

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

Румянцев М.И., Завалищин А.Н., Колыбанов А.Н., Ахмадиев К.Р.

ОСОБЕННОСТИ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОСЫ НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ И ИХ ОТОБРАЖЕНИЕ В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ ПРОЦЕССА

Аннотация. Одна из локальных задач цифрового двойника процесса холодной прокатки состоит в выборе таких натяжений, которые будут способствовать получению полосы заданного качества с необходимой производительностью. Так как влияние натяжения на процесс прокатки не однозначно, задача выбора рационального натяжения представляет собой задачу многокритериальной оптимизации, что затрудняет применение цифрового двойника в режиме реального времени. Для обоснования величины натяжения при использовании цифрового двойника в режиме реального времени изучены зависимости натяжения от параметров процесса на различных участках станов холодной прокатки – на входе в первую клетку, в межклетевых промежутках, на выходе из последней клетки и при смотке. По результатам исследования построены множественные аппроксимации, достоверные с доверительной вероятностью 95%.

Указанные аппроксимации отображают известный положительный опыт работы различных станов холодной прокатки полос и позволяют разрабатывать энергоэффективные технологии производства холоднокатаного проката различного назначения с повышенным качеством поверхности (в том числе высокопрочного) на станах различных видов прокатки. Разработан алгоритм функции «Первое приближение режима натяжений» цифрового двойника процесса холодной прокатки.

Ключевые слова: процесс холодной прокатки, стан холодной прокатки, цифровой двойник, натяжение полосы, натяжение на входе в первую клетку, натяжение в межклетевых промежутках, натяжение на выходе из последней клетки, натяжение при смотке, уровень натяжения, качество поверхности полосы, энергоэффективность.

Введение

На основании меморандума, опубликованного консорциумом промышленного интернета [1], цифровой двойник (ЦД) можно рассматривать как цифровое отображение характеристик состояния и поведения некоторого объекта с целью достижения целей проектирования, производства эксплуатации или обслуживания. Принципиальной особенностью цифрового двойника является постоянный обмен информацией с отображаемой физической системой [2]. На основании данных о ее текущем состоянии ЦД должен прогнозировать поведение системы, генерировать и передавать ей информацию, необходимую для изменений, которые обеспечат достижение цели функционирования системы в следующие моменты времени.

Процесс холодной прокатки (ХП) осуществляется системой «Стан холодной прокатки – Полоса» (СХП-П), цель функционирования которой – получении продукции заданного качества в необходимом количестве [3]. Для достижения указанной цели важное значение имеет начальная настройка стана (СХП). Соответственно, ЦД системы СХП-П должен обладать функциями синтеза рациональных режимных параметров прокатки и определения на их основе необходимых управляющих воздействий на элементы СХП.

Важной составляющей режима прокатки является натяжение, которое считают стабилизирующим фактором процесса [4, 5]. Однако объективно возник-

ающая неравномерность распределения натяжения по ширине полосы может привести как к неплоскостности, так и к обрыву полосы [4–7]. Переднее натяжение снижает нагрузку на двигатель клетки, но заднее натяжение, создаваемое той же клетью, увеличивает нагрузку двигателя. При рациональном превышении переднего натяжения над задним в клетях непрерывного стана суммарные энергозатраты уменьшаются на 2,5–5,6% [8], а превышение заднего натяжения над передним может вызвать пробуксовку валков по полосе. В то же время при рациональном превышении заднего натяжения над передним повышается качество поверхности полосы за счет улучшения отпечатываемости микрогеометрии валков на ее поверхности и уменьшения остаточной загрязненности [9].

Неоднозначность влияния натяжения на процесс прокатки обуславливает необходимость для его обоснования решать задачу многокритериальной оптимизации с учетом динамических явлений в СХП-П [10–11]. Однако при этом осложняется работа цифрового двойника в режиме реального времени. Поэтому целесообразно применять зависимости, которые, отображая опыт работы различных станов холодной прокатки, позволят выбирать рациональные натяжения в режиме реального времени.

