

Е.А. Руденко /д.т.н./, С.В. Закарлюка /к.т.н./, С.А. Будакова  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ КОНЦОВ РАСКАТА ПРИ ПРОКАТКЕ С ПЕРЕКОСОМ ВЕРХНЕГО ВАЛКА

*Установлены параметры и независимые переменные, определяющие изменение формы концов раската в зависимости от условий прокатки в черновой клети толстолистового стана. Предложен способ прокатки толстых листов с профилированием толщины по ширине сляба и раската в начале каждой стадии прокатки путем перекоса верхнего рабочего вала. Методом физического моделирования на лабораторных станах получены графические и математические зависимости, позволяющие прогнозировать параметры формы концов раската при поперечной (продольной) прокатке с профилированием верхней стороны сляба (промежуточного раската) путем перекоса верхнего рабочего вала.*

**Ключевые слова:** толстый лист, перекоса верхнего вала, профилирование верхней грани, физическое моделирование, форма торцов раската.

### Постановка проблемы

Толстолистовые станы, по сравнению с современными станами горячей прокатки полосы, отличаются большим объемом производства, высокой степенью автоматизации, характеризуются малым выходом годной продукции. При производстве толстых листов показатели совершенствования оборудования и повышения эффективности эксплуатации отстают от возросших требований к качеству продукции и ее свойствам [1]. Выход годного на отечественных толстолистовых станах составляет 0,8...0,85, а на современных станах в Японии и Германии – 0,92...0,93. Высокий выход годного на зарубежных толстолистовых станах обусловлен внедрением управляющих компенсационных технологий, реализуемых системами автоматического управления формой раскатов в плане. Профилирование осуществляется по толщине продольных сечений сляба и промежуточного раската.

Следовательно, сокращение расхода металла за счет уменьшения боковой и концевой обрезки является актуальной задачей [2].

### Анализ последних исследований и публикаций

Основной схемой прокатки толстых листов является продольно-поперечная прокатка. Известно, что наибольшее отклонение раската от прямоугольной формы в плане на концах происходит на стадии поперечной прокатки (разбивки ширины) с большим коэффициентом вытяжки (до 2,5). Выпуклые концы после кантовки раската на 90 град. определяют продольную выпуклость по ширине на стадии продольной прокатки до заданной толщины и, следовательно, величи-

ну боковой обрезки. На продольной стадии прокатки искажается форма раската в плане также на концевых участках раската, что обуславливает концевую обрезь [1...8]. Проблемой регулирования формы раскатов в плане занимаются многие известные фирмы, производящие металлургическое оборудование. Так, в Японии разработан способ (MAC-процесс), при котором с помощью системы управления формой раската в плане рассчитывается переменное по длине раската обжатие. Значение обжатия определяет профиль в последнем проходе при протяжке, что позволяет управлять выпуклостью по ширине вдоль готового раската, и в последнем проходе при разбивке ширины для уменьшения длины неровных концов [2,3]. По данным авторов, после освоения системы на ТЛС 5500 завода в Мидзусиме потери металла в обрезь (на первом этапе освоения системы) снизились с 5,5 до 1,1 %, а выход годного составил 93,8 %, в дальнейшем выход годного на стане 5500 достиг 96 %.

Подобная технология и автоматическая система EGO для ее реализации внедрены французскими фирмами USINOR и CLESIM. Результаты, полученные системой, сопоставимы с японским аналогом.

Фирма VAI (Австрия) разработала систему TruShape. Система дополнена установкой «Ватрон», которая сканирует форму раскатов и имеет обратную связь с системой TruShape для внедрения коррекции в обрабатываемую величину параметров регулирования [4] широких и узких сторон слябов.

Этому вопросу уделено внимание и в работах отечественных исследователей [5...7], которые

направлены на разработку новых схем и методов профилирования широких и узких сторон слябов.

Вместе с тем поиск решений, позволяющих решить проблему улучшения формы раската в плане без значительных капиталовложений, по-прежнему актуален.

**Цель (задачи) исследования**

Целью работы является разработка технологического обеспечения для нового способа управления формой раската в плане. Способ основан на профилировании перед стадиями поперечной и продольной прокатки верхней широкой грани сляба (раската) в виде выпуклой трапеции путем перекоса верхнего рабочего валка. Для этого необходимо определить основные независимые переменные, параметры управления формой раската и получить математические модели прогнозирования параметров.

