

УДК 621.771.23.01:621.771.23

Руденко Е. А.  
Коновалов Ю. В.  
Фролова М. О.  
Герасименко С. О.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ И МОМЕНТА РЕДУЦИРОВАНИЯ И ПРОГЛАЖИВАНИЯ СЛЯБОВ В СИСТЕМЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ-ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ВАЛКИ ЧЕРНОВОЙ РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ

Редуцирование слябов на 200–300 мм в первых черновых клетях широкополосного стана получила широкое распространение в мировой практике, так как позволяет весь сортимент широких полос по ширине получать из непрерывно литых слябов нескольких размеров по ширине и сократить число кристаллизаторов при их отливке. На металлургических предприятиях Украины горячекатаные широкие полосы производят по устаревшей схеме «слиток – обжимной стан (слябинг) – широкополосный стан». Переход на современную схему производства широких полос «машина непрерывной разливки заготовок – широкополосный стан с редуцирующей черновой клетью» позволит значительно снизить энергетические и материальные затраты. В этой связи внедрение технологии редуцирования требует решения актуальных задач по силовым и деформационным режимам редуцирования слябов.

Технология редуцирования слябов может включать одно-трехразовые последовательные обжатия в вертикальных валках (ВВ) с последующим проглаживанием широких граней в горизонтальных валках (ГВ) до исходной толщины. Расчет силы и момента редуцирования по проходам необходим для рационального распределения обжатий в ВВ. Важно также рассчитать силу проглаживания раската в ГВ и определить возможность и величину основного обжатия по толщине.

Процесс редуцирования слябов в ВВ относится к случаю прокатки сверх высокой и высокой полосы. В первом случае деформация по ширине происходит практически без вытяжки раската по длине, весь смещенный объем металла в поперечном направлении сконцентрирован на приконтактных участках в пластических зонах ограниченной длины (ширины). После первого и последующих обжатий в ВВ поперечное сечение раската отличается от прямоугольного, принимает на приконтактных участках форму ручья или свободных наплывов при обжатии в гладких ВВ. Толщина раската на контакте с гладкими ВВ увеличивается, увеличивается и контактная площадь. У сляба, многократно обжатого по ширине, происходит значительное увеличение толщины не только на контакте и приконтактной зоне, а и по всей ширине, кроме того появляется значительная вытяжка. Учет фактической контактной площади необходим для расчета деформационно-силовых параметров прокатки в ВВ и ГВ.

В технической литературе приведены методики расчета силы и момента прокатки в гладких ВВ для случая небольших обжатий исходного сляба прямоугольного сечения [1–4]. Эти методики не могут быть использованы для случая редуцирования слябов с многократными обжатиями в гладких и калиброванных ВВ. В них не учитывается исходная ширина сляба, полагается, что средняя часть ширины является жесткой. Однако из практики известно, что при одинаковых обжатиях высота (толщина) на контакте с валком и вблизи кромки у широких слябов значительно больше, а пластическая зона ширины меньше, чем у узких слябов. В работах [4–5] приведены результаты исследования силовых условий прокатки и осевой вытяжки в гладких и калиброванных ВВ для случаев одно- и многократных обжатий. Недостаток – заниженные значения средних нормальных контактных напряжений, а, следовательно, и силовых параметров. Результатов исследований силовых параметров прокатки при проглаживании в горизонтальных валках в технической литературе мало, а методик их расчета не обнаружили.

Целью работы является совершенствование методики расчета силы и момента прокатки в ВВ и разработка методики расчета этих параметров при проглаживании раскатов в ГВ для условий редуцирования слябов с многократными последовательными обжатиями ширины.

Исследование силовых параметров обжатия в ВВ и проглаживания в ГВ выполнили путем физического моделирования на лабораторных станах. Материал моделирования – свинец, масштаб 1:30. Моделировали условия редуцирования слябов шириной 1200 мм, 1500 мм и 1800 мм толщиной 240 мм в универсальной черновой клетки. Катающий диаметр вертикальных валков 1250 мм, горизонтальных 1400 мм. Калибры ВВ ящичного типа с ручьями глубиной  $B_p = 150, 200$  и  $250$  мм, с выпусками  $\delta_p = 0,2; 0,4$  и  $0,6$  (углы  $\varphi = 12,6; 24,2$  и  $34,4$  град). Ширина дна всех ручьев принята равной толщине сляба ( $H_\delta = H_c$ ). Скорость прокатки 1 м/с. Слябы непрерывнолитые, марка стали Ст. 3сп. Температура редуцирования 1200 °С. Лабораторные клетки оснащены датчиками силы прокатки (месдозами) и крутящих моментов на каждом шпинделе. Коэффициент моделирования материала образцов (свинца)  $K_{sn}$  установили как отношение среднего давления при обжатии стальных слябов  $p_{ст}$  и используемых свинцовых образцов  $p_{sn}$  ( $K_{sn} = 3,6$ .)

