

УДК 621.7.011: 621.982.45

Смирнов Е. Н.
Ручко В. Н.
Демченко Д. О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОМЕТРИИ ЖИДКО-ТВЕРДОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СОРТОВОЙ ЗАГОТОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОГО СПОСОБА ОБЖАТИЯ НА СТАДИИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Современное состояние рынка непрерывнолитой сортовой заготовки из качественных марок стали вынуждает металлургические предприятия изыскивать технологические подходы, которые бы обеспечивали решение задачи, связанной с повышением уровня ее качества, имеющего первостепенное значение для последующего производства проката ответственного назначения.

Одним из подходов, который используется на современных зарубежных высокоскоростных сортовых МНЛЗ, следует считать метод «мягкого» механического обжятия. Особенностью данного метода является дополнительное плавное обжятие (на несколько миллиметров) твердой оболочки непрерывнолитой заготовки в нижней части зоны вторичного охлаждения (ЗВО), т. е. в зоне, где наблюдается определенное соотношение твердой и жидкой фазы металла [1].

Реализация метода «мягкого» механического обжятия в условиях современных отечественных сортовых МНЛЗ сопряжена с поиском проектных решений, направленных на совершенствование и разработку конструкций тянуще-правильных машин (ТПМ), а также элементов оборудования, связанных с ними реализацией исследуемого метода.

Фактически впервые, в полном объеме, концепция «мягкого» механического обжятия (ММО) сортовой заготовки была реализована в условиях шестиручьевого МНЛЗ S0 с радиальным кристаллизатором компании SAARSTAHL AG в г. Фельклингене (Германия) при получении заготовок сечением 150 × 150 мм и 180 × 180 мм [2]. Основными причинами разработки этого проекта являлись: постоянный рост потребностей, и расширение сортамента разлива высококачественных марок стали, а также, повышение производительности и гибкости технологического процесса.

Реализующий ММО правильно-тянущий узел состоит из шести сегментов для каждого ручья. Каждый сегмент имеет две пары роликов, т.е. на каждом ручье – 12 роликовых пар. Верхние входные ролики – приводные. Длина правильно-тянущего узла ММО – 8 м. Возможна реализация жесткого и мягкого режимов деформации за счет использования гидравлической системы смещения сегментов.

Практическое использование ММО в условиях в шестиручьевого МНЛЗ S0 компании SAARSTAHL AG показало, что используемый динамический контроль кристаллизации – DSC (Dynamic Solidification Control) позволяет определить оптимальные параметры процесса «мягкого» обжятия. Это дает возможность рассчитать и отрегулировать положение конца фронта кристаллизации и диаметр жидкой сердцевинки (зумпф) в любом положении и по всей длине заготовки. Кроме других возможностей, режим «мягкого» обжятия представляет собой эффективное средство устранения нежелательных сегрегационных эффектов и, следовательно, повышения качества непрерывнолитых заготовок [3].

В настоящее время практически все мировые производители основного технологического оборудования для металлургии, при проектировании МНЛЗ для отливки качественных марок стали, предусматривают технологию «мягкого» обжятия. Разработанная компанией Siemens-VAI (Австрия) технология DynaGap SoftReduction [4] позволяет определить оптимальные усилия роликов тянущих устройств даже при нестабильных условиях разлива и принимать в расчет изменение параметров перегрева, химический состав стали, скорость разлива и расход воды в системе вторичного охлаждения. Образцы блюмов, разлитые

с помощью технологии DynaGap SoftReduction, продемонстрировали практически полное отсутствие следов сегрегации и лишь небольшую центральную пористость. Оптимальное обжатие в клетки с протяжными роликами, рассчитанное встроенной динамической технологической моделью, предотвращает образование внутренних трещин и даже при сравнительно высоких скоростях ведет к значительному улучшению внутреннего строения заготовки [5].

Спроектированный компанией Danieli (Италия) правильно тянущий механизм с системой «мягкого» обжатия, установленный на реконструированной четырехручьева блюмовой МНЛЗ № 3 в электросталеплавильном цехе РУП «Белорусский металлургический завод», состоит из девяти модулей, на каждом из которых предусмотрено обжатие заготовки валками. Используемая в механизме система «мягкого» обжатия - DDSR, обеспечивает оптимальный диапазон для начала и окончания зоны «мягкого» обжатия для всего марочного состава сталей при доле твердой фазы F_s в слитке $0,8 < F_s < 0,2$. Применение системы «мягкого» обжатия позволило повысить скорость разливки на 25 %, и получать при этом качество макроструктуры непрерывнолитой заготовки согласно требованиям нормативной документации [6].

