

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-118-126>
УДК 669.175.2Оригинальная статья**М. Н. Верещагин, Ю. Д. Черниченко, С. В. Шишков****Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
пр. Октября, 48, 246029, Гомель, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ БАНДАЖА НА ПРОФИЛЬ ВАЛКА
ПРИ ДВУХВАЛКОВОМ МЕТОДЕ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКИ РАСПЛАВА**

Аннотация. Представлена модель влияния толщины бандажа валка-кристаллизатора на профиль валка при двухвалковом методе быстрой закалки расплава. Установлено, что путем изменения толщины стенок бандажа валков можно корректировать профиль получаемой полосы. Кроме того, увеличение длины распределительного сопла при неизменных условиях способствует равномерному расширению центральной части валка, что связано с формированием однородного термоупругого напряженного состояния в бандаже. Экспериментальные исследования показали, что увеличение длины сопла и уменьшение толщины стенки бандажа снижают неравномерность температурного расширения и уменьшают деформации профиля валка. Эти параметры напрямую влияют на характеристики затвердевшего поверхностного слоя и, как следствие, на качество получаемой полосы после прокатки. Получение тонкой непрерывнолитой полосы позволяет полностью исключить из технологической цепочки ряд операций, оставив лишь станы холодной прокатки и отделочное оборудование. Это дает возможность снизить капитальные затраты и потребление энергоносителей, а также повысить экологическую чистоту производства. Данная технология хорошо согласуется с концепцией «микроразводов» для производства стальной полосы небольшими партиями и определенного сортамента в соответствии с индивидуальными требованиями заказчиков. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании оборудования для двухвалковой быстрой закалки расплава, в частности при конструировании валкового кристаллизатора.

Ключевые слова: термоупругая деформация, валок-кристаллизатор, быстрая закалка, тонкая полоса, разнотолщинность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Верещагин Михаил Николаевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлургия и технологии обработки материалов» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», <https://orcid.org/0000-0001-7846-3636>, e-mail: vereschagin@gstu.by; *Черниченко Юрий Дмитриевич* – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Вышая математика» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», <https://orcid.org/0000-0002-3682-4402>, e-mail: chern@gstu.by; *Шишков Сергей Владимирович* – старший преподаватель кафедры «Мобильные и технологические комплексы» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», <https://orcid.org/0000-0002-1563-5207>, e-mail: serg_vsh@mail.ru

Вклад авторов: *Верещагин Михаил Николаевич* – формулировка концепции статьи, постановка задачи исследований, проведение исследований по методу двухвалковой быстрой закалки расплава, создание рукописного варианта и редактирование окончательного текста статьи, обобщение результатов исследований и формулировка выводов; *Черниченко Юрий Дмитриевич* – создание варианта теоретической модели и обобщение результатов исследований; *Шишков Сергей Владимирович* – компьютерный расчет теоретических зависимостей температурного режима бандажа валка-кристаллизатора и его деформационного прогиба, построение графического материала для иллюстрации результатов исследований, оформление статьи в электронном виде.

Для цитирования: Верещагин, М. Н. Влияние толщины бандаж на профиль валка при двухвалковом методе быстрой закалки расплава / М. Н. Верещагин, Ю. Д. Черниченко, С. В. Шишков // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 118–126. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-118-126>

Поступила в редакцию: 28.07.2025

Доработанный вариант: 27.03.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

Mikhail N. Vereshchagin, Yuri D. Chernichenko, Sergey V. Shishkov*

Sukhoi State Technical University of Gomel, 48, Octiabria Ave., 246029, Gomel, Republic of Belarus

EFFECT OF THE BANDS THICKNESS ON THE PROFILE OF THE ROLLER IN THE TWO-ROLLER METHOD OF FAST HARDENING OF THE MELT

Abstract. A model is presented for the effect of the thickness of the crystallizer roll bandage on the roll profile in the two-roll method of rapid melt hardening. It is established that by changing the wall thickness of the roll band, the profile of the resulting strip can be adjusted. In addition, an increase in the length of the distribution nozzle under constant conditions contributes to a more uniform expansion of the central part of the roll, which is associated with the formation of a more uniform thermoelastic stress state in the bandage. Experimental studies have shown that an increase in the nozzle length and a decrease in the wall thickness of the bandage reduce the unevenness of the thermal expansion and reduce the deformation of the roll profile. These parameters directly affect the characteristics of the hardened crust and, as a result, the quality of the resulting strip after rolling. Obtaining a thin continuously cast strip makes it possible to completely exclude a number of operations from the technological chain, leaving only cold rolling mills and finishing equipment. This makes it possible to reduce capital costs and energy consumption, as well as improve the environmental friendliness of production. The use of efficient two-roll rapid melt quenching technology provides high quality steel products at low selling prices. This technology fits well with the concept of “micro-mills” for the production of steel strip in small batches and a specific range in accordance with individual customer requirements. The research results can be used in the design of equipment for two-roll rapid melt quenching, in particular in the design of a roll crystallizer.