По плану эксперимента образцы толщиной 8 мм каждой партии, ширины 40, 50 и 60 мм обжимали в ВВ с гладкой бочкой и с калибрами одноразово и последовательно 2 и 3 раза на 1,6; 3,3 и 5 мм, измеряли и проглаживали на начальную толщину в ГВ. При этом моделировали условия редуцирования слябов с обжатиями 50, 100 и 150 мм. Параметрами процесса редуцирования и проглаживания приняли такие измеренные и рассчитанные геометрические и силовые величины: толщина раската на контакте с гладкими  $H_{кз}$  и калиброванными  $H_{кк}$  ВВ, глубина  $B_{зр}$  и степень заполнения ручья  $K_{зр}$ , приведенное обжатие при проглаживании  $\Delta H_{нр}$ , сила  $P_\epsilon$  и момент  $M_\epsilon$  прокатки в вертикальных валках, сила  $P_{нр}$  и момента  $M_{нр}$  проглаживания, средние давления  $p_\epsilon$  и коэффициенты плеча момента  $\Psi_\epsilon$  при обжатии в вертикальных валках, и проглаживании  $p_{нр}$ ,  $\Psi_{нр}$ .

В качестве независимых переменных процесса редуцирования приняли:  $B_c / H_c$  – показатель поперечного сечения сляба; накопленную по проходам относительную деформацию  $\sum \Delta B_i / B_c$  ( $\sum \Delta B_i$  – сумма обжатий от 1-го до  $i$ -го прохода); показатель дробности деформации (число последовательных обжатий)  $\sum \Delta B_i / \Delta B_{ср}$  ( $\Delta B_{ср}$  – среднее обжатие в  $i$ -х обжатиях); обобщенный показатель калибра  $K_{кал}$ , учитывающий влияние на среднее давление размеров ручьев и ширины раската.

Обобщенный показатель калибров рассчитывали по формуле [5]:

$$K_{кал} = \sqrt{\frac{1 + 0,1B_p / (H_p - H_\delta)}{1 - 2B_p / B_{0i}}}, \quad (1)$$

где  $B_p$ ,  $H_p$ ,  $H_\delta$ ,  $B_{0i}$  – глубина, ширина у разьема и у дна ручья; ширина раската в  $i$ -м проходе.

Из (1) следует, что при прокатке на гладкой бочке ( $B_p = 0$ )  $K_{кал} = 1$ . В зависимости от размеров ручьев и ширины раскатов диапазон изменения  $K_{кал}$  составил 1,15–1,45. Переменными также были приняты  $l_{\delta i} / B_i$ ,  $l_{\delta i} / H_i$  – факторы формы продольного и поперечного сечения очага деформации ( $l_{\delta i}$  – длина очага деформации при  $i$ -м обжатии).

Контактную площадь при обжатии в ВВ определяли по измеренным средним значениям толщины  $H_{кзр}$  образцов на контакте (гладкие ВВ) и глубины заполнения ручья (калиброванные ВВ) [6, 7]. Контактную площадь при проглаживании определяли по приведенной к ширине раската после ВВ обжатия толщине  $\Delta H_{нр}$  и ширине после проглаживания  $B_{нр}$  [5].

$$\Delta H_{нр} = H_c B / B_\epsilon \lambda_{\epsilon, сумм} - H_c; \quad (2)$$

$$B_{np} = B_c / \lambda_{np.cym}; \quad (3)$$

$$\lambda_{в.сум} = 0,911 - 0,0003B_0 / H_0 + 0,721 \sum_{i=1}^{i=3} \Delta B_i / B_0 - 0,0124 \sum_{i=1}^{i=3} \Delta B_i / \Delta B_i + 0,075K_{кал}; \quad (4)$$

$$\lambda_{np.cym} = 0,866 - 0,0002B_0 / H_0 + 0,09 \sum_{i=1}^{i=3} \Delta B_i / B_0 - 0,0188 \sum_{i=1}^{i=3} \Delta B_i / \Delta B_i + 0,112K_{кал}, \quad (5)$$

где  $\lambda_{в.сум}$ ,  $\lambda_{np.cym}$  – суммарные осевые вытяжки после ВВ и проглаживания.

