

УДК 621.771:004.18

Смирнов Е. Н.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО БЛЮМА 335 × 400 ММ ПРИ РЕДУЦИРОВАНИИ НА СТАДИИ НЕПОЛНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

При постоянном ужесточении требований к качеству сортового проката из непрерывнолитого слитка необходимо обеспечить однородность его макроструктуры, особенно из легированных марок сталей. Вместе с тем, фактически любое из внедряющихся в настоящее время технических или технологических новшеств, направленных на уменьшение осевой ликвации и пористости в непрерывнолитом слитке, создает не только все предпосылки для ликвации структурных несовершенств металла, но и в известной мере позволяет управлять формированием структуры и свойств конечной металлопродукции.

В общем случае, технология деформирования непрерывнолитых блюмов на стадии неполной кристаллизации позиционируется как комплексный процесс. При этом крайняя наукоемкость рассматриваемой технологии обуславливает необходимость использования при ее разработке данных полученных как методами математического [1–4], так и физического моделирования [5, 6]. Однако, наиболее ценными представляются те из них, которые были получены в результате комплексного исследования методами моделирования (физического и математического) одного и того же объекта. Вместе с тем, в литературных источниках, в большинстве случаев, приводятся результаты исследований, полученные только одним из методов.

Целью работы являются исследование деформированного состояния непрерывнолитого блюма при редуцировании на стадии неполной кристаллизации методами математического моделирования.

В работах [7–10] представлены результаты исследования процесса деформирования непрерывнолитого блюма сечением 335 × 400 мм с использованием экспериментальных методов механики деформируемого твердого тела. В рамках дальнейшего расширения программы всестороннего изучения вышеназванного процесса, выполнено расчётно-аналитическое исследование напряжённо-деформированного состояния (НДС) непрерывнолитых блюмов, возникающего при их деформировании на стадии неполной кристаллизации. Задача реализована в двухмерной контактной упругопластической постановке по модели Прандтля-Райса с использованием программного комплекса «ANSYS» методом конечных элементов. В расчётах учитывали зависимость механических свойств металла от температуры, возникающие температурные градиенты по сечению закристаллизовавшейся составляющей слитка, а также возможное совместное деформирование закристаллизовавшейся составляющей слитка и редуцирующих валков. Учёт гидродинамического давления [11], действующего в противоположных направлениях с силами от внешнего деформационного воздействия, производили посредством задания соответствующих свойств жидко-твёрдой составляющей кристаллизующегося блюма.

С учётом вышеизложенных соображений и технологического оформления участка со вмещения непрерывной разливки с внешним деформационным воздействием [12], принята для расчётного исследования НДС блюмов совокупность исходных данных, которая приведена в табл. 1.

В ходе расчётного исследования оценивали влияние двух основных параметров процесса, оказывающих главенствующее влияние как на формируемое деформированное состояние в закристаллизовавшейся составляющей, так и на характер воздействия на осевую составляющую, находящуюся в жидко-твёрдом состоянии, а именно:

- величины разового абсолютного Δh_i или относительного ε_i обжатия блюма;
- дробность деформации или деформационный градиент, Q .

Таблица 1

Исходные данные к расчётному исследованию НДС блюма сечением 335 × 400 мм по клетям редуцирующего блока [12]

Марка стали	Технологические и конструктивные параметры			
	Скорость разливки V , м/мин	Металлургическая длина слитка L , м	Время кристаллизации τ , с	Температурный градиент в вертикально-продольной плоскости симметрии, θ
09Г2С (I группа)	0,9	13,5	900	0,235
	0,7	15,2	1300	0,248
	0,6	17,0	1700	0,288
А32 (I группа)	0,9	13,5	900	0,233
	0,7	15,2	1300	0,250
	0,6	17,0	1700	0,296
Ст 3 (II группа)	0,9	13,5	900	0,236
	0,7	15,2	1300	0,249
	0,6	17,0	1700	0,294
40Х (II группа)	0,9	13,5	900	0,239
	0,7	15,2	1300	0,255
	0,6	17,0	1700	0,280
70 (III группа)	0,9	13,0	900	0,219
	0,8	14,7	1100	0,228
	0,7	17,5	1500	0,243

