

### РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.771:669.18-412

Бадюк С. И.  
Воробей С. А.

#### ВЫБОР РАЗМЕРА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СОРТОВОГО ПРОКАТА

В настоящее время основная часть сортового проката производится из непрерывнолитых заготовок (НЛЗ). Непрерывнолитые заготовки, как правило, отличаются от катаных более низким комплексом механических свойств, наличием внутренних дефектов (осевая пористость, ликвация и др.), а, часто, и наружных дефектов. Полное устранение этих дефектов при непрерывной разливке, а также зачистка поверхности заготовок не всегда является выгодным. Поэтому для получения высокого качества готового проката требуется определенная степень деформации непрерывнолитого металла, которая обеспечит необходимое уменьшение наружных и внутренних дефектов.

Сортамент сортовых станов включает широкий диапазон размеров проката – от катанки диаметром 4,5–5,5 мм до профилей крупных сечений – диаметром 60 мм и более [1]. На крупносортовых станах диаметр проката, производимого из непрерывнолитой заготовки, может достигать 120–220 мм и более. Таким образом, для каждого прокатного стана важно определить рациональный размер сечения непрерывнолитых заготовок, обеспечивающий высокое качество проката всего размерного и марочного сортамента.

К настоящему времени опубликовано большое количество работ, в которых приведены результаты исследований по влиянию степени деформации на изменение механических свойств и дефектов непрерывнолитых заготовок. Однако обобщающие зависимости в технической литературе отсутствуют.

Целью настоящей работы является установление основных закономерностей изменения механических свойств, внутренних и наружных дефектов непрерывнолитых заготовок в ходе их деформации на основе обобщения литературных данных, что позволит разработать методы расчета рационального поперечного сечения непрерывнолитой заготовки для производства сортового проката различного сортамента.

Для формализации процесса определения требований к НЛЗ предложена следующая градация проката:

- группа 1 – прокат из углеродистой стали обыкновенного качества;
- группа 2 – прокат из углеродистой качественной конструкционной стали;
- группа 3 – прокат из углеродистой качественной конструкционной стали с повышенными требованиями к ударной вязкости, пластичности, штампуемости; осадке; прокат из низколегированной и легированной стали.

Выбор рациональных параметров непрерывнолитой заготовки предлагается производить в следующей последовательности:

- 1) исходя из максимального размера поперечного сечения проката, для каждой группы качества рассчитываются минимальные сечения заготовок, обеспечивающие стабилизацию механических свойств проката и требуемые параметры макроструктуры;
- 2) из полученных значений сечения заготовки выбирается большее;
- 3) сечение непрерывнолитых заготовок принимается из стандартного ряда, но не менее чем определенное в п. 2);

4) исходя из принятого сечения заготовки и заданного размерного сортамента проката, рассчитываются допустимые отклонения размеров заготовки и глубина поверхностных дефектов;

5) если полученные значения допустимых отклонений размеров заготовки и глубины поверхностных дефектов не соответствуют техническим условиям на заготовку, то ее сечение увеличивается до следующего стандартного значения.

В литературе (например, [2–17]) указываются различные значения минимального коэффициента вытяжки, необходимые для проработки литой структуры – от 2,2 до 15. Такой большой диапазон объясняется тем, что исследованы разные марки стали, сечения НЛЗ, показатели механических свойств (прочность, пластичность, ударная вязкость). Кроме того, механические свойства определяли в различных сечениях готового проката. Однако характер влияния коэффициента вытяжки примерно одинаков – с его увеличением комплекс механических свойств проката повышается. Причем, с увеличением коэффициента вытяжки интенсивность роста значений механических свойств снижается.

В результате анализа известных из литературы данных можно сделать следующие выводы:

– на минимальный коэффициент вытяжки, необходимый для стабилизации механических свойств по сечению проката, а также в продольном и поперечном направлении, основное влияние оказывает исходная макроструктура непрерывнолитой заготовки;

– на проработку литой структуры влияет размер непрерывнолитой заготовки, причем, через два фактора – состояние макроструктуры и схему напряженно-деформированного состояния: чем меньше сечение НЛЗ, тем более мелкая и равномерная литая структура и более благоприятная схема напряженно-деформированного состояния центральной зоны заготовки при прокатке;

– минимальный коэффициент вытяжки, необходимый для стабилизации механических свойств, увеличивается с ростом содержания углерода и легирующих элементов в стали (в первую очередь, это относится к показателям пластичности и ударной вязкости).