Степень заполнения ручья  $K_{зр}$  определяли как отношение глубины заполнения  $B_{зр}$  к глубине ручья ( $K_{зр} = B_{зр} / B_p$ ). Толщина раската на контакте металла со стенками ручья  $H_{кк}$  равна  $H_{кк} = H_c + 2 B_{зр} \delta_p$  или  $H_{кк} = H_c + 2 K_{зр} B_p$ .

На рис. 1–3 приведены графики зависимостей среднего давления металла на ВВ при последовательных обжатиях в гладких и калиброванных ВВ, коэффициенты плеча момента в ВВ, а так же среднего давления и коэффициента плеча момента при проглаживании раскатов в ГВ после обжатий по ширине, от отношения  $B_c / H_c$  и номера (числа) последовательного обжатия в гладких вертикальных валках.

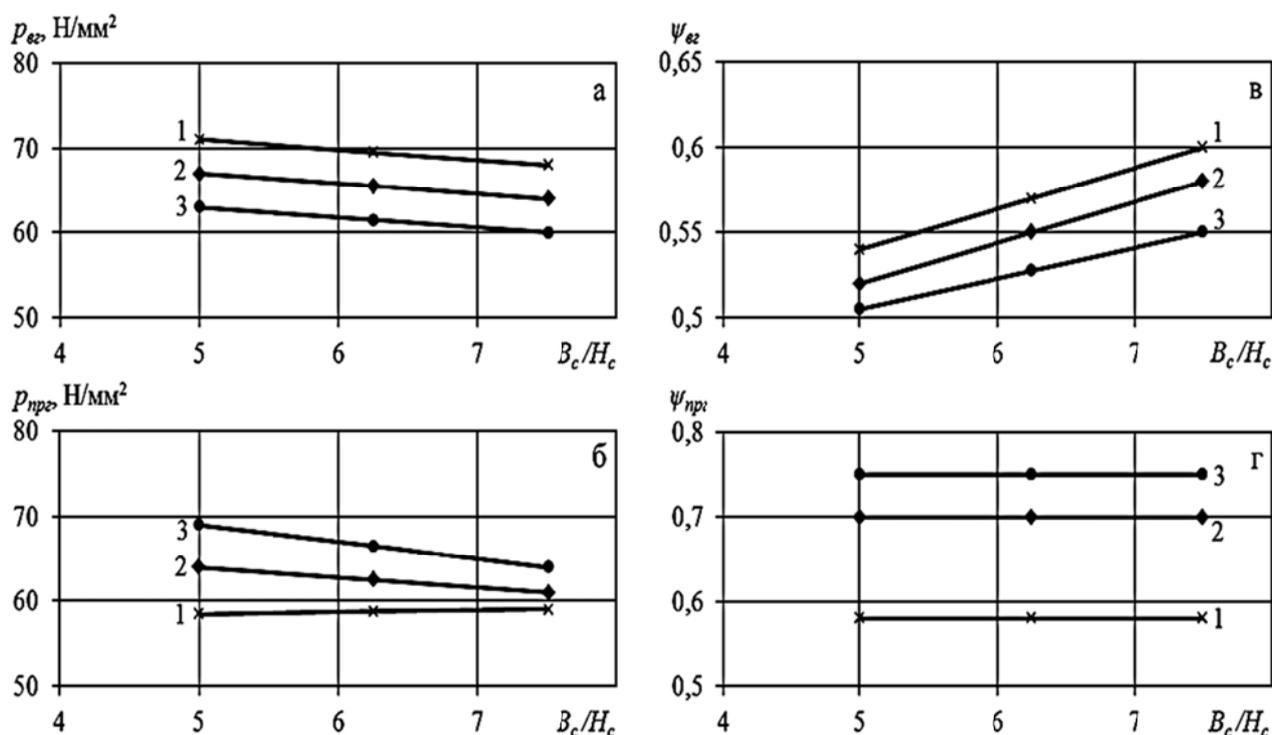


Рис. 1. Зависимость  $p_{ср}$  (а),  $p_{нр}$  (б) и  $\psi_{ср}$  (в),  $\psi_{нр}$  (г) от отношения  $B_c/H_c$  и числа последовательных обжатий в гладких ВВ:

1, 2, 3 – номер последовательного обжатия в гладких вертикальных валках

Из рисунков видно, что среднее давление в вертикальных валках во всех рассмотренных случаях снижается с увеличением отношения  $B_c/H_c$ , что обусловлено более интенсивным ростом контактной площади, чем коэффициента напряженного состояния. При этом сила и момент прокатки с увеличением ширины слябов увеличивается. Среднее давление в гладких вертикальных валках снижается с увеличением числа обжатий, так как с уменьшением ширины снижается коэффициент напряженного состояния и увеличивается контактная площадь.