Величину деформационного градиента определяли с использованием выражения:

$$Q = \frac{\Delta h_i - \Delta h_{i-1}}{\Delta L_{i-1,i}}, \quad (1)$$

где Δh_i – абсолютное единичное обжатие в i -ой клетке редуцирующего блока;

Δh_{i-1} – абсолютное единичное обжатие в $(i-1)$ -ой клетке редуцирующего блока;

$\Delta L_{i-1,i}$ – расстояние между $(i-1)$ -ой и i -ой клетками редуцирующего блока.

Введение величины Q является целесообразным по двум причинам.

Во-первых, данный критерий является интегральной характеристикой реализуемого процесса деформирования, поскольку позволяет учесть не только величину прикладываемого разового обжатия, но и особенности конструкции редуцирующего блока.

Во-вторых, с точки зрения сохранения целостности редуцируемой закристаллизовавшейся составляющей слитка (блюда или заготовки), по мнению авторов работы [2], величина разового обжатия валками играет более весомую роль, чем суммарная величина за весь процесс.

В качестве критерия, позволяющего оценить эффективность прикладываемого внешнего деформационного воздействия, была выбрана величина относительного перемещения фронтов кристаллизации ε_{np} :

$$\varepsilon_{np} = \frac{\Delta h_{\phi}}{H_{\phi l}}, \quad (2)$$

где Δh_{ϕ} – величина абсолютного перемещения фронтов кристаллизации;

$H_{\phi l}$ – высота сечения блюда.

На рис. 1 представлен вид конечно-элементной модели (КЭМ) поля деформаций в поперечном сечении блюда при приложении внешнего деформационного воздействия.

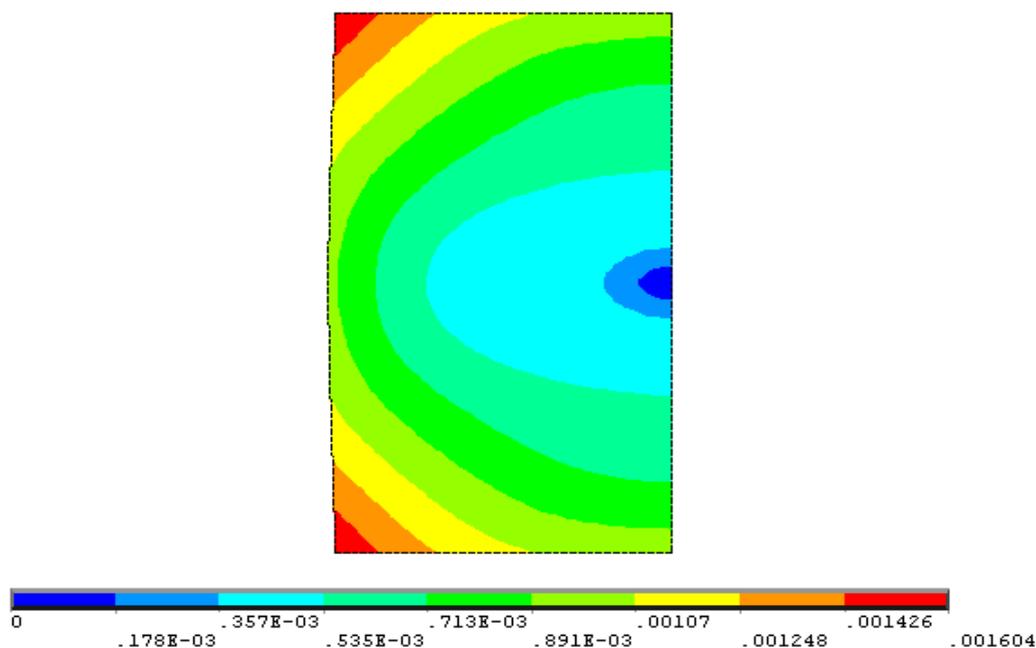


Рис. 1. Конечно-элементная модель поля деформаций в поперечном сечении непрерывнолитого бруса 335×400 мм:

$$\varepsilon = 0,3 \%; \theta = 0,243; \text{Ст } 70; V = 0,7 \text{ м/мин}; \tau = 1500 \text{ с}$$