Keywords: thermoelastic deformation, mold roller, rapid hardening, thin strip, variation in thickness

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Mikhail N. Vereshchagin* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department “Metallurgy and Materials Processing Technologies” at Sukhoi State Technical University of Gomel, <https://orcid.org/0000-0001-7846-3636>, e-mail: vereschagin@gstu.by; *Yuri D. Chernichenko* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Higher Mathematics” at Sukhoi State Technical University of Gomel, <https://orcid.org/0000-0002-3682-4402>, e-mail: chern@gstu.by; *Sergey V. Shishkov* – Senior Lecturer of the Department “Mobile and Technological Complexes” at Sukhoi State Technical University of Gomel, <https://orcid.org/0000-0002-1563-5207>, e-mail: serg_vsh@mail.ru

Contribution of the authors: *Mikhail N. Vereshchagin* – formulation of the article concept, setting the research objectives, conducting research using the two-roll rapid melt quenching method, creating the manuscript and editing the final text of the article, summarizing the research results and formulating the conclusions; *Yuri D. Chernichenko* – development of a theoretical model and summarizing the research results; *Sergey V. Shishkov* – computer calculation of the theoretical dependencies of the temperature regime of the crystallizer roll bandage and its deformation deflection, creation of graphic material to illustrate the research results, preparation of the article in electronic format.

For citation: Vereshchagin M. N., Chernichenko Yu. D., Shishkov S. V. Effect of the bands thickness on the profile of the roller in the two-roller method of fast hardening of the melt. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 118–126 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-118-126>

Received: 28.07.2025

Modified: 27.03.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Формирование тонкой металлической полосы при использовании двухвалкового метода быстрой закалки расплава представляет собой сложный процесс, который включает в себя множество факторов, связанных с технологией непрерывного литья, в частности продольную и поперечную вариативность толщины изделия. В ходе работы валки подвергаются неравномерному нагреву, что приводит к изменению их первоначальной геометрии. Для обеспечения минимального отклонения по толщине и сохранения высокой плоскостности полосы необходимо стабилизировать зазор между валками.

В настоящее время в ряде стран наблюдается повышенный интерес к технологии двухвалковой быстрой закалки расплава, применяемой для получения изделий с неравноосной микроструктурой. Это объясняется упрощенной схемой производства и снижением как энергетических, так и финансовых затрат.

Как правило, двухвалковый метод используется преимущественно для производства лент толщиной от 0,2 до 4,0 мм [1–3]. Изготовление тонких полос напрямую из расплава дает возможность исключить большинство промежуточных технологических стадий, оставляя лишь финальную обработку с помощью станов холодной прокатки и отделочных операций. Такой подход позволяет снизить капитальные вложения в 4–10 раз [4; 5].

Ограничения по толщине продукции обусловлены двумя ключевыми факторами. Во-первых, достижение высокой скорости охлаждения (порядка 10^4 – 10^5 °C/с) в зазоре между валками возможно только при эффективном теплоотводе, что устанавливает верхнюю границу толщины. Во-вторых, при производстве очень тонких лент возрастает доля площади контакта с валками относительно объема металла, что ухудшает качество продукции. Дополнительные сложности создают повышенные требования к точности геометрии, качеству поверхности, а также физико-механическим характеристикам получаемых лент. В частности, поперечная неоднородность толщины влияет на равномерность деформации при последующей холодной прокатке.

С экономической и технологической точек зрения важно получать тонкие ленты с минимальными отклонениями по геометрии и форме.

Постановка задачи. Процесс формирования тонкой полосы является результатом комплексного взаимодействия множества факторов, включая продольную и поперечную разнотолщинность, а также особенности технологии непрерывного литья с применением двух валков-кристаллизаторов. Во время работы валки подвергаются неравномерному нагреву, что приводит к изменению их первоначального профиля [6]. Поскольку полоса формируется в узком зазоре между валками, поддержание стабильности этого зазора критически важно для получения изделия с высокой плоскостностью и минимальными перепадами по толщине.