**Основной материал исследования**

Исследование параметров формоизменения раскатов в плане выполнили путем физического моделирования условий прокатки в горизонтальных валках черновой клети толстолистового стана. Исследования проводили на лабораторных станах кафедры обработки металлов давлением (ОМД) ДонНТУ.

В качестве моделирующего материала использовали свинец. Масштаб моделирования – 1:25. Моделировали процесс поперечной прокатки (разбивки ширины) слябов толщиной 300 мм, шириной 1500 мм и длиной 2000, 2800 и 3800 мм и продольной прокатки промежуточных раскатов толщиной 200, 125 и 75 мм, шириной 2000, 2800 и 3800 мм. Эти размеры перекрывают диапазон размеров слябов и раскатов, которые прокатывают на станах 2800...3600.

В качестве параметров формоизменения раската в плане приняли:  $f_{p.ш.}$  – среднее значение стрелы выпуклости (+) переднего и заднего концов раскатов после разбивки ширины;  $f_{проф+p.ш.}$  – среднее значение вогнутости (-) и выпуклости (+) торца раската при разбивке ширины сляба с предварительно обжатыми на одной трети ширины с обеих сторон кромок путем перекоса верхнего рабочего валка;  $f_{p.ш.}/B$ ,  $f_{проф+p.ш.}/B$  – относительные значения указанных выше параметров;  $f_{проф}$  – среднее значение стрелы вогнутости (-) переднего и заднего концов раскатов, обусловленное влиянием локальных обжатий на кромках сляба.

В качестве независимых переменных, влияющих на форму торцов раската в плане, приняли:  $B/H$ ,  $B/H_p$  – отношение ширины к толщине сляба, промежуточного раската;  $\Delta H_k/H$ ,  $\Delta H_k/H_p$  – отношения обжатия на кромке сляба, раската  $\Delta H_k$  к толщине сляба  $H$ , промежуточного раската  $H_p$  (локальное относительное обжатие);  $\lambda_\Sigma$  – коэффициент суммарной вытяжки сляба (раската) на стадии разбивки ширины и продольной прокатки.

Для исследования подготовили образцы следующих размеров: для слябов – толщина 12 мм; ширина 80, 115, 150 мм; для промежуточных раскатов – толщина 8, 5, 3 мм; ширина 80, 115, 150 мм. Диапазоны изменения независимых переменных составили:  $B/H=(6,67...12,5)$ ;  $B/H_p=(10...50)$ ;  $\Delta H_k=(0,8...1,9)$  мм;  $\Delta H_k/H=(0,046...0,158)$ ;  $\lambda_\Sigma=(1...4)$ .

В первой серии опытов выполнили исследование влияния нарастающей вытяжки  $\lambda_\Sigma$  и отношения  $B/H$  на значение выпуклости концов раската при прокатке сляба в параллельных рабочих валках.

Графики изменения стрелы выпуклости представлены на рис. 1.