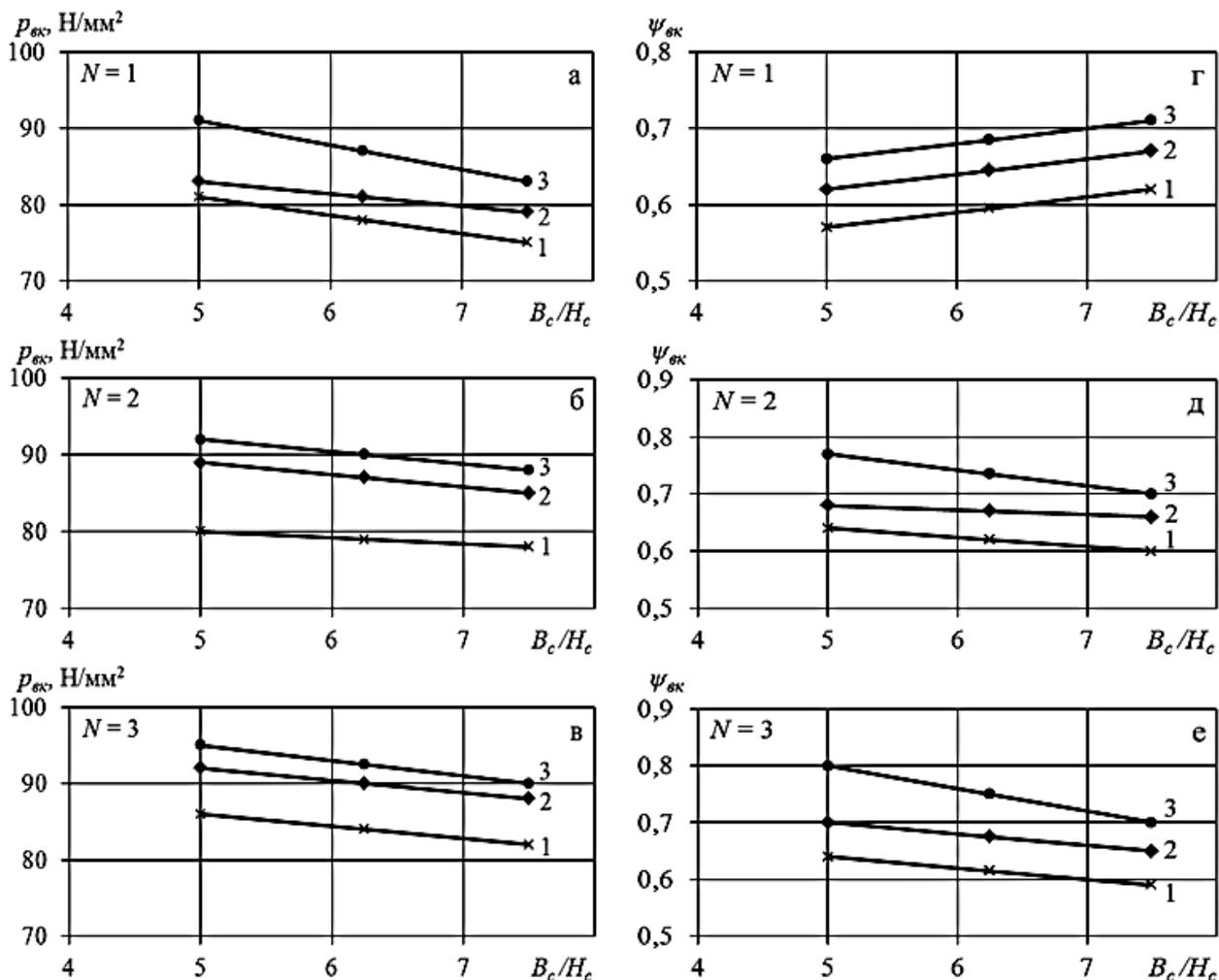


Рис. 2. Зависимость среднего давления металла на валки  $p_{сж}$  (а, б, в) и коэффициента плеча момента  $\psi_{сж}$  (г, д, е) при последовательных обжатиях ( $N$ ) в калиброванных ВВ от отношения  $B_c/H_c$  и значений  $K_{кал}$ :