Натяжение в межклетевых промежутках

Исследование режимов прокатки на пятиклетевом стане 2000, совмещенном с травильным агрегатом [12] показало, что в межклетевых промежутках наблюдается небольшое превышение усилия переднего натяжения Q_{i1} над задним Q_{0i} (рис. 1, а). Для них

показатель $\Delta Q_i/b_0 = (Q_{0i} - Q_{1i})/b_0$ (здесь b_0 – ширина полосы на входе в стан) отрицательный и примерно постоянный (в пределах от -0,01 до -0,03 кН/мм). В то же время для клетки 1 превышение переднего натяжения над задним (область 1 на рис. 1, а) более значительное (от -0,05 до -0,12 кН/мм). В клетях 5, из которой полоса выходит на моталку, наоборот, наблюдается превышение заднего натяжения над передним, которое достигает 0,2 кН/мм (область 2 на рис. 1, а).

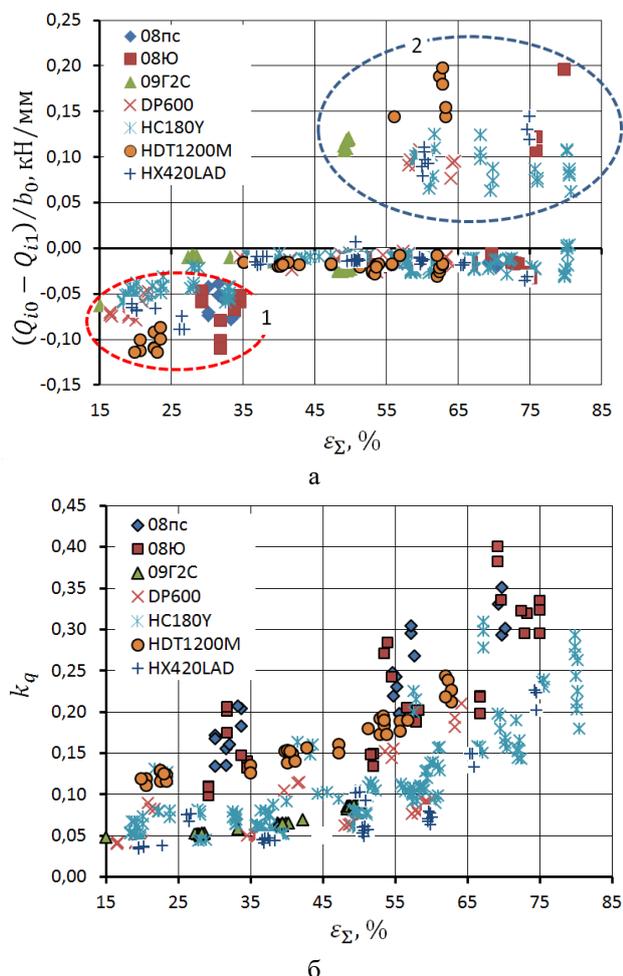


Рис. 1. Особенности соотношения между передним и задним усилиями натяжения на участках стана холодной прокатки (а) и уровень межклетевого натяжения в зависимости от суммарного накопленного обжатия (б)

На рис. 1 величина $\epsilon_{\Sigma i} = 100(H_0 - h_i)/H_0$ представляет собой суммарное накопленное обжатие от толщины подката H_0 до толщины полосы h_i на выходе из i -й клетки. Величина $\epsilon_{\Sigma i}$ не влияет на $\Delta Q_i/b_0$ (см. рис. 1, а), но является значимым фактором уровня межклетевых натяжений (см. рис. 1, б) $k_q = q_1/\sigma_T$ (здесь q_1 – среднее удельное переднее натяжение; σ_T