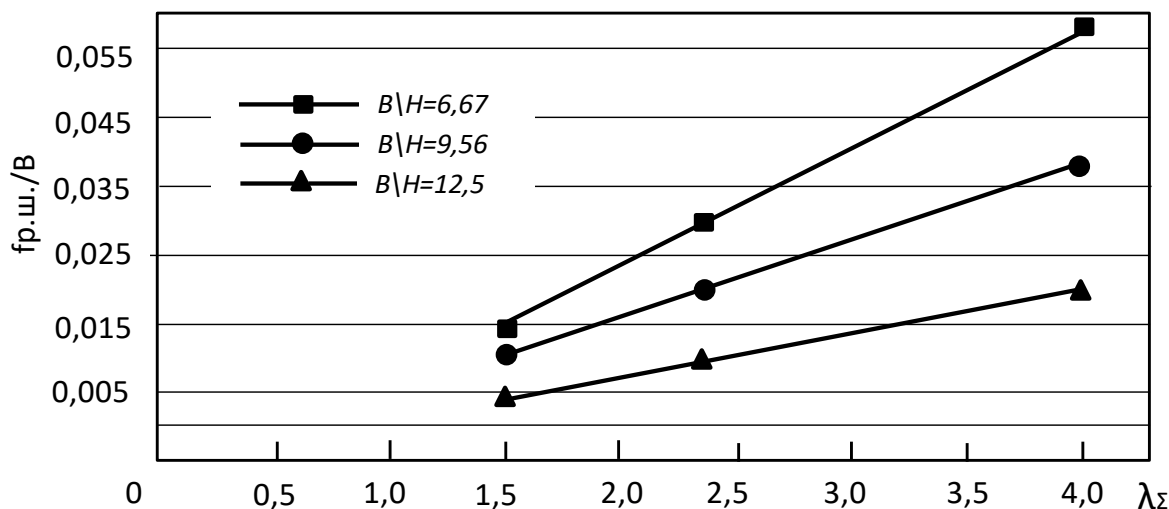


Рис. 1. Прокатка сляба без обжатия локальных участков ширины сляба

Во второй серии опытов моделировали процесс прокатки сляба на стадии разбивки ширины с перекосом верхнего рабочего вала в двух реверсивных проходах.

Изменяя угол перекоса, варьировали обжатием на кромках образцов  $\Delta H_k$  при условии получения скошенных углов на третьей части ширины с каждой из сторон. На рис. 2 показана схема способа прокатки толстых листов с перекосом верхнего вала на угол  $\phi$ . В первом проходе исходный прямоугольный сляб обжимают перекошенными валками только по одной кромке на  $\Delta H_k$  на 1/3 части ширины раската и получают раскат с неравномерным поперечным сечением (рис. 2а). После кантовки осуществляют реверсивный проход, обжимая другую кромку (рис. 2б).

После профилирования верхней широкой грани образцов проглаживали выпуклую верхнюю грань по длине и прокатывали по ширине до заданной толщины (вытяжки) в параллельных горизонтальных валках.

Результаты моделирования для сляба приведены на рис. 3.

В третьей серии опытов моделировали процесс профилирования прямоугольных в плане раскатов толщиной 8,5 и 3 мм в двух реверсивных проходах перед продольной прокаткой путем перекоса верхнего рабочего вала. После профилирования образцы проглаживали по длине и измеряли вогнутость торцов. Результаты моделирования для раскатов приведены на рис. 4.

Анализ результатов исследований показал, что при разбивке ширины непрофилированного сляба (рис. 1) форма концов раската выпуклая. Выпуклость увеличивается с ростом вытяжки и уменьшением ширины. При разбивке ширины сляба со скосами верхней стороны (рис. 3) в первых проходах при малых вытяжках получают вогнутость или выпуклость в зависимости от величины обжатия крайних участков. Величина вогнутости торцов раската возрастает с увеличением обжатия  $\Delta H_k$ . Вогнутость также увеличи-

вается с уменьшением отношения  $B/H$ . Это происходит потому, что уменьшается уширение в поперечном направлении. При профилировании верхней широкой стороны промежуточных раскатов и проглаживании (рис. 4) с увеличением обжатия крайних участков ширины прямоугольного в плане образца и уменьшении ширины (отношения  $B/H_p$ ) увеличивается вогнутость концов.

После математической обработки результатов моделирования получили следующие зависимости:

Для описания формоизменения сляба в первой серии опытов в виде:

$$f_{p.ш.} = B \left( 0,016 - 0,005 \frac{B}{H} + 0,024 \lambda_{\Sigma} + 0,0003 \left( \frac{B}{H} \right)^2 - 0,0022 \frac{B}{H} \lambda_{\Sigma} + 0,0016 \lambda_{\Sigma}^2 \right), \quad (1)$$

где  $b_0$  – наибольшее расстояние от кромки полосы.

Для второй серии опытов:

$$f_{проф+p.ш.} = B \left( 0,016 - 0,005 \frac{B}{H} - 0,133 \frac{\Delta H_k}{H} + 0,024 \lambda_{\Sigma} + 0,0003 \left( \frac{B}{H} \right)^2 - 0,0017 \frac{B}{H} \lambda_{\Sigma} \right). \quad (2)$$

Для третьей серии опытов:

$$f_{проф} = B \left( -0,019 + 0,002 \frac{B}{H_p} - 0,25 \frac{\Delta H_k}{H_p} + 0,366 \left( \frac{\Delta H_k}{H_p} \right)^2 \right). \quad (3)$$