В связи с необходимостью повышения конкуренции на мировых рынках непрерывнолитой заготовки, попытки реализации метода ММО нашли свое отражение на отечественном предприятии, в условиях современной сортовой МНЛЗ ПАО «Енакиевский металлургический завод» [7]. В ходе осуществления экспериментальных исследований были проведены: замеры в горячем потоке геометрических размеров непрерывнолитой заготовки, визуальный контроль качества поверхности заготовки на наличие поверхностных дефектов, отбор темплетов для контроля макроструктуры, контроль скорости разливки и температуры поверхности заготовки перед ТПМ. Анализ выполненных экспериментальных исследований, свидетельствуют о достаточной степени эффективности применения процесса «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок. Полученные качественные показатели непрерывнолитых заготовок по экспериментальному ручью № 6 (с применением ММО) и сравнительному ручью № 5 (без применения ММО) МНЛЗ № 2 ПАО «Енакиевский металлургический завод», показывают улучшение их внутренней структуры. К показателям, характеризующим данное улучшение, следует отнести: средний балл осевой пористости – 0,0 (ручей № 6) и 2,0 (ручей № 5); средняя величина усадочной раковины – 0,5 мм (ручей №6) и 2,5 мм (ручей № 5). Однако характер выполненных исследований не позволяет однозначно судить об уровне изучения механизма подавления дефектов усадочного происхождения в осевой зоне непрерывнолитой заготовки и о целесообразности использования для реализации метода ММО, именно валков эксплуатируемой ТПМ.

Выполненный анализ современных конструктивных и технологических решений в области разработки и совершенствовании метода ММО применительно к производству непрерывнолитой сортовой и блюмовой заготовки, позволяет наметить пути дальнейшего развития этого технологического проема в решении задач обеспечения высокого качества данной продукции.

Согласно приведенному описанию конструктивных решений, дальнейшее повышение и обеспечение качества производимой непрерывнолитой сортовой заготовки, в условиях современных высокоскоростных МНЛЗ, связано с осуществлением мероприятий по дальнейшему совершенствованию и разработке новых конструкций ТПМ, а также сопряженных с ними блоков обжимных клетей, с целью улучшения их производственных и технологических характеристик.

Одним из направлений совершенствования конструкций ТПМ следует считать определение оптимальных геометрических размеров и расположение сегментов с роликами, обеспечивающих требуемый уровень деформирования при реализации новых способов ММО, а также, внедрение особых элементов, позволяющих осуществлять регулирование и передачу усилий в области кристаллизации, и, следовательно, непосредственно влиять на внутреннюю микроструктуру заготовки.

Целью работы является разработка нового способа обжатия в условиях современных высокоскоростных МНЛЗ на стадии неполной кристаллизации и исследование особенностей изменения пространственной геометрии жидко-твердой составляющей непрерывнолитой сортовой заготовки.

На основании оценки особенностей функционирования и выявленных недостатков конструкций ТПМ, реализующих метод ММО, авторами был предложен новый способ обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки с начальной высотой – h , находящейся в жидкотвердом состоянии [8]. Предлагаемый способ основан на циклическом характере деформирования поверхности заготовки и реализуется за два этапа – в блоке обжимных клеток, включающем два сегмента, каждый из которых состоит из двух пар валков, последовательно расположенных по ее длине в зоне окончательного затвердения (рис. 1).