– предел текучести полосы). В исследовании [13] получена следующая аппроксимация уровня натяжений между клетями стана холодной прокатки:

$$k_{qi} = 0,16 + 8 \cdot 10^{-6} \epsilon_{\Sigma i}^2 + \left(1 - \frac{325}{\sigma_H}\right) \times \left[0,103 - 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{R}{h_i}\right] - 0,4 \cdot \left(1 - \frac{325}{\sigma_H}\right)^2, \quad (1)$$

$$(R^2 = 0,963; F_p = 553,074; F_{95} = 2,406),$$

где σ_H – предел текучести подката, МПа; R – радиус бочки рабочего вала; R^2 – показатель достоверности аппроксимации; F_p – расчетное число Фишера; F_{95} – табличное число Фишера при доверительной вероятности 95%.

Натяжение на выходе из последней клетки

На выходе из последней клетки (номер N) натяжение может создаваться либо моталкой (как на станах 1700, 630 и 2500 ММК), либо натяжными роликами (как на станах 2000 ММК и 2000 НЛМК). При сматывании полосы в рулон для обеспечения необходимой плотности смотки среднее удельное натяжение со стороны моталки q_{cm} должно быть не менее 25-30 МПа, а для предотвращения сваривания витков – не более 100 МПа [14]. Э.А. Гарбер рекомендует [15] использовать при смотке удельное натяжение q_{1N} примерно в 5 раз меньше, чем в последнем межклетевом промежутке $q_{0N} : q_{cm} = q_{1N} = (0,20 - 0,22) q_{0N}$. На практике соотношение q_{1N}/q_{0N} может изменяться от 0,15 до 0,55. При толщине полос более 1,5 мм интервал разброса сужается до 0,15–0,30 (рис. 2, а). Отчетливого влияния толщины на q_{1N}/q_{0N} не проявляется, но достаточно четко наблюдается взаимосвязь между толщиной и удельным натяжением (рис. 2, б).

На величину q_{1N} также влияют способ создания натяжения, а также соотношения b_0/h_k и R/h_k . На станах 2000 ММК и 2000 НЛМК, которые работают в режиме бесконечной прокатки, переднее натяжение в последнем проходе создается специальными тянущими роликами. При толщине полосы менее 1 мм натяжение находится в пределах от 50-100 МПа и снижается до 10-30 МПа в случае прокатки более толстых полос. Отображением указанных закономерностей является аппроксимация