Правильный подбор начального профиля поверхности валков, а также оптимизация толщины и материала водоохлаждаемых бандажей позволяют существенно снизить вариации по толщине в литой полосе [2; 6].

Валки являются одним из самых важных компонентов процесса двухвалковой быстрой закалки расплава, которые определяют качество получаемой ленты и ее стоимость. Управление распределением вытяжки по ширине прокатываемой ленты после ее намораживания решает задачи снижения поперечной разнотолщинности полосы за счет изменения прогиба с помощью тепловой профилировки и износа валков, равномерности охлаждения намораживаемого металла, режимов прокатки.

Изгиб и сплющивание валков при прокатке вызывает неравномерность распределения средних нормальных напряжений поперек очага деформации. Неравномерен по длине бочки и износ валков, что обуславливает изменение установившейся формы зазора между валками.

На величину и характер износа влияют: усилие прокатки, скорость прокатки, условия контактного взаимодействия валков и ленты, шероховатость поверхности валков [7]. Под механизмом износа валков понимается истирание бочки валка вследствие скольжения металла по поверхности валка, образующего очаг деформации, в направлении прокатки [7]. Неравномерность износа по длине бочки валка обуславливается различными силовыми и температурными условиями прокатки, неодинаковой микротвердостью различных участков поверхностного слоя валка.

Существенное влияние на поперечную разнотолщинность оказывает поперечная разнотолщинность подката, то есть вид поперечного профиля намороженного на валки металла, а также его распределение по ширине. Реальные профили поперечного сечения намороженного на валки металла имеют некоторую несимметричность, обусловленную неравномерной выработкой валков и колебаниями температуры по ширине ленты.

Когда исходный подкат имеет выпуклый профиль, а лента после прокатки стала прямоугольной, то центральная часть подката, имевшая большую толщину, подвергается большему обжатию, чем края. Если же исходный подкат имеет вогнутый профиль, а лента после прокатки стала прямоугольной, то в результате пластической деформации по краям ленты возникает волнистость.

Из различных видов профилей быстрозакаленной ленты предпочтительным относительно последующего процесса горячей прокатки является выпуклый профиль. При последующей холодной прокатке данная лента хорошо удерживается на средней части прокатных валков и характеризуется минимальной склонностью к образованию местных утолщений. Выпуклый профиль лучше обрабатывается при дрессировке.

В общем случае для получения высокоточных холоднокатаных лент разнотолщинность получаемых после двухвалковой закалки-прокатки расплава полос не должна превышать 0,02–0,08 мм по ширине в зависимости от назначения подката и его толщины [8].

Результаты исследования и их обсуждение. Для получения высокоточных ровных лент необходимо в процессе прокатки регулировать форму межвалкового зазора для обеспечения постоянства вытяжек по ширине лены. Тепловое регулирование профиля валков позволяет влиять на размеры прокатной щели и обеспечивать требуемую форму лент.

Одним из важных элементов процесса двухвалкового метода быстрой закалки расплава является толщина бандажа валка. Бандаж подвергается термоупругой деформации за счет воздействия на него находящегося в межвалковом пространстве теплового поля расплава, а также деформации сжатия валков для обеспечения устойчивого процесса прокатки на мороженного металла в валках-кристаллизаторах с достижением геометрических характеристик полосы.

Температурный режим бандажа валка-кристаллизатора при быстрой закалке расплава определяется уравнением теплопроводности [9]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \Delta T + f(r, \varphi, z, t), \quad (1)$$

где $T(r, \varphi, z, t)$ – текущая температура валка-кристаллизатора; Δ – оператор Лапласа в цилиндрической системе координат; a^2 – коэффициент температуропроводности; $f(r, \varphi, z, t)$ – функция, описывающая действие теплового источника.

Температурное поле валка-кристаллизатора находится в области $r \in (R_1, R_2)$, $\varphi \in (0, 2\pi)$, $z \in (z_1, z_2)$, $F_0 > 0$. Функция $f(r, \varphi, z, t)$ представляется следующим образом [9]:

$$f(r, \varphi, z, t) = \frac{Q_0}{C_p \rho S_0} \delta(r - R_0) [\theta(z - z_1) - \theta(z - z_2)] [\theta(\varphi - \varphi') - \theta(\varphi - \varphi' - 2\varphi_0)], \quad (2)$$

$$\varphi' = \omega \sum_{k=0}^{\infty} (t - t_k) [\theta(t - t_k) - \theta(t - t_{k+1})]; \quad t_k = \frac{2\pi k}{\omega},$$

где $S_0 = z\varphi_0 R_0(z_2 - z_1)$ – область действия источника тепла (расплав, находящийся в межвалковом пространстве).