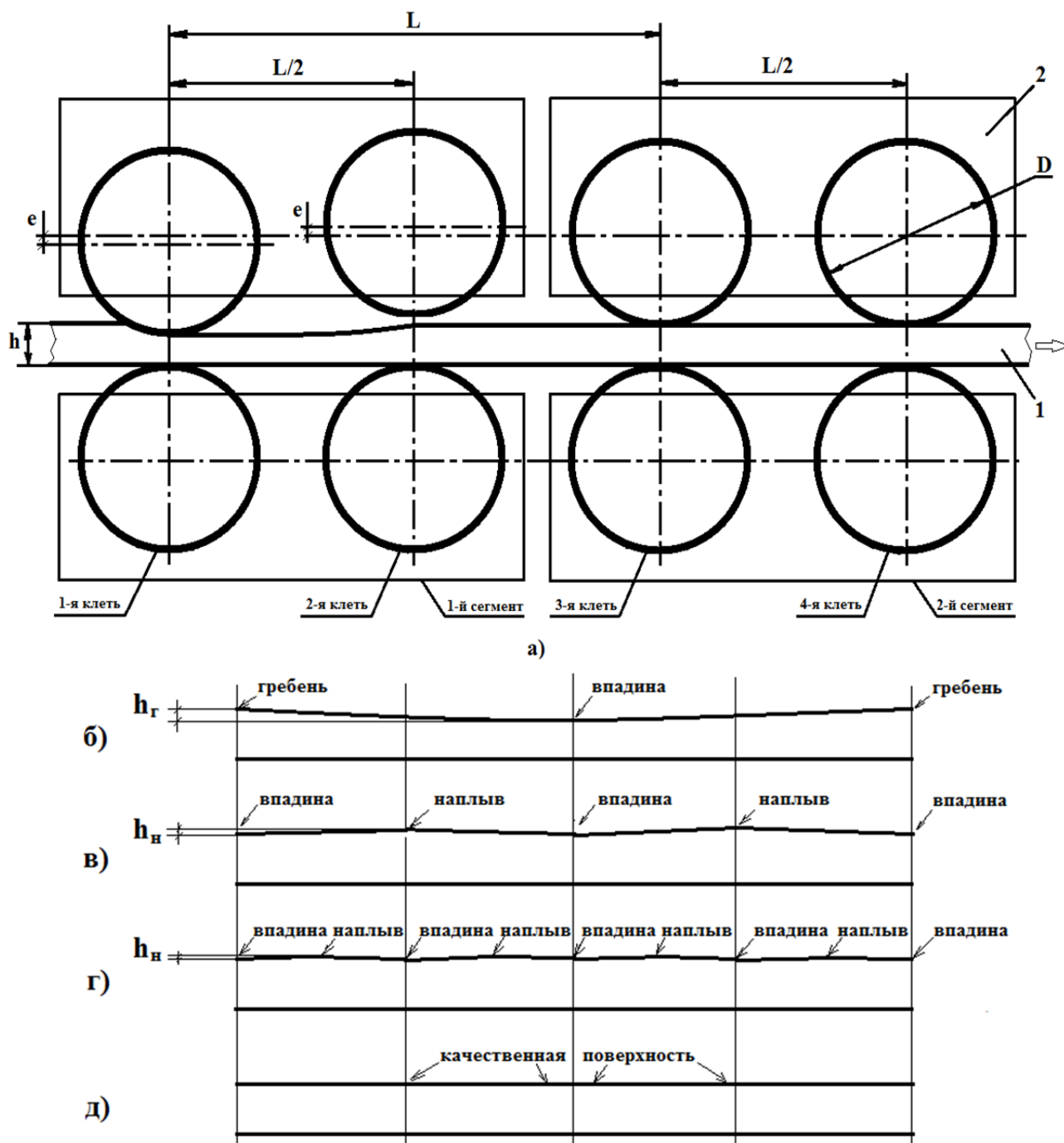


Рис. 1. Способ «мягкого» обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки:

а – общий вид способа «мягкого» обжатия; б, в, г, д – последовательность изменения поверхности НЛЗ после обжатия валками, соответственно, 1-й клетки 1-го сегмента, 2-й клетки 1-го сегмента, 3-й клетки 2-го сегмента и 4-й клетки 2-го сегмента; 1 – непрерывнолитая заготовка; 2 – блок обжимных клеток; L – расстояние между валками 1-й и 3-й клетями ($L = \pi D$); $h_г$ – высота гребня; $h_н$ – высота наплыва

На первом этапе непрерывнолитую заготовку с отношением высоты h к диаметру D валков обжимных клетей в пределах $h/D = 0,285-0,429$ последовательно циклически обжимают со степенью относительной деформации ε в пределах $\varepsilon = 0,5-2,5$ % верхним валком первой клетки (1-й сегмент), установленным с эксцентриситетом e на уровне $e/h = -(0,0066-0,025)$, а затем ликвидируют начальный гребень верхним валком второй клетки (1-й сегмент), имеющим эксцентриситет противоположного знака на уровне $e/h = +(0,0066-0,025)$.