На основе анализа и обработки экспериментальных данных, приведенных в работах [2–17] нами предложено выражение описывающее изменение минимальной степени вытяжки, необходимой для стабилизации механических свойств проката, от размера непрерывнолитой заготовки и углеродного эквивалента:

$$[\lambda] = a \cdot (D^b) \cdot (C_{\text{Э}}^c), \quad (1)$$

где  $D$  – характерный размер заготовки (для прямоугольных заготовок – размер меньшей стороны);

$C_{\text{Э}}$  – углеродный эквивалент:

$$C_{\text{Э}} = C + (Mn/6) + (Si/8) + (Ni/15) + (Cr/6). \quad (2)$$

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение коэффициентов в уравнении (1)

Наименование показателя механических свойств	$a$	$b$	$c$	$R^2$
Временное сопротивление и предел текучести	1,653	0,158	0,296	0,534
Относительное удлинение и сужение	0,89	0,302	0,293	0,573
Ударная вязкость	1,174	0,331	0,921	0,753

Разброс значений необходимой величины вытяжки обусловлен, в первую очередь, отсутствием в проанализированных публикациях данных о состоянии макроструктуры непрерывнолитых заготовок. Поэтому для практического применения целесообразно использовать верхнюю границу областей. Исходя из диапазона полей данных, полученные по зависимости (1) значения следует увеличить на 20 %.

На рис. 1 показаны верхние границы областей значений коэффициента вытяжки, обеспечивающих стабилизацию механические свойства проката. Полученные зависимости в целом соответствуют сущности процессов формирования структуры и механических свойств проката из непрерывнолитого металла и могут быть использованы для выбора размеров заготовки, исходя из размеров готового проката и требований к его механическим свойствам.

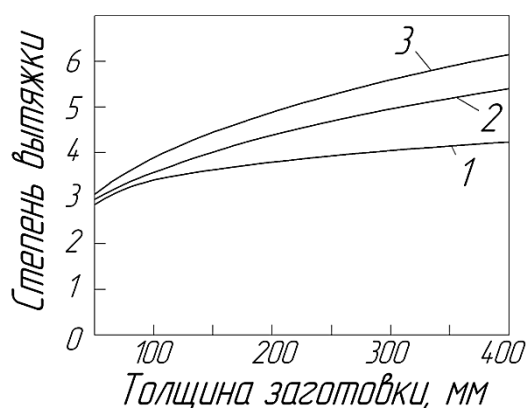


Рис. 1. Степени вытяжки, обеспечивающие стабилизацию механических свойств проката, в зависимости от толщины непрерывнолитых заготовок для стали с  $C_3 = 0,6$ :

1 – временное сопротивление и предел текучести; 2 – относительное удлинение и сужение; 3 – ударная вязкость

Кроме обеспечения требуемого комплекса механических свойств для многих видов проката регламентируются требования к параметрам макроструктуры – центральная пористость (ЦП), точечная неоднородность (ТН), ликвационный квадрат (ЛК), подсадочная ликвация (Л), пятнистая ликвация (ПЛ) и др.

Усредненные требования действующих в Украине стандартов к показателям качества макроструктуры готового проката групп качества 2 и 3 показаны в табл. 2. Для группы качества 1 параметры макроструктуры не регламентируются.

Таблица 2

Усредненные требования к показателям качества макроструктуры готового проката

Группа качества	Диаметр, мм	Допустимый балл для параметров макроструктуры				
		ЦП	ТН	ЛК	Л	ПЛ
1*		3	3	3	2	2
2		2	2	1	1	2
3	до 80	1	1	0	1	0
	св. 80	2	2	0	1	1

Примечание. \* – принятые нами значения

По данным работ [18, 19] точечная неоднородность и пятнистая ликвация не изменяются в ходе деформации. Изменение центральной пористости и ликвации в процессе деформации в первом приближении нами принято одинаковым.