$$q_{1N} = 81,6 + 0,098 R/h_k - h_k (14,71 - 0,034 b_0/h_k), \quad (2)$$

$$(R^2 = 0,869; F_p = 190,163; F_{95} = 2,711).$$

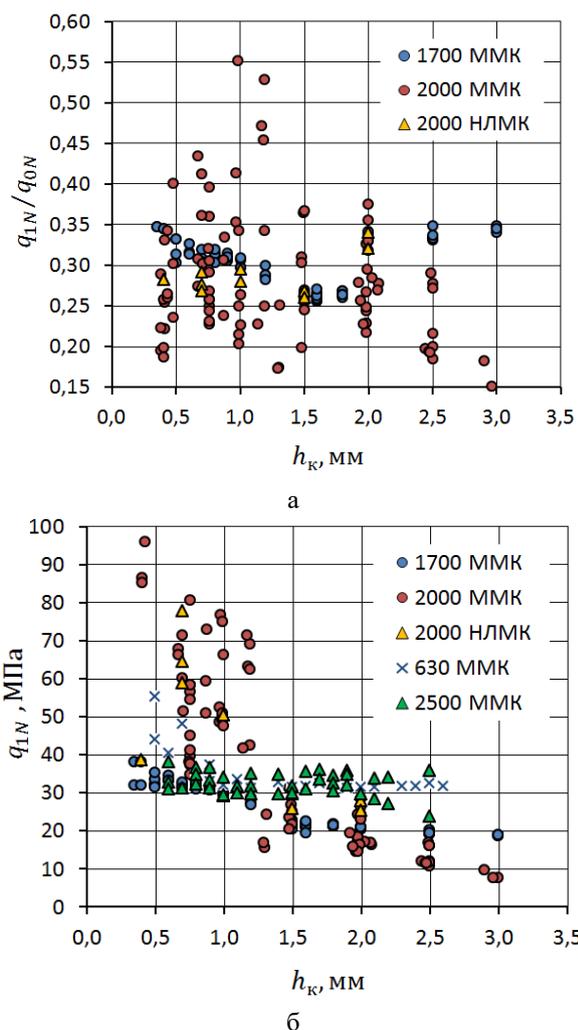


Рис. 2. Зависимость переднего натяжения в последнем проходе при холодной прокатке на различных станах от толщины полосы

На станах 1700, 630 и 2500 ММК натяжение после последнего прохода создается моталками. В таких случаях удельное натяжение находится в пределах 40-60 МПа при толщине полосы до 1,5 мм и снижается до 20-40 МПа при $h_k > 1,5$ мм. Аппроксимация указанных закономерностей имеет вид

$$q_{1N} = 51,1 + 0,033R/h_k - h_k (0,005b/h_k + 0,061R/h_k), \quad (3)$$

($R^2=0,893$; $F_p=239,246$; $F_{95}=2,660$).

Натяжение на входе в первую клеть

Заднее натяжение в первом проходе приложено к горячекатаному подкату. Чем больше усилие Q_{01} , тем выше устойчивость полосы относительно линии прокатки и меньше вероятность трансформации в первой клетке неплоскостности подката в складки на полосе. Однако чрезмерное натяжение подката может стать причиной образования на полосе дефекта «полосы-

линии скольжения», пробуксовок валков и перегрузки их привода [14, 15, 16]. По данным Э.А. Гарбера [15] рациональное заднее среднее удельное натяжение в первом проходе q_{01} составляет 0,2–0,5 от величины переднего натяжения в том же проходе q_1 . Исследования, выполненные нами на станах 1700 и 2000 ММК (рис. 3), показали, что указанное соотношение наблюдается на стане 2000, где натяжение на входе в первую клеть создается специальными натяжными роликами, и при этом с увеличением толщины подката отношение q_{01}/q_1 уменьшается. На стане 1700, где натяжение на входе в первую клеть создается барабанным разматывателем, соотношение q_{01}/q_1 колеблется в пределах от 0,15 до 0,20 и при этом увеличение толщины подката возрастает (рис. 3, а). Наиболее четко особенности влияния толщины подката проявляются в изменчивости среднего удельного натяжения (рис. 3, б).