На втором этапе обжимают образованные окончательные циклические наплывы валками третьей и четвертой клетки (2-й сегмент) со степенью относительной деформации ε , которая не меньше или равняется разнице между высотой, деформированной на первом этапе заготовки по наплывам и впадинам [9].

Для оценки практического эффекта от использования предлагаемого нового способа циклического обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки в условиях современных высокоскоростных МНЛЗ, предварительно было выполнено ряд исследований на физических моделях, с целью изучения особенностей изменения пространственной геометрии жидко-твердой составляющей заготовки на стадии кристаллизации.

В качестве объекта моделирования были выбраны параметры непрерывнолитой сортовой заготовки сечением 150×150 мм, разливаемой на МНЛЗ ПАО «Енакиевский металлургический завод», выбор которой обусловлен наличием разрабатываемых проектов по реконструкции блока ее тянуще-правильных клетей на редуцирующие клетки.

Для проведения экспериментальных исследований по изучению особенностей изменения пространственной геометрии жидко-твердой составляющей заготовки на стадии кристаллизации были использованы образцы в масштабе 1:5 (30×30 мм) по отношению к реальным размерам заготовки (150×150 мм). Материалом образцов был выбран – пластилин, хорошо себя зарекомендовавшим при исследовании процессов деформации заготовок с неравномерным температурным полем. Длина каждого образца составляла ~ 350 мм. С целью имитации жидко-твердого состояния сердцевины заготовки в теле образцов были выполнены сквозные внутренние отверстия диаметром $D_o = 14$ мм, в которые был залит желатин, подвергнутый замораживанию перед исследованиями, находясь внутри образца.

Исследование циклической деформации модельных образцов осуществлялось на лабораторном прокатном стане с диаметром валков $D_g = 100$ мм. Один (нижний) из пары валков был выполнен в виде гладкой бочки, а второй (верхний) был изготовлен с эксцентриситетом $-e$. Для возможности изменения величины эксцентриситета и проведения трех этапов исследований было изготовлено три верхних валка с эксцентриситетами, соответственно, $e = 1, 2$ и 3 мм. Дополнительно к исследованию циклического обжатия, в каждом из трех этапов экспериментов верхние валки устанавливались с постоянным обжатием Δh , соответственно, $\Delta h = 1, 2$ и 3 мм, обеспечивая суммарное обжатие $\Sigma \Delta$.

Выполнив каждый из трех этапов циклического деформирования, было произведено исследование изменений параметров, характеризующих пространственную геометрию жидко-твердой составляющей (рис. 2), для чего были получены темплеты сечений образцов по плоскости, соответствующей зоне максимальной деформации образца (рис. 3).

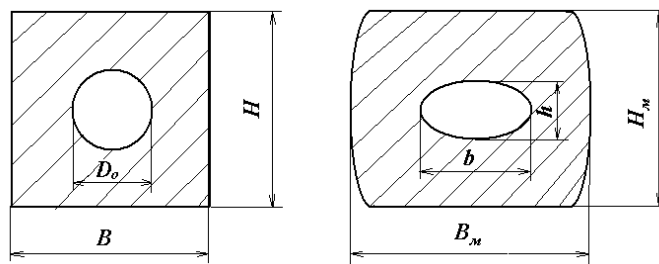


Рис. 2. Схемы обмера образцов:

а – начальное состояние; б – после циклического обжатия в зоне максимальной деформации образца



(а) образец 1.1



(б) образец 1.2



(в) образец 1.3



(г) образец 2.1



(д) образец 2.2



(е) образец 2.3



(ж) образец 3.1



(з) образец 3.2



(и) образец 3.3

Рис. 3. Геометрия жидко-твердой составляющей сечения образцов в зоне максимального обжатия при различных значениях эксцентриситета ($e = 1, 2$ и 3 мм)

Используя полученные темплеты сечений образцов по плоскости (рис. 2), соответствующей зоне максимальной деформации от применения циклического обжатия, были выполнены замеры геометрических параметров как зоны максимальной деформации образцов H_m и B_m , так и их жидко-твердой составляющей h и b (табл. 1).