На основе анализа и обработки экспериментальных данных изменения параметров макроструктуры в ходе деформации, приведенных в работах [4, 17–19], нами было предложено выражение, описывающее изменение центральной пористости и ликвации от степени вытяжки:

$$M(\lambda) = M_{\text{НЛЗ}} - \ln(\lambda) \times \sqrt{0,5 \cdot M_{\text{НЛЗ}}}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент вытяжки;

$M_{\text{НЛЗ}}$  – балл центральной пористости и ликвации непрерывнолитой заготовки.

На рис. 2 показаны значения  $M(\lambda)$ , рассчитанные по уравнению (3) в зависимости от макроструктуры непрерывнолитой заготовки. Полученная зависимость качественно согласуется с экспериментально полученной зависимостью динамики изменения пористости литого металла в ходе его деформации [20].



Рис. 2. Влияние степени вытяжки на проработку макроструктуры непрерывнолитой заготовки:

1, 2, 3, 4 – балл центральной пористости и ликвации непрерывнолитой заготовки

Для проверки полученных зависимостей использовали экспериментальные данные об изменении центральной пористости при прокатке из непрерывнолитых заготовок сечением 335 × 400 мм ПАО «ДМКД» слябов и листового проката толщиной 170–30 мм (по литературным данным [21]) и прокатке круглой заготовки диаметром 210–270 мм. В первом случае центральная пористость НЛЗ соответствовала баллу 4. Во втором случае центральная пористость, исследованных НЛЗ, соответствовала баллам 1,5–3.

Сравнение расчетных данных с экспериментальными показано на рис. 3 и 4.

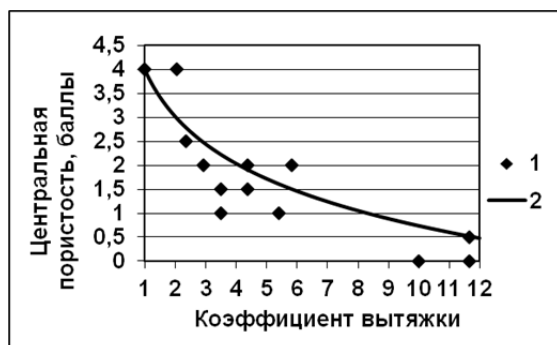


Рис. 3. Влияние вытяжки на центральную пористость листового проката:  
1 – экспериментальные данные [21];  
2 – расчетные

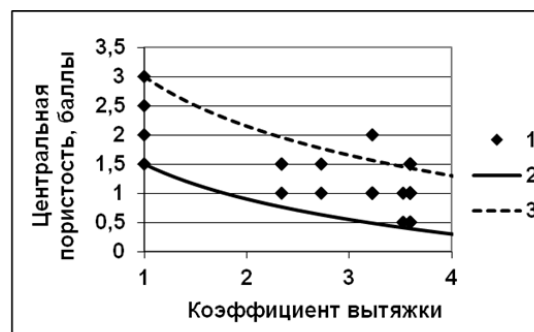


Рис. 4. Влияние вытяжки на центральную пористость круглого проката:  
1 – экспериментальные данные;  
2 – расчетные при центральной пористости НЛЗ 1,5 балл; 3 – 3 балл

Для расчета допустимой величины центральной пористости НЛЗ в зависимости от допустимой центральной пористости проката ( $M_{\text{ПР}}$ ) выражение (3) приведем к следующему виду:

$$[M_{\text{НЛЗ}}] = \frac{(\ln(\lambda)^2 \cdot 0,5)^2 + \sqrt{(\ln(\lambda)^2 \cdot 0,5)^2 + 4 \cdot M_{\text{ПР}}^2}}{2}. \quad (4)$$

На рис. 5 показаны рассчитанные по уравнению (4) значения  $[M_{\text{НЛЗ}}]$  в зависимости от требуемого состояния макроструктуры готового проката и коэффициента вытяжки.

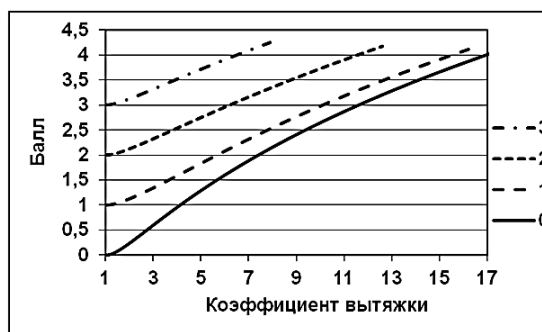


Рис. 5. Максимально допустимый балл центральной пористости и ликвации НЛЗ в зависимости от требований к макроструктуре готового проката и коэффициента вытяжки:

0, 1, 2, 3 – балл центральной пористости и подсадочной ликвации готового проката

Качество поверхности непрерывнолитой заготовки в значительной степени определяет чистоту поверхности готового проката. Основные поверхностные дефекты непрерывнолитых заготовок можно разделить на четыре типа: кристаллизационные трещины, утяжины, «холодные» трещины, образовавшиеся в зоне вторичного охлаждения, борозды механического происхождения [22, 23].