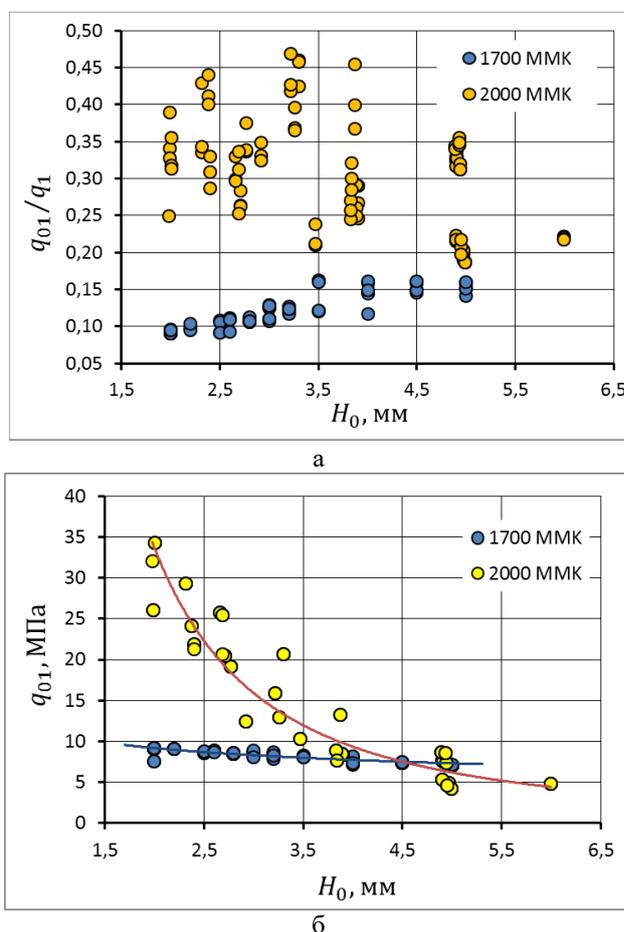


Рис. 3. Зависимость заднего натяжения при холодной прокатке в первом проходе от толщины подката

Таким образом, натяжение подката необходимо характеризовать средним удельным натяжением, а рациональную величину выбирать в зависимости от особенностей оборудования, создающего натяжения.

В случае применения натяжных роликов

$$q_{01} = 1010 \cdot H_0^{-1,918} (b_0/H_0)^{-0,337}, \quad (4)$$

($R^2 = 0,915$; $F_p = 471,354$; $F_{95} = 3,104$).

Если натяжение создается размотателем, то

$$q_{01} = 10,54 \cdot H_0^{-0,255} (b_0/H_0)^{0,007}, \quad (5)$$

($R^2 = 0,8965$; $F_p = 376,79$; $F_{95} = 3,124$).

Алгоритм обоснования первого приближения режима натяжений

С учетом изложенных результатов разработали алгоритм синтеза первого приближения режима рациональных натяжений, блок-схема которого представлена на рис. 4.

Сначала определяется удельное натяжение подката. Если горячекатаная полоса поступает непосредственно с размотателя, используется формула (5). Если применяются натяжные ролики, расчет выполняется по формуле (4). Затем вычисляются усилие и уровень натяжения подката. Далее вычисляются уровень натяжения, а также удельное и полное натяжение в межклетевых промежутках. В последнем проходе при

прокатке на станах, на которых полоса поступает непосредственно на моталку, величина q_{1N} определяется по формуле (3). Если перед моталкой установлены натяжные ролики, переднее натяжение в переднем проходе задается на основании зависимости (2). По найденным значениям удельных натяжений определяются усилие и уровень натяжения.

Заключение

Для обоснования величины натяжения полосы при использовании цифрового двойника процесса холодной прокатки в режиме реального времени изучены особенности натяжения на различных участках станов холодной прокатки. Построены множественные аппроксимации, которые отображают известный положительный опыт работы различных станов с доверительной вероятностью 95 %. На основании указанных зависимостей разработан алгоритм функции «Первое приближение режима натяжений» цифрового двойника процесса холодной прокатки, который позволяет разрабатывать энергоэффективные технологии производства холоднокатаного проката различного назначения с повышенным качеством поверхности (в том числе высокопрочного) на станах различных видов.