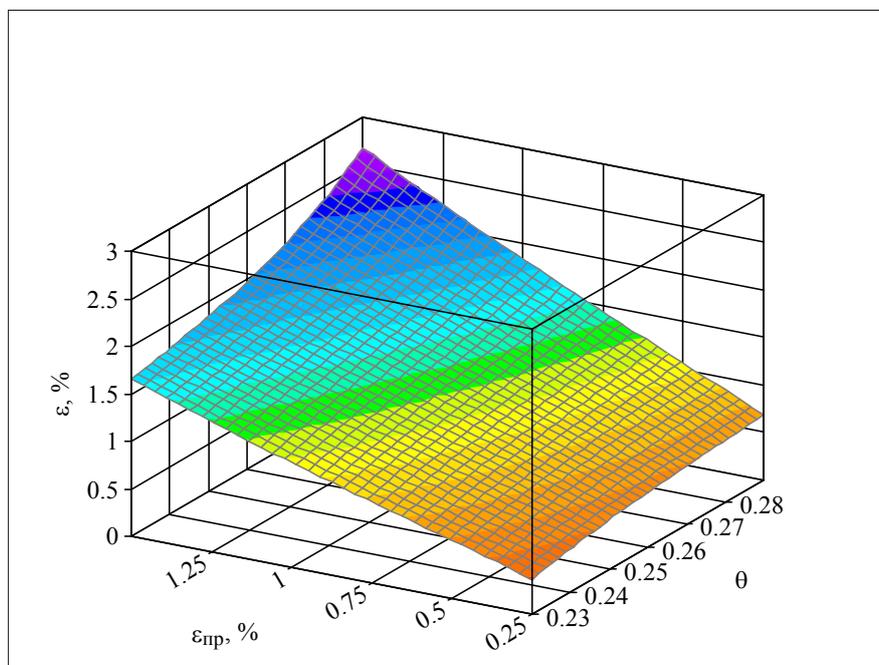
Анализ результатов выполненного расчётного исследования по оценке влияния технологических факторов процесса на параметр ε_{np} . (рис. 2) показывает, что перемещение фронтов кристаллизации, посредством которого характеризуется эффективность внешнего деформационного воздействия на жидко-твёрдую составляющую ε_{np} , составляет только часть от величины обжатия ε . Это обстоятельство обусловлено, с одной стороны, деформационными процессами в контактной зоне очага деформации под редуцирующими валками, а с другой – тем обстоятельством, что фактическая ширина жидко-твёрдой составляющей меньше ширины контактной поверхности.

Оценка влияния величины ε и θ на ε_{np} показывает, что весомость каждого из факторов достаточно высокая. В частности, при минимальных значениях θ , для достижения минимальной величины абсолютного перемещения фронтов кристаллизации (порядка 1,0 мм) величина обжатия должна быть увеличена в 1,6...1,7 раза для сталей всех групп. Вместе с тем, при достижении той же величины перемещения фронтов, но при максимальных значениях θ , увеличение обжатия для сталей I и II групп составляет 2,3...2,5 раза, а для сталей III группы – 2,0 раза. Для максимального значения исследованной величины перемещения фронтов кристаллизации, равной 5,0 мм, рассматриваемая зависимость характеризуется следующими значениями:

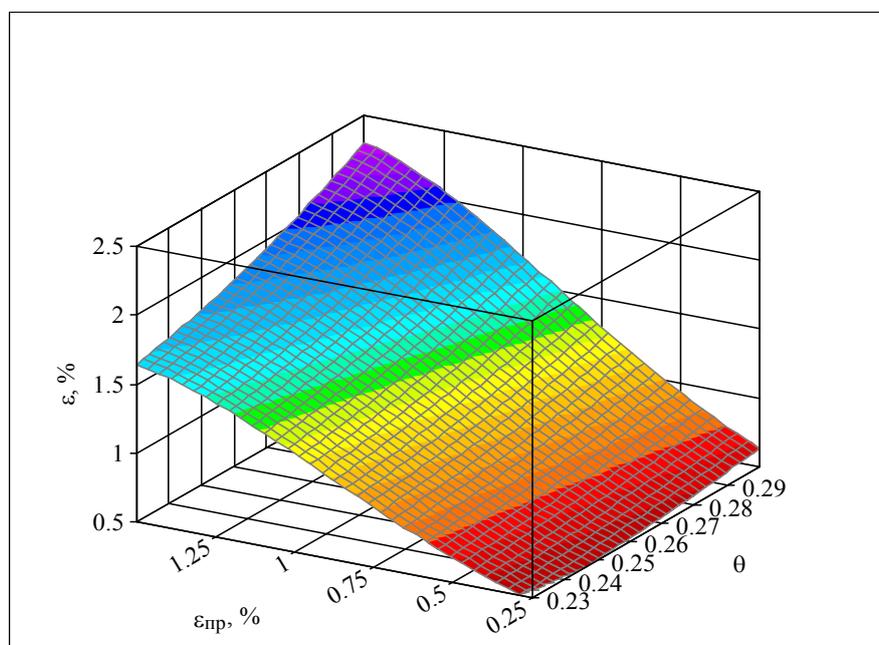
- при минимальных значениях θ увеличение обжатия составляет для сталей всех групп 1,12...1,2 раза;
- при максимальных значениях θ увеличение обжатия для сталей I и II групп составляет 1,42...1,74 раза, а для сталей III группы – 1,24 раза.

Выявленный характер влияния ε и θ на ε_{np} требует также и дополнительной оценки влияния характера распределения суммарного обжатия ε_{Σ} по клетям на величину Q (рис. 3). Приведенные данные показывают, что по мере удаления от начальной точки приложения внешнего деформационного воздействия, величина Q возрастает. При этом наиболее интенсивный рост наблюдается в последних клетях редуцирующего блока при стремлении достичь максимальной величины перемещения фронтов кристаллизации. В то же время,

анализ вида возникающих в этом случае КЭМ-моделей показал, что в областях металла, граничащих с жидко-твёрдой составляющей, наблюдается резкий рост интенсивности деформаций и напряжений, повышающий вероятность образования внутренних трещин в закристаллизовавшейся составляющей. Как показали исследования специалистов фирмы «CONCAST AG» [2], определение максимальных значений обжатий, при превышении которых деформационное воздействие приводит к образованию внутренних трещин, является сложной многофакторной задачей, технологически пригодное решение, которой возможно лишь посредством комплексных экспериментов.



а



б

Рис. 2. Изменение величины $\varepsilon_{пр}$ жидко-твёрдой составляющей непрерывнолитого бляма от величин ε и θ :
а – сталь 09Г2С; б – сталь А32