Физическая модель определяет температурное поле цилиндрической оболочки конечной толщины при действии распределенного теплового источника, который вращается вокруг оси с постоянной угловой скоростью.

Решение уравнения (1) представляется в виде отклонения $\Delta T(r, \varphi, z, t)$ от решения $T = T_0 + \Delta T$ стационарной задачи при граничных условиях [9]:

$$\left. \frac{\partial T_0}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T_0}{\partial z} \right|_{z=L} = 0; \quad \left. \frac{\partial T_0}{\partial r} + \alpha_2 T_2 \right|_{r=R_2} = \alpha_2 R_2; \quad \left. \frac{\partial T_0}{\partial r} - \alpha_1 T_1 \right|_{r=R_1} = -\alpha_1 T_1. \quad (3)$$

Здесь T_1 , T_2 – температура воздуха и воды; R_1 , R_2 – внутренний и наружный радиусы бандажа ($\delta = R_1 - R_2$ – толщина стенки бандажа валка-кристаллизатора); $\alpha_1 = \frac{K_1}{\lambda}$; $\alpha_2 = \frac{K_2}{\lambda}$ (K_1 , K_2 – коэффициенты теплообмена внутренней поверхности бандажа с водой и теплообмена внутренней поверхности бандажа с воздухом; λ – коэффициент теплопроводности материала бандажа).

Температуру бандажа валка-кристаллизатора находим из решения интегрального уравнения [9]

$$T(r, \varphi, z, t) = \sum_{m,n} \left\{ \left[\int_0^t d\tau \exp \left[-\alpha^2 \beta_{k,m,n}^2 (t - \tau) \right] F_{k,m,n}^{(c)}(\tau) T_{k,m,n}^{(c)}(r, \varphi, z) \right] + \right. \\ \left. + \left[\int_0^t d\tau \exp \left[-\alpha^2 \beta_{k,m,n}^2 \left[-\alpha^2 \beta_{k,m,n}^2 (t - \tau) \right] F_{k,m,n}^{(s)}(\tau) T_{k,m,n}^{(s)}(r, \varphi, z) \right] \right] \right\}. \quad (4)$$

Численное решение интегрального уравнения (4) для распределения температуры вращающегося банджа валка-кристаллизатора при быстрой закалке расплава показало, что:

1) с ростом коэффициента F_0 (время) увеличение толщины стенки банджа ведет к увеличению амплитуды колебаний его температуры;

2) средняя температура банджа с ростом времени имеет вид плавно возрастающей кривой, которая вырождается в прямую;

3) уменьшение толщины банджа ведет к выравниванию средней температуры, а резкое уменьшение его толщины приводит к установлению квазистационарного режима охлаждения вследствие малости термического сопротивления материала банджа кристаллизатора;

4) распределение средней температуры по длине банджа существенно зависит от длины щели сопла для подачи расплава и толщины стенки банджа [9].

Термоупругая деформация банджа для плоского напряженного состояния находится из распределения температуры вращающегося валка-кристаллизатора. Для определения деформации рассматривается уравнение упругого равновесия в отсутствии тепловых источников и внешних сил [10]:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = 0, \quad (5)$$

где σ_{ik} – тензор напряжений:

$$\sigma_{ik} = \frac{E}{1+\nu} \left(U_{ik} + \frac{\nu}{1-2\nu} U_{ll} \delta_{ik} \right); \\ U_{ik} = \frac{1}{E} \left[(1+\nu) \sigma_{ik} - \nu \sigma_{ll} \delta_{ik} \right]; \\ U_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right), \quad (6)$$

где E – модуль упругости Юнга; ν – коэффициент Пуассона; $U_{ll} = U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} = \sum U_{ii}$; U_{ik} – тензор деформации.