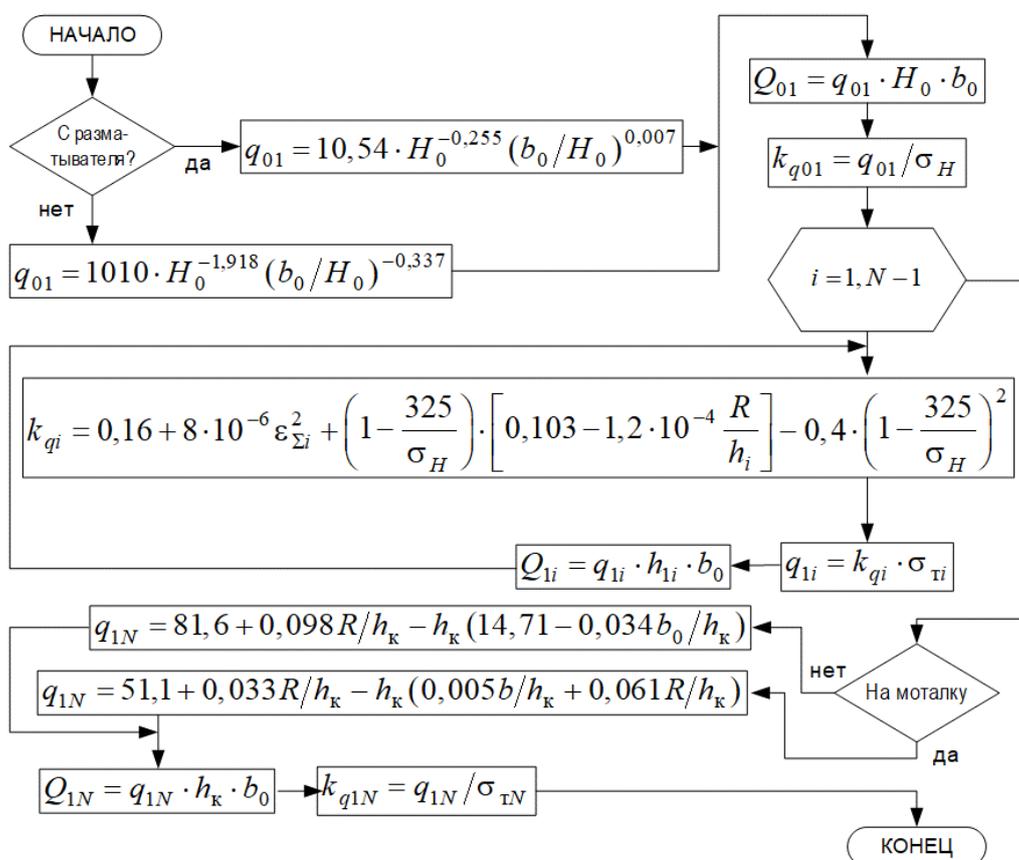


Рис. 4. Алгоритм функции «Обоснование первого приближения режима натяжений» цифрового двойника процесса холодной прокатки

Список литературы

1. Malakuti S., van Schalkwyk P., Boss B., Sastry C.R., Runkana V., Lin S.-W., Rix S., Green G., Beachle K., Nath S.V. Digital Twins for Industrial Applications 2020. Available online: https://www.iiconsortium.org/pdf/ИС_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf (accessed on 27 April 2020).
2. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства / Радионов А.А., Карандаев А.С., Логинов Б.М., Гасиярова О.А. // Известия вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 1. С. 54-68. DOI:10.17213/0136-3360-2021-1-54-68.
3. Румянцев М.И. Методы разработки и улучшения технологий производства проката для совершенствования листопрокатных технологических систем // Теория и технология металлургического производства. 2017. №4 (23). С. 26-36.
4. Железнов Ю.Д., Кузнецов В.Л., Рокотян Г.Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. М.: Металлургия, 1975. 376 с.
5. Настич В.П., Божков А.И. Управление качеством холоднокатаных полос. М.: Интернет Инжиниринг, 2006. 216 с.
6. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. М.: Теплотехник, 2008. 336 с.
7. Формоизменение полосы при тонколистовой прокатке / С.М. Бельский, И.П. Мазур, С.Н. Лежнев, Е.А. Панин. Темиртау: КГИУ, 2016. 161 с.
8. Shalaevskiy D.L., Kozhevnikov A.V. Algorithm and design methodology for energy-efficient sheet products production technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 4. Ser. "4th International Scientific and Technical Conference on Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy, SATPIFM 2019" 2020. С. 012015.
9. Влияние режимов холодной прокатки и микрогеометрии валков на шероховатость холоднокатаных полос / Э. А. Гарбер, П. Б. Горелик, Е. В. Делигенский [и др.] // Производство проката. 1999. № 6. С. 7-10.
10. Shafiei B., Ekramian M., Shojaei K. Robust tension control of strip for 5-stand tandem cold mills // *Journal of Engineering*. 2014. Vol. 2014. P. 13.
11. Kozhevnikov A., Kozhevnikova I., Bolobanova N. Development of the model of cold rolling process in dynamic conditions // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 366-372.
12. Анализ особенностей режимов работы травильно-прокатного агрегата 2000 ОАО «ММК» / Б.А. Сарычев, С.В. Денисов, А.В. Горбунов, М.И. Румянцев [и др.] // Труды IX конгресса прокатчиков. 2013. С. 141-146.
13. Обоснование натяжения полосы в цифровом двойнике стана холодной прокатки / М.И. Румянцев, А.Н. Завалицин, А.Н. Колыбанов, О.Н. Есипова // Черные металлы. 2021. № 11. С. 55-60. DOI: 10.17580/chm.2021.11.10.
14. Эффективная технология холодной прокатки тонколистовой стали на непрерывных станах / Ф.И. Зенченко, А.В. Ноговицын, В.Л. Мазур [и др.] // Сталь. 1985. № 1. С. 43-48.
15. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). М.: ОАО «Черметинформация», 2004. 416 с.
16. Tarnopolskaya T., Yuen W. Y. D. Analysis of the Effect of Tension at the Entry of Cold Rolling Mill on the Stability of Strip Tracking // *ISIJ International*, vol. 45 (2005), no. 9, pp. 1316-1321.

