

УДК 621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ НА ПЛОСКОСТНОСТЬ ТОНКИХ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ КАЧЕСТВА

©2024 г. Д.Л. Шалаевский

ФГБОУ ВО Череповецкий государственный университет, Череповец
E-mail: dlshalaevskii@chsu.ru

Поступила в редакцию 22 января 2024 г.

После доработки 29 марта 2024 г. принята к публикации 17 апреля 2024 г.

Сформулирован критерий оценки появления дефектов плоскостности на горячекатаной стальной полосе. Реализован подход к определению вида и амплитуды дефекта формы, учитывающий геометрическую характеристику сечения и свойства листа. На основе созданной методики оценки неплоскостности горячекатаной полосы выполнено ранжирование технологических факторов, оказывающих влияние на показатели плоскостности. Выявленные наиболее значимые технологические воздействия на процесс позволили сформулировать подход к расчету параметров горячей прокатки.

Ключевые слова: непрерывная горячая прокатка; плоскостность катаных стальных полос; обжатие полосы; амплитуда неплоскостности.

Характеристика плоской формы стальной полосы — один из важнейших показателей качества, определяющий применимость готовой продукции для ее дальнейшей обработки прокаткой, штамповкой и резанием. В настоящее время известны разные подходы к оценке плоскостности катаных листов в виде моделей формирования плоскостности, которые условно можно сгруппировать в четыре категории:

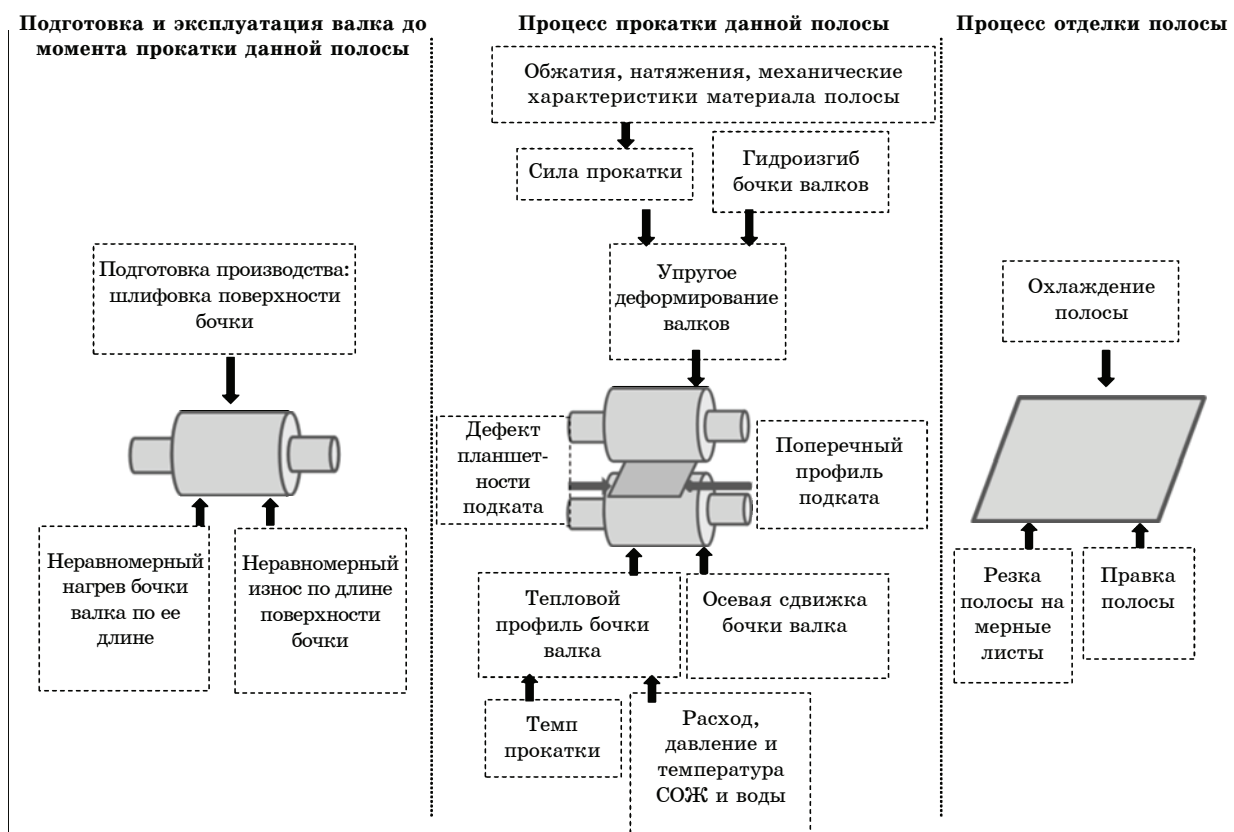
- модели, позволяющие оценить наличие дефекта плоской формы по разности коэффициентов вытяжек на ширине полосы [1—3];
- модели, оценивающие наиболее рациональную форму поперечного сечения полосы, при обеспечении которой будет гарантирована высокая плоскостность готовой продукции [4—7];
- модели, ставящие в основу причин потери плоской формы полосой технологию ее охлаждения после прокатки и распределение температуры по объему в полосе [8—12];
- модели, оценивающие плоскостность готовых полос только по параметрам рабочих и опорных валков [13—17].