Смещения в цилиндрической системе координат записываются следующим образом:

$$U_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r}; \quad U_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial U_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{U_r}{r}; \quad U_{zz} = \frac{\partial U_z}{\partial z}; \\ 2U_{\varphi z} = \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \varphi} + \frac{\partial U_\varphi}{\partial z}; \quad 2U_{zz} = \frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r}; \\ 2U_{r\varphi} = \frac{\partial U_\varphi}{\partial z} - \frac{U_\varphi}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \varphi}; \\ \bar{U} = U_r \bar{e}_r + U_\varphi \bar{e}_\varphi + U_z \bar{e}_z, \quad (7)$$

где $\bar{U}$ – смещения.

Решение уравнений (5)–(7) дает выражение для радиального смещения точек наружной поверхности банджа, которое обусловлено тепловым воздействием расплава [11]:

$$U_r|_{r=R_2} = \frac{2}{3\pi R_2} \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_0 \int_0^t d\tau \sum_{\substack{k=0,1,\dots \\ m,n=1,2,\dots}}^\infty \exp \left[-a^2 \lambda_{m,n}^{2(k)} (t - \tau) \right] \times \\ \times \frac{1}{\lambda_n^{2(k)}} \cos \beta_m^{(k)} z \left\{ \sin k\varphi F_{k,m,n}^{(c,s)}(\tau) + \cos k\varphi F_{k,m,n}^{(c,c)}(\tau) \right\}. \quad (8)$$

Потенциал термоупругого перемещения наружных точек банджа валка-кристаллизатора определяется по формуле [11]

$$\Delta\psi = \frac{1+\nu}{3(1-\nu)}\alpha_m T, \quad (9)$$

где ψ – потенциал упругого перемещения; α_m – коэффициент теплового расширения металла банджа.

Из выражений (8) и (9) находится тепловая деформация банджа (δ_{th}) валка-кристаллизатора при двухвалковой быстрой закалке расплава.

Данный процесс (закалка расплава) с точки зрения поперечной разнотолщинности может быть представлен в виде:

$$\delta_{сум} = \delta_{th} - \frac{1}{EI} \frac{p_m L^3}{24}, \quad (10)$$

где E – модуль Юнга материала банджа; L – длина банджа; p_m – удельное давление прокатки на мороженного металла; I – момент инерции сечения банджа, $I = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \frac{(D-2s)^4}{D^4} \right]$; D и s –

наружный диаметр и толщина стенки банджа соответственно. Второй член выражения (10) характеризует упругую податливость очага деформации в радиальном направлении (δ_d) при прокатке на мороженного металла.

Анализируя выражение (10), можно сделать следующие выводы: при значительной толщине стенки банджа упругая податливость очага деформации незначительна, то есть $\delta_{th} \gg \delta_d$ и $\delta_d = \delta_{th}$. При толщине банджа $s \rightarrow 1$ мм тепловая деформация $\delta_{th} \rightarrow 0$. В этом случае преобладает радиальная деформация банджа, причем его продольный профиль будет иметь выпуклый характер.

Данный профиль быстроокаленной ленты является предпочтительным с точки зрения последующего процесса холодной прокатки. В процессе двухвалковой закалки расплава валки неравномерно нагреваются и изменяют свой первоначальный профиль [2].

Стабильный межвалковый зазор при температуре литья очень важен для получения полосы с минимальной разнотолщинностью и хорошей плоскостностью. Подбор начальной профилировки поверхности валка с выбором оптимальной толщины водоохлаждаемого банджа валка позволяет свести к минимуму разнотолщинность литой полосы (рис. 1) [2; 11].

На рис. 2 и 3 представлены результаты теоретических расчетов поперечного профиля банджа валка-кристаллизатора в соответствии с выражением (10).

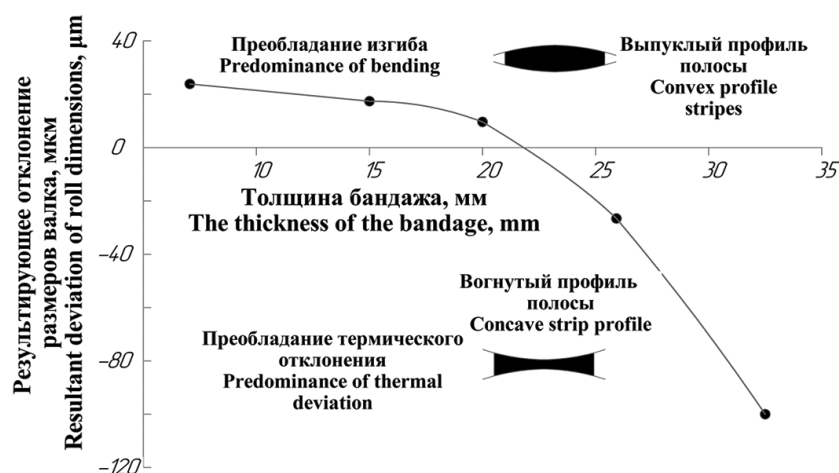


Рис. 1. Влияние толщины банджа валка на общее отклонение размеров валка и профиль бочки
 Fig. 1. Influence of the roll bandage thickness on the overall roll size deviation and barrel profile