Сведения об авторах

Румянцев Михаил Игоревич – профессор кафедры технологий обработки материалов, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru

Завалицин Александр Николаевич – профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zavall313@mail.ru

Колыбанов Алексей Николаевич – аспирант кафедры технологий обработки материалов, группа МТа-19-2, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: aleexeev@gmail.com

Ахмадиев Кирилл Радикович – студент программы бакалавриата, группа ММп-18-2, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kirill.ahmadiev97@gmail.com

STRIP TENSION FEATURES AT DIFFERENT A COLD ROLLING MILL SECTIONS AND DISPLAY IN THE DIGITAL TWIN OF THE PROCESS

Rumyantsev Mikhail I. – Professor of the Department of Material processing, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru

Zavalishchin Aleksandr N. – Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaval1313@mail.ru

Kolybanov Alexey N. – Postgraduate student of the Department of Material processing, group МТa-19-2, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleeexeev@gmail.com

Akhmadiev Kirill R. – Undergraduate student, group ММп-18-2, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kirill.ahmadiev97@gmail.com

Abstract. One of the local tasks of the cold rolling process the digital twin is the tensions selection that will contribute to obtaining a given quality strip with the required productivity. Since the tension influence on the rolling process is not unambiguous, the problem of choosing a rational tension is a multi-criteria optimization problem, which makes it difficult to use the digital twin in real time. To substantiate the tension magnitude when using a digital twin in real time, the tension dependences on the process parameters have been studied at different cold rolling mills sections - at the entrance to the first stand, in the inter-stand gaps, at the exit from the last stand and during coiling. According to the study results, multiple approximations were constructed, reliable with a confidence level of 95%.

These approximations reflect the well-known positive experience of various cold-strip mills and allow the development energy-efficient technologies for the cold-rolled steel production for various purposes with an increased surface quality (including high-strength) on various rolling mills. The function the algorithm "The tension mode first approximation" of the cold rolling process digital twin has been developed.

Keywords: cold rolling process, cold rolling mill, digital twin, strip tension, tension at the entrance to the first stand, tension in the inter-stand gaps, tension at the exit of the last stand, tension during coiling, tension level, strip surface quality, energy efficiency

Ссылка на статью:

Особенности натяжения полосы на различных участках стана холодной прокатки и их отображение в цифровом двойнике процесса / М.И. Румянцев, А.Н. Завалишин, А.Н. Колыбанов, К.Р. Ахмадиев // Теория и технология металлургического производства. 2022. №1(40). С. 19-24.

Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N., Kolybanov A.N., Akhmadiev K.R. Strip tension features at different a cold rolling mill sections and display in the digital twin of the process. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 40, no. 1, pp. 19-24.