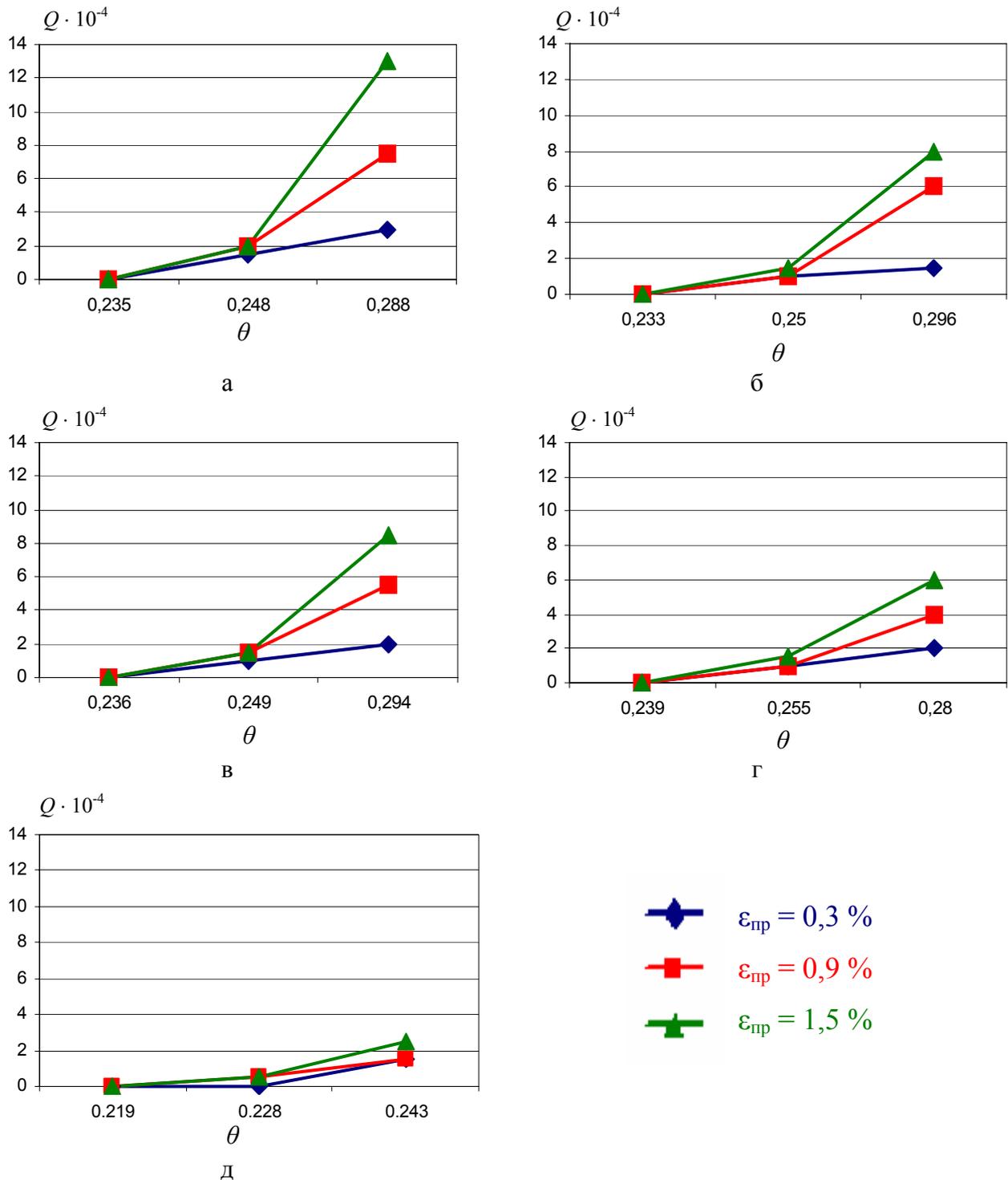


Рис. 3. Изменение величины Q по клетям редуцирующего блока:
а – сталь 09Г2С; б – сталь А32; в – сталь 3; г – сталь 40Х; д – сталь 70

Вместе с тем, анализ данных рис. 3 позволяет однозначно утверждать, что по мере роста в разливаемых марках стали величины напряжения течения σ_s , величина Q непрерывно уменьшается и достигает минимального значения при деформировании стали 70 (см. рис. 3, д). В этом случае распределение разовых относительных обжатий ε_i по клетям редуцирующего блока будет практически равномерным. В случае же деформирования непрерывнолитых блюмов из более пластичных сталей (см. рис. 3, а–в) возможен нарастающий режим приложения обжатий.