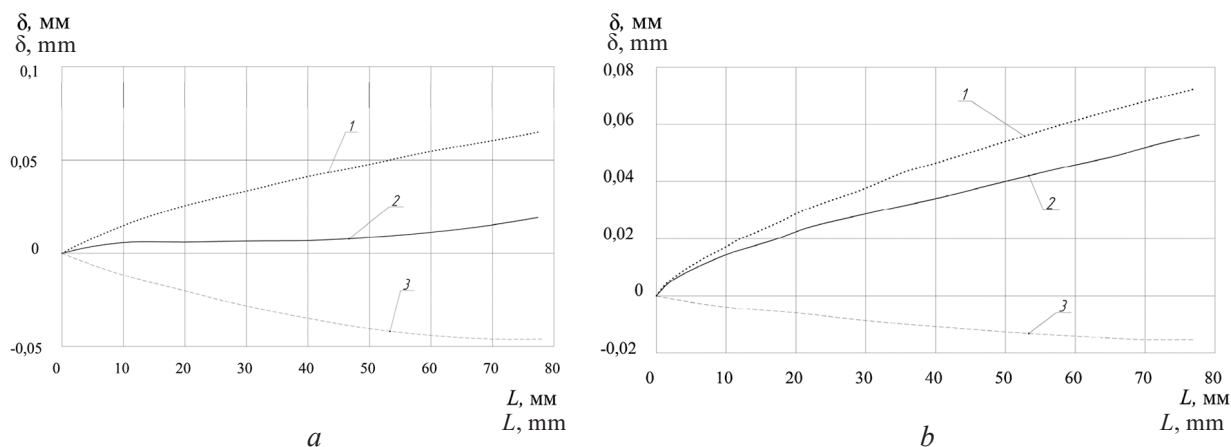


Рис. 2. Термический δ_{th} (кривая 1), деформационный δ_d (кривая 2) и суммарный δ_{sum} (кривая 3) прогибы валков: диаметр валков $D_b = 200$ мм; длина бандажа $L = 80$ мм; толщина бандажа: $a - s = 1.5$ мм, $b - s = 5$ мм

Fig. 2. Thermal δ_{th} (curve 1), deformation δ_d (curve 2), and total δ_{sum} (curve 3) deflections of the rolls: roll diameter $D_b = 200$ mm; bandage length $L = 150$ mm; bandage thickness: $a - s = 1.5$ mm, $b - s = 5$ mm