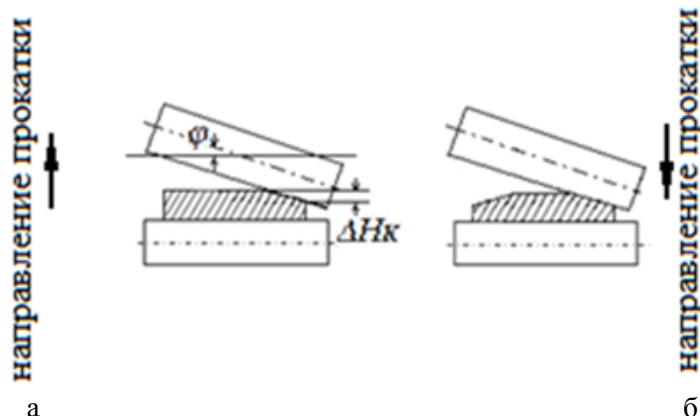


Рис. 2. Схема профилирования верхней стороны поперечного сечения сляба

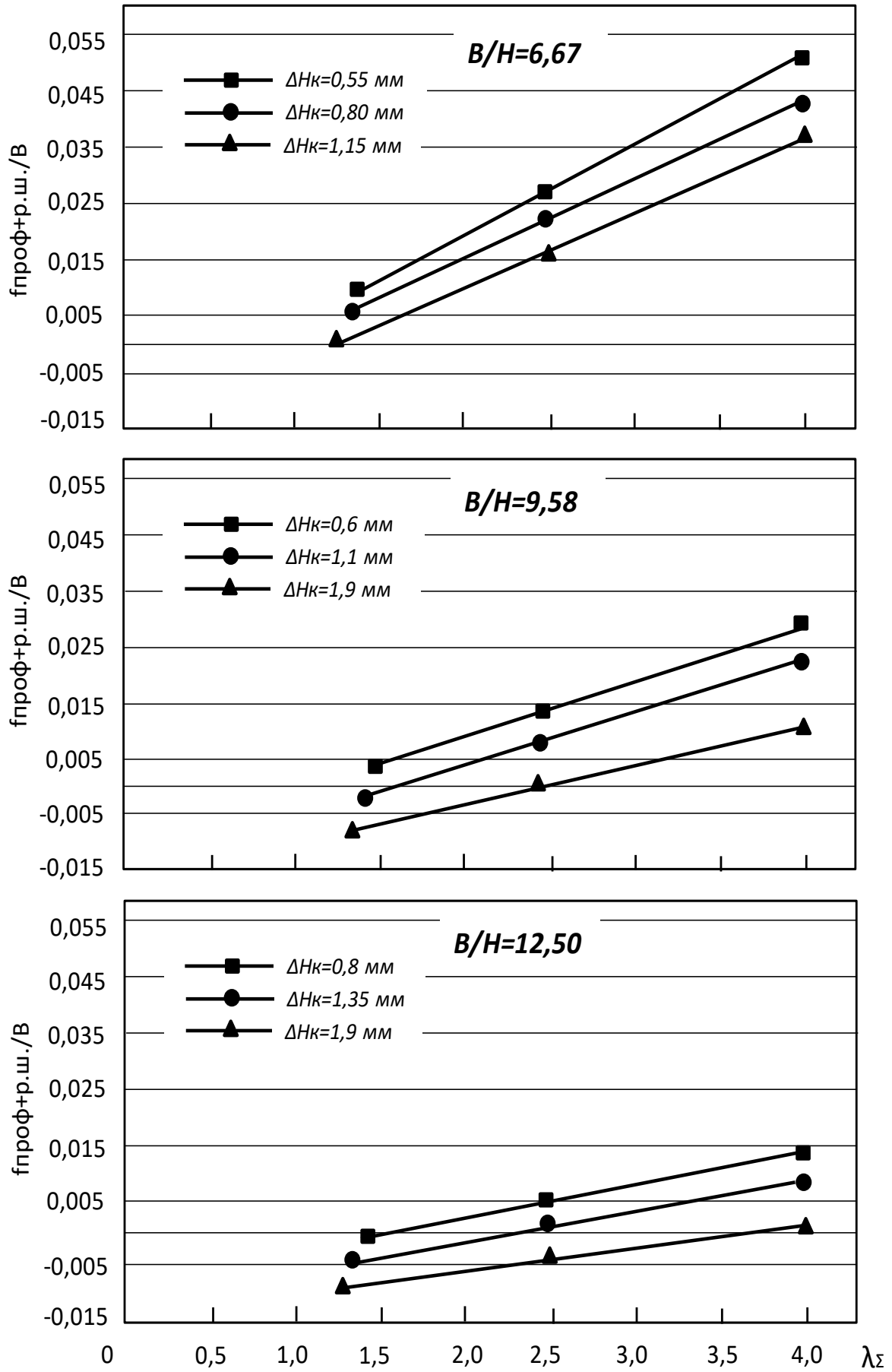


Рис. 3. Влияние вытяжки на параметры формы концов раската при прокатке профилированного сляба