ВЫВОДЫ

Смоделированы условия деформирования непрерывнолитого блюма сечением 335×400 мм на стадии неполной кристаллизации и решены в двухмерной упругопластической постановке по модели Прандтля-Райса методом конечных элементов. На основании результатов расчетного исследования получили дальнейшее развитие представления о формировании деформированного состояния в блюмах сечением 335×400 мм в зависимости от геометрических характеристик закристаллизовавшейся составляющей, величины разового относительного обжатия ε , температурного θ и деформационного Q градиентов. Разработаны рекомендации по корректировке величин разовых обжатий с учетом особенностей протекновения деформации внутрь непрерывнолитого блюма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическая модель и расчёт параметров мягкого обжатия непрерывнолитых заготовок / Л. В. Буланов, Н. А. Юровский, Т. Г. Химич [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2003. – № 8. – С. 126–130.
2. Byrne C. Mechanical Soft reduction in billet casting / C. Byrne, C. Tercelli // *Steel Times International. Continuous casting*. – 2002. – October. – P. 37–40.
3. Математическое моделирование прокатки непрерывного слитка из стали ШХ 15 на стадии неполной кристаллизации его сердцевины / А. А. Миленин, Х. Дья, А. Б. Стеблов [и др.] // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 178–183.
4. Мазур И. П. Математическая модель упругопластического деформирования непрерывного слитка с жидкой сердцевиной / И. П. Мазур, В. В. Барышев, М. О. Седых // *Производство проката*. – 2002. – № 9. – С. 2–6.
5. Бринза В. В. Определение эффективных условий деформирования непрерывнолитых слябов с жидкой сердцевиной / В. В. Бринза // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 10. – С. 68–70.
6. Моделирование напряжённо-деформированного состояния при обжатии непрерывнолитого слитка в жидко-твёрдом состоянии / Е. Н. Смирнов, В. А. Скляр, А. П. Митьев [и др.] // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 162–169.
7. Белевитин В. А. Повышение точности и достоверности расчета параметров пластической деформации при прокатке / В. А. Белевитин, Е. Н. Смирнов // *Наук. пр. Донец. держ. техн. ун-ту. Сер. «Металлургия»*. – Донецьк : ДонНТУ, 2002. – Вып. 10 (141). – С. 47–52.
8. Смирнов Е. Н. Исследование деформированного состояния непрерывнолитых блюмов при пластическом формоизменении на стадии кристаллизации / Е. Н. Смирнов, В. А. Белевитин // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – №1 (11). – С. 166–172.
9. Смирнов Е. Н. Исследования формоизменения непрерывнолитых блюмов и эффективности процесса деформирования на стадии кристаллизации методами физического моделирования / Е. Н. Смирнов // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля : наук. журнал*. – Луганськ : СНЦ ім. В. Даля, 2008. – № 8 (126). – Ч. 2. – С. 162–167.
10. Смирнов Е. Н. Кинематические параметры процесса деформации непрерывнолитых блюмов на стадии неполной кристаллизации / Е. Н. Смирнов, В. А. Белевитин // *Наук. пр. Донец. держ. техн. ун-ту. Сер. «Металлургия»*. – Донецьк : ДонНТУ, 2009. – Вып. 11 (159). – С. 154–164.
11. Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок [Текст] / В. А. Емельянов. – М. : *Металлургия*, 1988. – 143 с.
12. Смирнов Е. Н. Технологическое проектирование участка деформирования непрерывнолитых блюмов на стадии неполной кристаллизации / Е. Н. Смирнов // *Донбасс : 2020 : наука і техніка – виробництву : матеріали IV наук.-практ. конф.* : Донецьк, 27–28 трав. 2008 р. : *Донецк. нац. техн. ун-т*. – Донецьк : ДонНТУ, 2008. – С. 173–177.

Смирнов Е. Н. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: smirnov@fizmet.dgtu.donetsk.ua