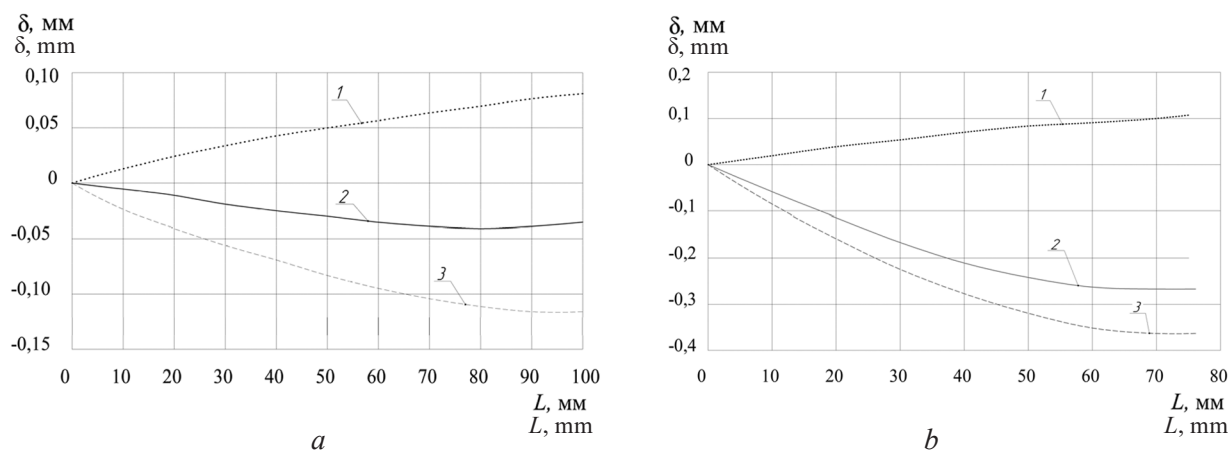


Рис. 3. Термический (δ_{th} , кривая 1), деформационный (δ_d , кривая 2) и суммарный (δ_{sum} , кривая 3) прогибы валков: диаметр валков $D_b = 200$ мм; толщина бандажа: $s = 1.5$ мм; длина бандажа: $a - L = 100$ мм, $b - L = 80$ мм

Fig. 3. Thermal (δ_{th} , curve 1), deformation (δ_d , curve 2), and total (δ_{sum} , curve 3) deflections of the rolls: roll diameter $D_b = 200$ mm; bandage thickness $s = 1.5$ mm; bandage length: $a - L = 100$ mm, $b - L = 80$ mm

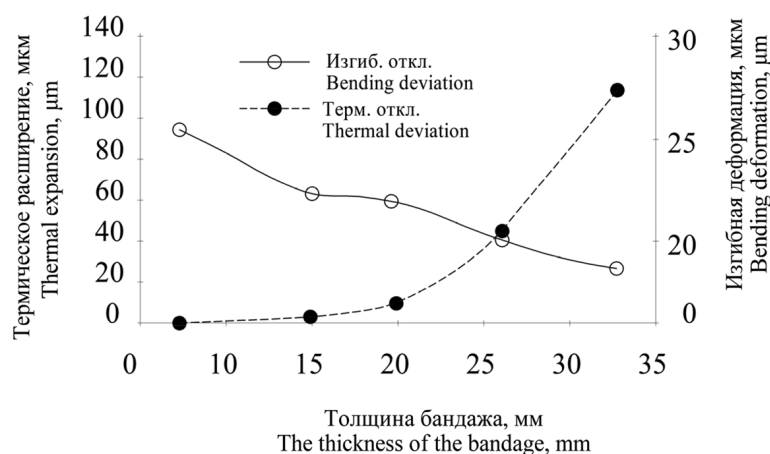


Рис. 4. Влияние толщины бандажа валка на термическое и изгибное отклонение профиля валка [2]

Fig. 4. Influence of the roll bandage thickness on the thermal and bending deviation of the roll profile [2]

Результаты экспериментального исследования влияния толщины бандаж валка-кристаллизатора на тепловую деформацию наружной поверхности последнего и изгибную деформацию валка в радиальном направлении представлены на рис. 4. Они хорошо иллюстрируют теоретические расчеты, представленные выше.

Заключение. Рассмотрена теоретическая модель влияния толщины бандаж валка-кристаллизатора на профиль валка при двухвалковом методе быстрой закалки расплава.

Доказано, что распределение вытяжки по ширине прокатываемой ленты после ее наморачивания обеспечивает снижение поперечной разнотолщинности полосы за счет изменения прогиба с помощью тепловой профилировки и износа валков, равномерности охлаждения наморачиваемого металла и установления режимов прокатки.

Показано, что уменьшение толщины стенки бандаж обуславливает уменьшение тепловой деформации валка и преобладание выпуклости профиля полосы. В свою очередь увеличение длины сопла при прочих равных условиях приводит к уменьшению неравномерности термического расширения валка.

Установлено, что оптимизация толщины стенки бандаж и его длины обеспечивает получение правильного поперечного профиля сечения быстрозакаленной ленты с минимальной разнотолщинностью и плоскостностью.

Получение тонкой непрерывнолитой полосы позволяет полностью исключить из технологической цепочки ряд операций, оставив лишь станы холодной прокатки и отделочное оборудование, что дает возможность снизить капитальные затраты и потребление энергоносителей, а также повысить экологическую чистоту производства. Использование эффективной технологии двухвалковой быстрой закалки расплава обеспечивает получение стальной продукции высокого качества при низких отпускных ценах. Данная технология хорошо согласуется с концепцией «микрозаводов» для производства стальной полосы небольшими партиями и определенного сортамента в соответствии с индивидуальными требованиями заказчиков.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании оборудования для двухвалковой быстрой закалки расплава, в частности при конструировании валкового кристаллизатора.

