклади: X-та национална конференция по металургия с международно участие, Варна, ISBN 978-954-92052-1-3, 28-31 май, 2007 г.
5. Михайлов Ем., В. Петков, А. Велчев, М. Иванова, Топлинни и екологични аспекти на горещото зареждане на блоковете в нагревателните пещи, Научна конференция с международно участие "60 години катедра Физикохимия", София, 23 ноември 2007.
6. Mihailov Em., V.Petkov, A. Velchev, M.Ivanova, Thermal Efficiency Of Blocks' Hot Charging in Reheating Furnaces, V Congress of the Metallurgists of Macedonia, ISBN 978-9989-9571-4-7, Ohrid , Macedonia, 17-20 September, 2008.
7. Арангелова Г., Ем. Михайлов, В. Петков, М. Иванова, Диагностика на състоянието на огнеупорната изолация на стоманоразливна кофа, Научна сесия на ХТМУ, 19 май, 2010