Наличие кристаллизационных трещин на непрерывнолитых заготовках, не допускается [24, 25]. Технология непрерывной разливки заготовок должна обеспечивать их отсутствие.

Дефекты непрерывнолитых заготовок типа «холодных» трещин, утяжин и борозд механического происхождения допускаются в совмещенных процессах непрерывной разливки и прокатки, но их глубина должна быть ограничена, исходя из требований к качеству поверхности готового проката.

Допустимая глубина поверхностного дефекта непрерывнолитой заготовки при ее прокатке на многоклетевом непрерывном сортовом стане может быть рассчитана по выражению [26, с. 59]:

$$[t_0] = 0,518 \cdot \left( \sqrt{\lambda} \cdot [t_1] + 0,5 \cdot \left( a - \sqrt{\left( \frac{100 - Y}{100} \right) \cdot a^2} \right) \right), \quad (5)$$

где  $[t_0]$  – допустимая глубина дефекта непрерывнолитой заготовки;

$\lambda$  – вытяжка;

$[t_1]$  – допустимая глубина дефекта на готовом прокате;

$a$  – размер стороны заготовки;

$Y$  – величина угара заготовки в процентах от массы.

Допустимая глубина дефекта на готовом прокате определяется соответствующими стандартами или техническими условиями. По требованиям к качеству поверхности проката из различных марок стали его можно разделить на те же группы, что и по требованиям

к макроструктуре. Для проката группы 1 допустимая глубина дефекта не должна превышать минусового поля допуска. Для проката группы 2 глубина дефекта не должна превышать половины поля допуска. Для проката группы 3 глубина дефекта не должна превышать четверти поля допуска, но не более 0,1 мм для диаметра проката до 20 мм и не более 0,2 для диаметра от 20 мм и более.

Допустимую глубину дефектов непрерывнолитой заготовки сечением от  $125 \times 125$  до  $165 \times 165$  мм рассчитывали для проката диаметром от 5,5 до 78 мм. Величину угара принимали равной 0,8 % от массы заготовки. Расчетные значения допустимой глубины дефекта непрерывнолитой заготовки показаны на рис. 6.