Список использованных источников

1. Запускалов, Н. М. «Микрозавод» – новая концепция металлургии / Н. М. Запускалов // Черные металлы. – 2004. – № 11. – С. 10–24.
2. Zapuskalov, N. Effect of technological factors on strip profile in twin-roll casting process / N. Zapuskalov, M. Vereschagin // ISIJ International. – 1998. – Vol. 38, № 10. – P. 1107–1113. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.1107>
3. Зюзин, В. И. Технология прокатного производства / В. И. Зюзин, А. В. Третьяков. – М.: Металлургия, 1991. – 862 с.
4. Economics of strip casting on future steel production / B. Lindorfer, K. Schwaha, J. Spiess, G. Houze // Steel Times. – 1993. – Vol. 22, iss. 7. – P. 304–305, 307.
5. Hendricks, C. Strip casting technology – A revolution in steel industry / C. Hendricks // Metallurgical Plant and Technology International. – 1995. – № 3. – P. 42–49.
6. Blejde, W. Application of Fundamental Research at Project 'M' / W. Blejde, R. Mahapatra, H. Fukase // The Belton Memorial Symposium Proceedings, January 10–11, 2000, Sydney, Australia. – Warrendale: Iron & Steel Society, 2000. – P. 253–261.
7. Zapuskalov, N. Wear of roll surface in twin-roll casting of 4,5% Si steel strip / N. Zapuskalov, M. Vereschagin // ISIJ International. – 2000. – Vol. 40, № 6. – P. 589–596. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.589>
8. Высокоточная прокатка тонких листов / [А. Ф. Пименов, В. П. Полухин, Ю. В. Липухин и др.]. – М.: Металлургия, 1988. – 175 с.
9. Верещагин, М. Н. Температурный режим валка-кристаллизатора при двухвалковой закалке расплава / М. Н. Верещагин, Ю. Д. Черниченко // Весті Акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 1993. – № 4. – С. 58–62.
10. Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – Изд. 4-е. – М.: Наука, 1987. – 248 с. – («Теоретическая физика», т. VII).
11. Двухвалковая быстрая закалка расплава / М. Н. Верещагин, Н. И. Запускалов, И. В. Агунович, Ю. Д. Черниченко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 298 с.

References

1. Zapuskalov N. M. “Microplant” – a new concept in metallurgy. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2004, no. 11, pp. 10–24 (in Russian).
2. Zapuskalov N., Vereschagin M. Effect of technological factors on strip profile in twin-roll casting process. *ISIJ International*, 1998, vol. 38, no. 10, pp. 1107–1113. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.1107>
3. Zyuzin V. I., Tret'yakov A. V. *Rolling Production Technology*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 862 p. (in Russian).
4. Lindorfer B., Schwaha K., Spiess J., Houze G. Economics of strip casting on future steel production. *Steel Times*, 1993, vol. 22, iss. 7, pp. 304–305, 307.
5. Hendricks C. Strip casting technology – A revolution in steel industry. *Metallurgical Plant and Technology International*, 1995, no. 3, pp. 42–49.
6. Blejde W., Mahapatra R., Fukase H. Application of Fundamental Research at Project ‘M’. *The Belton Memorial Symposium Proceedings, January 10–11, 2000, Sydney, Australia*. Warrendale, Iron & Steel Society, 2000, pp. 253–261.
7. Zapuskalov N., Vereschagin M. Wear of roll surface in twin-roll casting of 4,5% Si steel strip. *ISIJ International*, 2000, vol. 40, no 6, pp. 589–596. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.589>
8. Pimenov A. F., Polukhin V. P., Lipukhin Yu. V., Radyukevich L. V., Traino A. I., Durnev V. D. *High-Precision Rolling of Thin Sheets*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 176 p. (in Russian).
9. Vereshchagin M. N., Chernichenko Yu. D. Temperature conditions of the crystallizer roll during two-roll melt quenching. *Vestsi Akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 1993, no. 4, pp. 58–62 (in Russian).
10. Landau L. D., Livshits E. M. *Theory of Elasticity*. 3rd ed. Pergamon Press, 1986. 187 p.
11. Vereshchagin M. N., Zapuskalov N. I., Agunovich I. V., Chernichenko Yu. D. *Two-Roll Rapid Melt Quenching*. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel Publ., 2019. 298 p. (in Russian).