1 –  $K_{кал} = 1,15-1,2$ ; 2 –  $K_{кал} = 1,25-1,3$ ; 3 –  $K_{кал} = 1,35-1,45$

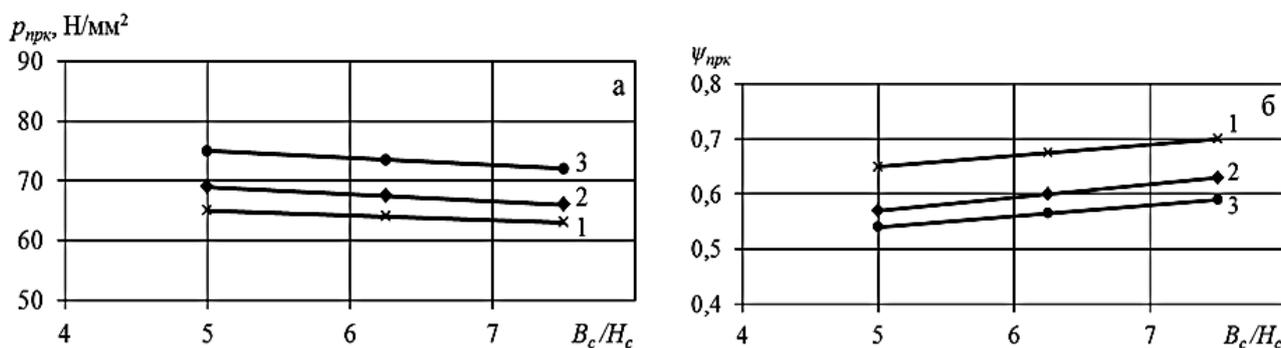


Рис. 3. Зависимость среднего давления металла на валки  $p_{пр}$  (а) и коэффициента плеча момента  $\psi_{пр}$  (б) при проглаживании раската, обжатого в калиброванных ВВ, от отношения  $B_c/H_c$  и числа последовательных обжатий в ВВ:

1, 2, 3 – число последовательных обжатий в калиброванных ВВ

В калиброванных ВВ среднее давление в таких условиях наоборот повышается вследствие преобладающего влияния на рост коэффициента напряженного состояния подпор от стенок ручьев калибра. Коэффициент плеча момента прокатки в гладких ВВ увеличивается

с ростом отношения  $B_c / H_c$  и снижается по последовательным обжатиям. Это обусловлено ростом силы прокатки и увеличением отношения длины очага деформации к толщине на контакте соответственно. Коэффициент плеча момента в калиброванных ВВ во всем диапазоне изменения отношения  $B_c / H_c$  возрастает с увеличением глубины и уменьшением выпуска ручья калибра (с увеличением  $K_{кал}$ ) вследствие увеличения длины очага деформации. Среднее давление проглаживания раскатов, обжатых в гладких и калиброванных ВВ, уменьшается с увеличением отношения  $B_c / H_c$  и увеличивается с числом последовательных обжатий. Такой характер изменения обусловлен уменьшением зоны пластической деформации с ростом ширины и увеличением ее с ростом числа последовательных обжатий в ВВ. Значения коэффициентов плеча момента проглаживания несколько меньше, чем при обжатии в калиброванных вертикальных валках, они увеличиваются с ростом ширины и уменьшаются с увеличением числа обжатий в ВВ. Такой характер обусловлен меньшей длиной пластической зоны деформации на широких слябах и увеличении ее с ростом числа последовательных обжатий в ВВ. При проглаживании раскатов, обжатых в гладких ВВ, картина иная: на всех ширинах с ростом числа обжатий увеличение высоты наплывов более интенсивное, чем увеличение длины зоны пластической деформации.

Для расчета геометрических и силовых параметров процесса редуцирования с многократными обжатиями слябов в ВВ и последующего проглаживания на начальную в ГВ выбрана регрессионная модель вида:

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + B_4 X_4 + B_5 X_5 + B_6 X_6 + \dots, \quad (6)$$

где  $Y = p_{вз}, p_{прз}, \Psi_{вз}, \Psi_{прз}, p_{вкк}, p_{прк}, \Psi_{вк}, \Psi_{прк}$ .