Изменение внешнего вида темплетов и численных значений параметров, характеризующих геометрию жидко-твердой составляющей сечения образцов, позволили выявить особенность, согласно которой, при больших значениях суммарного обжатия образцов $\Sigma\Delta$ (при $e = 3$ мм), наблюдается снижение значения параметра b , определяющего большой радиус эллипса жидко-твердой части образца. Внешне, данная особенность проявляется в виде слипания краев эллипса и превращения его в чечевицеобразную форму.

Таблица 1

Результаты исследования пространственной геометрии жидко-твердой составляющей сечений модельных образцов после циклического обжатия

№ образца	Параметры исследованных образцов							Площадь эллипса жидко-твердой части *, мм ²
	Зона максимального обжатия образца		Эксцентриситет ролика e , мм	Обжатие роликом Δh , мм	Суммарное обжатие $\Sigma \Delta$, мм	Параметры эллипса жидко-твердой части образца		
	H_m , мм	B_m , мм				h , мм	b , мм	
1.1	27,50	31,50	1,0	1,0	3,0	11,5	14,0	126,39
1.2	26,50	33,00	1,0	2,0	4,0	9,5	14,5	108,13
1.3	25,50	33,50	1,0	3,0	5,0	8,5	15,0	100,09
2.1	25,50	32,75	2,0	1,0	5,0	8,0	13,5	84,78
2.2	24,25	32,50	2,0	2,0	6,0	7,5	14,0	82,43
2.3	22,75	35,50	2,0	3,0	7,0	6,0	15,0	70,65
3.1	22,50	35,50	3,0	1,0	7,0	6,5	15,0	76,54
3.2	22,00	35,50	3,0	2,0	8,0	6,0	14,5	68,30
3.3	21,00	36,00	3,0	3,0	9,0	4,0	12,5	39,25
Контр	28,00	31,75	0,0	2,0	2,0	12,0	14,0	131,88

*Площадь эллипса жидко-твердой части образца определялась по формуле: $F = \pi \cdot h/2 \cdot b/2$.

Проанализировав общие изменения, которые наблюдаются в процессе деформирования образцов в жидко-твердом состоянии при циклическом характере изменения обжатия, на основании полученных и обработанных данных (табл. 1), которые характеризуют особенности изменения внутренней пространственной геометрии образцов, с помощью компьютерной программы Table Curve 3D, был построен график зависимости и получена математическая модель, которая характеризует связь факторов деформации с полученными параметрами.

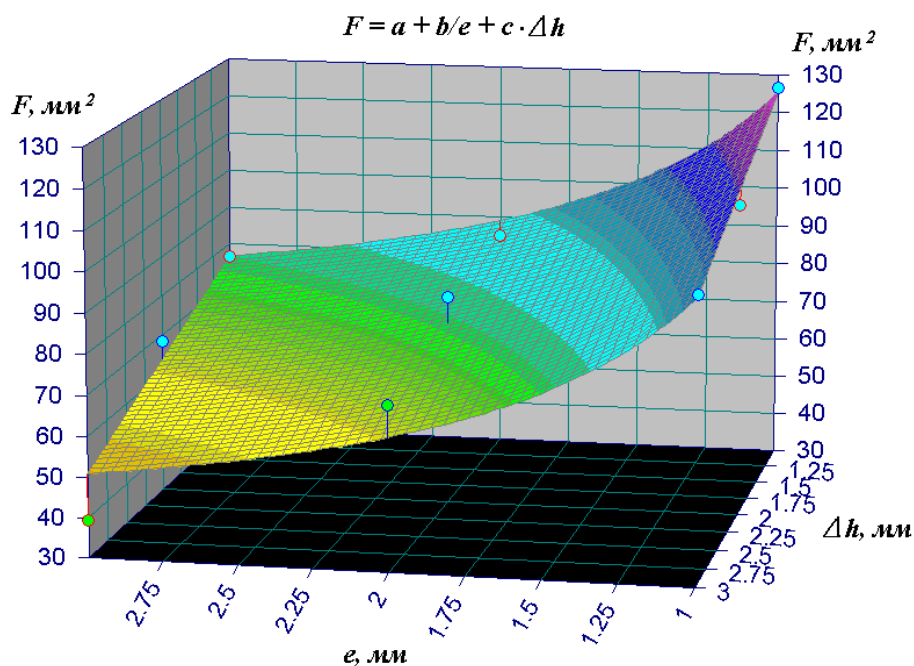


Рис. 4. График функции, описывающей зависимость площади эллипса жидко-твердой части образца F от эксцентриситета ролика e и обжатия роликом Δh