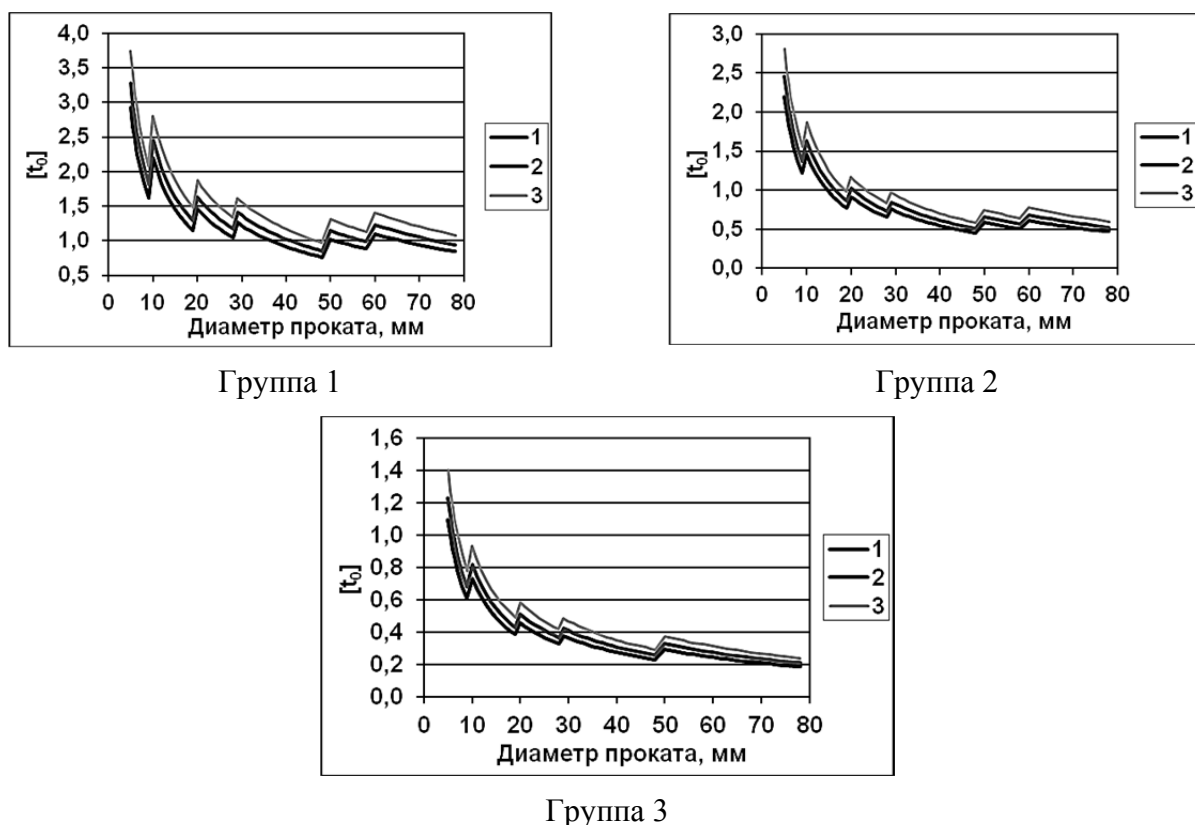


Рис. 6. Расчетные значения допустимой глубины поверхностных дефектов непрерывнолитой заготовки. Размер сечения заготовки, мм:

1 –  $125 \times 125$ ; 2 –  $140 \times 140$ ; 3 –  $165 \times 165$

## ВЫВОДЫ

Получены зависимости, позволяющие рассчитать величину минимальной степени вытяжки, необходимой для стабилизации механических свойств, а также обеспечения требований к осевой пористости и ликвации горячекатаного сортового проката. На базе предложенных зависимостей разработана методика выбора поперечного сечения непрерывнолитой заготовки для производства сортового проката, учитывающая также обеспечение допустимой глубины дефектов поверхности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мини-завод Липа для литья бесконечной прокатки сорта из специальных сталей / Ф. Альзетта, Д. Андреатта, М. Тонидандел, В.-Д. Руцца // МРТ. – 2001. – С. 60–72.
2. Прокатка мелкого сорта из непрерывнолитых заготовок / Д. П. Евтеев, В. И. Листопад, К. Д. Няшин и др. // Бюллетень ЦНИИИТЭИЧМ. – 1974. – № 10 (726). – С. 40–42.
3. Качество горячекатанной стали, полученной из непрерывно литой заготовки / Н. Г. Гладышев, В. П. Дружинин, Е. В. Федорчук, С. М. Горлов // Бюллетень ЦНИИИТЭИЧМ. – 1965. – № 10 (510). – С. 42–43.
4. Влияние величины деформации на качество сортового проката из непрерывнолитых заготовок / А. И. Чижиков, В. Л. Иохимович, Г. П. Рачук и др. // Бюллетень ЦНИИИТЭИЧМ. – 1966. – № 2 (526). – С. 36–37.