$X = B_c / H_c, K_{кал}, \sum \Delta B_i / B_c, \sum \Delta B_i / \Delta B_{cp}, l_{di} / B_i, l_{di} / H_i$ .

После корреляционно-регрессионной обработки данных получены зависимости в виде многочлена:

$$Y = B_0 + B_1(B_c / H_c) + B_2 K_{кал} + B_3 \sum \Delta B_i / B_c + B_4 \sum \Delta B_i / \Delta B_{cp} + (l_{di} / B_i) + B_6 (l_{di} / H_i). \quad (7)$$

Значения коэффициентов в зависимостях (7) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов (7)

Параметр	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$
$p_{вз}, \text{Н/мм}^2$	111	-1,12	–	-60,6	-4,37	30,0	-35,9
$p_{прз}, \text{Н/мм}^2$	65,5	0,69	–	55,0	-3,34	29,1	-18,3
$\Psi_{вз}$	0,182	0,057	–	-0,90	-0,012	1,71	-0,244
$\Psi_{прз}$	0,529	-0,005	–	-0,054	0,09	-0,038	0,018
$p_{вкк}, \text{Н/мм}^2$	-7,81	-3,64	68,1	53,0	6,71	-224	57,9
$p_{прк}, \text{Н/мм}^2$	45,1	1,0	2,22	24,1	0,574	30,0	-3,73
$\Psi_{вк}$	-0,414	0,036	0,613	0,24	-0,012	0,294	0,007
$\Psi_{прк}$	0,9	-0,009	0,028	0,2	-0,052	-0,747	-0,046

Полученные математические модели (7) адекватны, средняя ошибка аппроксимации и коэффициент множественной корреляции составили  $\varepsilon = 10\text{--}12\%$  и  $R = 0,85\text{--}0,97$ .

### ВЫВОДЫ

При определении среднего давления и коэффициента плеча момента прокатки в вертикальных валках необходимо учитывать историю деформации в предыдущих проходах в виде трансформации формы поперечного сечения, в частности, толщины на контакте с гладкой бочкой и со стенками ручья калибра, а также ширины зоны пластической деформации сжатия.

В виду неопределенности параметров поперечного сечения (кроме ширины) раската после вертикальных валков среднее давление и коэффициент плеча момента при проглаживании раската в горизонтальных валках необходимо определять в зависимости от параметров режима деформации в вертикальных валках.

Полученные адекватные зависимости для расчета силовых параметров обжатия в гладких и калиброванных вертикальных валках и проглаживания в горизонтальных валках могут быть использованы при проектировании режимов редуцирования слябов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровман М. Я. *Усовершенствование технологии прокатки толстых листов* / М. Я. Бровман, Б. Ю. Зеличенко, А. И. Герцев. – М. : Металлургия, 1968. – 256 с.
2. Руденко Е. А. *Экспериментальное исследование силовых параметров процесса редуцирования слябов в калиброванных вертикальных валках* / Е. А. Руденко // *Наукові праці ДонДТУ.* – Донецьк, 2001. – Випуск 31. – С. 86–88. – (Серія «Металургія»).
3. Руденко Е. А. *Моделирование редуцирования сляба с профилированием концов* / Е. А. Руденко, Ю. И. Юрченко // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 490–493.
4. Руденко Е. А. *Расчет силовых параметров редуцирования слябов с многократными последовательными обжатиями в вертикальных валках и ширины раската после прокатки в горизонтальных валках* / Е. А. Руденко, А. П. Митьев, С. Н. Денисов // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 1 (3). – С. 89–93.
5. *Осевая вытяжка при редуцировании сляба в реверсивной универсальной клетки* / Е. А. Руденко, В. Г. Корохов, Р. А. Черковер, А. Е. Лонцкий // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 289–291.
6. Руденко Е. А. *Силовые параметры редуцирования слябов с многократным обжатием в калиброванных вертикальных валках* / Е. А. Руденко, Б. С. Литвиненко, С. В. Саливан // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 63–66.
7. Руденко Е. А. *Исследование параметров формоизменения слябов после многократного обжатия в гладких и калиброванных вертикальных валках* / Е. А. Руденко, Ю. В. Коновалов, М. О. Фролова // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 160–163.

Руденко Е. А. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;  
Коновалов Ю. В. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;  
Фролова М. О. – аспирант ДонНТУ;  
Герасименко С. О. – магистр ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: marinafrolova87@gmail.com

Статья поступила в редакцию 08.01.2013 г.