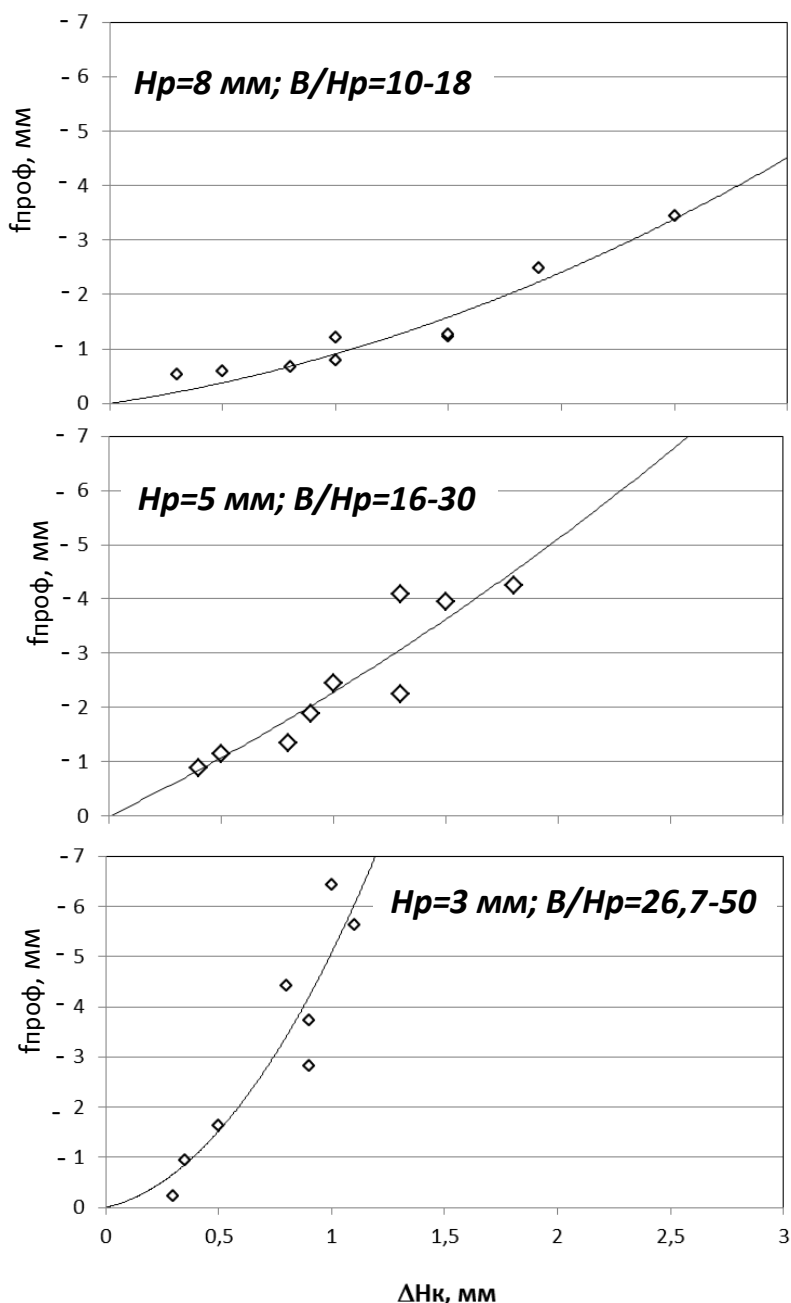


Рис. 4. Влияние обжатия локальных участков ширины около кромок промежуточного раската и отношения ширины к толщине на изменение вогнутости концов

Анализ результатов математической обработки экспериментальных данных показал, что полученные математические модели адекватны, средняя ошибка аппроксимации составляет  $\xi=10...13\%$ ; коэффициент множественной корреляции  $R=0,92...0,97$ .