5. Качество проката и штампованных изделий из непрерывных слитков крупного сечения / А. Д. Подвинцев, А. И. Чижиков, Ф. Д. Зебзеев и др. // Проблемы стального слитка: труды III конференции по слитку. – М. : Металлургия, 1969. – С. 384–386.
6. Энгельман В. Обрабатываемость давлением заготовок непрерывной разливки / В. Энгельман, Х. Фосс, Р. Кольт // Черные металлы. – 1967. – № 17. – С. 27–34.
7. Ushijima Working process and reculting properties of continuously casting steel / Ushijima, By Kiyoto // Transactions of the iron and steel institute of Japan. – 1975. – № 7. – P. 380–392.
8. Kiss E. Walztechnische problome bei der warmumformung von stranggubknuppeln / E. Kiss // Neue Hutte. – 1974. – № 2. – S. 77–82.
9. Ревтов Н. И. Влияние степени деформации при прокатке на структуру и свойства непрерывнолитой заготовки / Н. И. Ревтов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1989. – № 8. – С. 55–58.
10. К питанню щодо впливу сумарної витяжки на зміну межі плинності сталі 45 при прокатці безперервнолитих заготовок в перших проходах / Є. М. Смирнов, В. О. Белевітін, Р. С. Ігнатков та ін. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць : тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 47. – С. 92–97.
11. Исследование показателей качества катанки при разработке технологии производства углеродистых сталей из непрерывнолитых заготовок / Д. В. Яблоков, В. А. Трусов, К. А. Зиновьев и др. // Труды пятого конгресса прокатчиков. – М. : Черметинформация, 2004. – С. 254–258.
12. Хигаки Т. Сортной литейно-прокатный агрегат / Т. Хигаки, Н. Окамура, С. Нишигачи // Непрерывное литье стали : материалы Международной конференции. – М. : Металлургия, 1982. – С. 260–268.
13. Шатагин О. А. Непрерывное литье на горизонтальных машинах / О. А. Шатагин, В. Т. Сладкошеев. – М. : Металлургия, 1976. – 184 с.
14. Непрерывная разливка стали в заготовки крупного сечения / А. И. Чижиков, В. П. Перминов, В. Л. Иохимович и др. – М. : Металлургия, 1970. – 136 с.
15. Сладкошеев В. Т. Качество стали при непрерывной разливке / В. Т. Сладкошеев, В. И. Ахтырский, Р. В. Потанин. – М. : Metallurgizdat, 1964. – 200 с.
16. Агрегаты по производству горячекатаной полосы из тонкой непрерывнолитой заготовки / Г. Флемминг, П. Каппес, В. Роде, Л. Фогтман // Черные металлы. – 1988. – № 3. – С. 3–12.
17. Качество сортового проката из непрерывнолитых заготовок / В. В. Поляков, Ю. Е. Канн, О. В. Мартынов и др. // Бюллетень ЦНИИИТЭИЧМ. – 1967. – № 15 (563). – С. 53–54.
18. Поведение дефектов макро- и микроструктуры непрерывнолитой заготовки при сортовой прокатке / А. И. Рудской, В. А. Лунев, Е. Г. Щеголева и др. // Металлообработка. – 2006. – № 4 (34). – С. 52–54.
19. Минимальное обжатию непрерывнолитых заготовок для получения качественного проката / А. Л. Либерман, И. В. Дубровин, И. И. Таланов и др. // Металлург. – 1993. – № 4. – С. 31–34.
20. Развитие методологии физического моделирования поведения осевой усадочной раковины и пористости в непрерывнолитых блюмах / Е. Н. Смирнов, А. П. Митьев, М. В. Григорьев и др. // Наукові праці Донауту. Металургія. – Донецьк : ДонДТУ, 2002. – Вип. 40. – С. 133–139.
21. Особенности изменения свойств листов, прокатываемых из непрерывнолитой заготовки / Н. П. Подберезный, О. П. Максименко, С. С. Бродский и др. // Металл и литье Украины. – 1998. – № 5–6. – С. 52–54.
22. Ботников С. А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла / С. А. Ботников. – Волгоград : [б.и.], 2011. – 97 с.
23. Смирнов О. М. Безперервне розливання сталі / О. М. Смирнов, С. В. Куберський, Є. В. Штепан. – Алчевськ : ДонДТУ, 2011. – 518 с.
24. Трансформація дефектів непрерывнолитой заготовки в поверхні дефекти проката / А. Б. Сычков, М. А. Жигарев, А. В. Перчаткин и др. // Металлург. – 2006. – № 2. – С. 60–64.
25. Трансформація дефектів непрерывнолитой заготовки при виробстві рельсів / А. Б. Юрьев, Л. А. Годик, Н. А. Козырев и др. // Сталь. – 2009. – № 7. – С. 28–30.
26. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки / А. А. Горбанев, С. М. Жучков, В. В. Филиппов и др. – Минск : Вышэйшая школа, 2003. – 287 с.

Бадюк С. И. – аспирант, мл. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;

Воробей С. А. – д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. отделом ИЧМ НАН Украины.

ИЧМ НАН Украины – Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Статья поступила в редакцию 11.03.2013 г.