Обработав данные, характеризующие взаимосвязь особенностей обжатия образца на изменение пространственной геометрии его жидко-твердой составляющей (рис. 4), была получена математическая зависимость площади эллипса жидко-твердой части образца F от эксцентриситета ролика e и обжатия роликом Δh :

$$F = a + b/e + c \cdot \Delta h,$$

где $a = 65,49$; $b = 72,78$; $c = -12,95$ – коэффициенты уравнения, для которого коэффициент детерминации составил $r^2 = 0,94$.

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ существующих технологических решений и конструктивных особенностей устройств, применяемых для реализации способа ММО в условиях современных сортовых МНЛЗ зарубежных и отечественных предприятий. Выявлено наличие оптимальных условий осуществления ММО, предотвращающих образование внутренних трещин и ведущих к значительному улучшению внутреннего строения заготовки. Предложен способ циклического ММО непрерывнолитой сортовой заготовки, включающий два этапа деформации в блоке обжимных клетей, состоящего из двух сегментов, каждый из которых состоит из двух пар валков, последовательно расположенных по ее длине в зоне окончательного затвердения. Проведено исследование особенностей изменения пространственной геометрии жидко-твердой составляющей непрерывнолитой сортовой заготовки на стадии ее кристаллизации, при использовании нового метода. Получена математическая модель, описывающая связь факторов деформации с исследуемыми параметрами заготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система технологического проектирования метода «мягкого» обжатия непрерывнолитых блюмов и заготовок в конце затвердевания / [А. А. Минаев, Е. Н. Смирнов, А. Н. Смирнов, и др.] // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні* : зб. наук. пр. — Луганськ : вид-во СНУ ім. Даля, 2002. — С. 59–66.
2. Новая машина непрерывного литья заготовок SO компании SAARSTAHL / [Г. Ней, Ф. Рюнтель, Э. Корте, и др.] // *Черные металлы*. — 2006. — Апрель. — С. 34–40.
3. Мягкое обжатие заготовок на машине непрерывного литья SO компании SAARSTAHL AG / [Р. Толи, В. Остхаймер, Г. Ней и др.] // *Черные металлы*. — 2007. — Июль-август. — С. 49–55.
4. Siemens-VAI Metals Technologies. Continuous bloom/bean – blank casting solution. Austria. Brochure, 2009. — P. 12–13.
5. Сотников А. А. Системы мягкого обжатия на МНЛЗ и их влияние на качество макроструктуры заготовок / А. А. Сотников, С. В. Терлецкий, В. Э. Марушкевич // *Сталь*. — 2011. — № 2. — С. 17–19.
6. Сотников А. А. Комплексная реконструкция машины непрерывного литья заготовок Белорусского металлургического завода / А. А. Сотников, А. В. Демин, С. В. Терлецкий // *Черные металлы*. — 2011. — Июнь. — С. 15–18.
7. Куберский С. В. Экспериментальные исследования процессов мягкого обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок в промышленных условиях / С. В. Куберский, С. М. Стриченко, А. В. Завгородний // *Прикладная механика*. — 2011. — № 4/7 (52). — С. 41–43.
8. Заявка на патент № a201112140 Україна. МПК B22 D11/12. Спосіб обтиснення безперервнолітої сортової заготовки у рідко-твердому стані / Смирнов С. М., Ручко В. М., Смирнов О. М. та ін.; заявник і патентовласник ДВНЗ «ДонНТУ»; заявл. 17.10.2011.
9. Смирнов Е. Н. Анализ существующих технологических решений и разработка варианта способа «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок / Е. Н. Смирнов, В. Н. Ручко, Д. О. Демченко // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. — Краматорск : ДГМА, 2012. — № 1 (30). — С. 195–201.

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

Ручко В. Н. — канд. техн. наук, доц. ДонНТУ;

Демченко Д. О. — магистр ДонНТУ.

ДонНТУ — Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: smirnov@fizmet.dgtu.donetsk.ua; vlad@mech.dgtu.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 10.10.2012 г