**Выводы**

Разработаны технологические предпосылки для нового способа управления формой раскатов в плане на стадии поперечной прокатки слябов. Способ основан на профилировании верхней стороны поперечного сечения сляба по толщине в виде выпуклой трапеции путем обжатия кромок

сляба перекошенным верхним рабочим валком перед разбивкой ширины. Реализация способа требует затрат только на систему автоматического управления формой раската в плане. Полученные математические модели параметра формы концов раската в плане могут быть использованы при разработке технологического математического обеспечения системы управления.

**Список литературы**

1. Чемпион, Н.Дж. Современная технология производства толстых листов на станах Стеккеля // Черные металлы. – 2004. – №2. – С. 100-106.

2. Хираи, Н. Увеличение выхода годного при прокатке толстого листа // Тэцу то хаганэ. – 1981. – №15. Т.67. – С. 14-28.
3. Development of New Plan View Pattern Control in Plate Rolling / Н. Watanabe [et al.] // Tetsu-to-Hagane. – 1981. – Iss.15. Vol.67. – P. 2412-2418.
4. Quality control and production optimization in plate mills using the HYDROPLATE system / М. Morel [et al.] // Iron and Steel Engineer. – 1984. – No.5. Vol.61. – P. 48-53.
5. Camber Control Techniques in Plate Rolling/ Y. Tanaka [et al.] // Kawasaki Steel Technical Report. – 1987. – No.16. – P. 12-20.
6. Руденко, Е.А. Новые металлосберегающие способы прокатки толстых листов / Е.А. Руденко, Л.А. Курдюкова // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – №3. – С. 19-25.
7. Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства / А.И. Рудской, В.А. Лунев. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 528 с.
8. Голи-Оглу, Е.А. Совершенствование технологии производства толстолистового проката толщиной до 100 мм на заводе компании НЛМК DANSTEEL / Е.А. Голи-Оглу, З.Н. Грайсен, Ю.М. Бокачев // Черные металлы. – 2015. – №11. – С. 38-42.

**Е.А. Rudenko /Dr. Sci. (Eng.)/, S.V. Zakarlyuka /Cand. Sci. (Eng.)/, S.A. Budakva**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

### STUDY OF THE WORKPIECE ENDS SHAPE WHEN ROLLING WITH SKEWING UPPER ROLL

**Background.** Currently, search is underway to reduce the loss of metal in the crops due to increased crop sides and ends. Technological methods aimed at reducing the crops are preferable. Therefore, it is relevant to develop the proposed method by skewing the upper work roll in the roughing stand at different stages of rolling a thick plate.

**Materials and/or methods.** The simulation was performed on a laboratory rolling mill of the Department of metal forming of Donetsk National Technical University (DonNTU) on a 1:25 simulation scale. Sample sizes were chosen based on the size ratios of slabs (pieces) rolled in industrial conditions. These sizes exceed the size range of slabs, which are rolled on mills 2800-3600. Lead was used as the simulated material, which most accurately reflects the plastic properties of the metal during hot rolling.

**Results.** Technological prerequisites for a new way of controlling the shape of the workpieces in the plan at the stage of transverse rolling of slabs developed. The method is based on profiling the upper side of the slab cross-section in thickness in the form of a convex trapezoid by compressing the edges of the slab with the skewed upper work roll before splitting the width. Mathematical models of the shape parameter of the piece ends in the plan are obtained.

**Conclusion.** The developed method for controlling the piece shape in the plan can be implemented on existing domestic mills. Implementation costs are necessary only to create a system of automatic control of the workpiece shape in the plan, for the implementation of which the underlying mathematical models developed.

**Keywords:** thick plate, upper roll skew, top face profiling, physical simulation, piece ends shape.

#### Сведения об авторах

##### Е.А. Руденко

SPIN-код: 3658-6185  
 Author ID: 847811  
 Телефон: +380 (71) 305-83-10  
 Эл. почта: ewgenij.rudenko@yandex.ua

##### С.В. Закарлюка

SPIN-код: 1491-8334  
 Author ID: 1047389  
 Телефон: +380 (71) 395-06-40  
 Эл. почта: s-zak@mail.ru

##### С.А. Будаква

SPIN-код: 6085-3872  
 Author ID: 1046213  
 Телефон: +380 (71) 395-53-29  
 Эл. почта: budakwa@yandex.ru

Статья поступила 18.10.2019 г.

©Е.А. Руденко, С.В. Закарлюка, С.А. Будаква, 2019  
 Рецензент д.т.н., доц. С.А. Снитко