Следует отметить, что параметры, учтенные в обобщенных моделях, в разной степени оказывают влияние на вероятность возникновения дефектов формы катаного стального листа.

Причины, по которым готовая полоса приобретает на своей поверхности дефекты, могут возникнуть на любом этапе производства (фиг. 1). Представленная схема содержит все основные факторы, в той или иной степени определяющие неплоскостность готовых полос на отдельных этапах горячей прокатки. В соответствии со схемой по воздействию на плоскостность указанные факторы можно разделить на три группы: первая содержит причины, определяемые состоянием рабочих валков во время подготовки к прокатке и в период эксплуатации до прокатки данной полосы, а в двух других указаны технологические факторы соответственно на этапе прокатки полосы и на этапе ее отделки.

Из указанных на фиг. 1 факторов к управляющим можно отнести следующие:

- шлифовка поверхности бочки валка перед завалкой его в клеть;
- обжатие полосы в клетях;



Фиг. 1. Технологический факторы, определяющие плоскостность катаных полос на разных этапах горячей прокатки

- гидроизгиб бочки рабочего валка;
- темп прокатки, расход смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) или воды, подаваемой на поверхность бочки рабочего валка;
- осевая сдвижка бочки рабочего валка;
- правка полосы.

Следует отметить, что правка полосы может привести к появлению остаточных напряжений в готовом прокате и вызвать искривление изделий, вырезанных из такой полосы при дальнейшей обработке. Поэтому целесообразно еще на этапе прокатки получить полосу с минимально возможным отклонением от плоской формы.

Основным параметром, характеризующим плоскостность катаных полос, является амплитуда дефекта. В соответствии с этим параметром стандартом ГОСТ 19903—2015 регламентировано четыре типа плоскостности [18] горячекатаного проката (табл. 1).

Цель данного исследования — ранжировка технологических факторов горячей непрерывной прокатки стальных полос по степени влияния на плоскостность готовой продукции. Для достижения заявленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выявить наиболее и наименее влияющие на плоскостность катаных стальных полос

Таблица 1

Отклонение от плоскостности на 1 м длины проката, мм, горячекатаных стальных полос

Толщина проката, мм	Плоскостность			
	особо высокая	высокая	улучшенная	нормальная
	Не более			
От 0,4 до 1,4	8	10	15	20
Свыше 1,4 до 3,9	8	10	12	15
Свыше 3,9	5	8	10	12

технологические факторы для дальнейшей разработки мероприятий по корректировке режимов прокатки;

- оценить эффективность мероприятий по корректировке технологических режимов прокатки на плоскостность листов.

Следует отметить, что большая толщина раската в черновой группе клетей не позволяет ему здесь потерять плоскую форму, а возникновение дефектов плоскостности происходит главным образом при прокатке более тонкой полосы в последующих клетях чистовой группы. По этой причине исследование выполнено только для технологических факторов прокатки в непрерывной чистовой группе клетей стана.

В работе представлены результаты, характерные для процесса прокатки в чистовой группе клетей на непрерывном широкополосном стане 2000 череповецкого металлургического комбината «Северсталь».

Методика исследования. Следует отметить, что практически во всех известных подходах к оценке плоскостности [1—7, 13—17] используются параметры, оказывающие влияние на неравномерность коэффициентов вытяжек по ширине полосы.

Коэффициент вытяжки может быть определен по известному выражению:

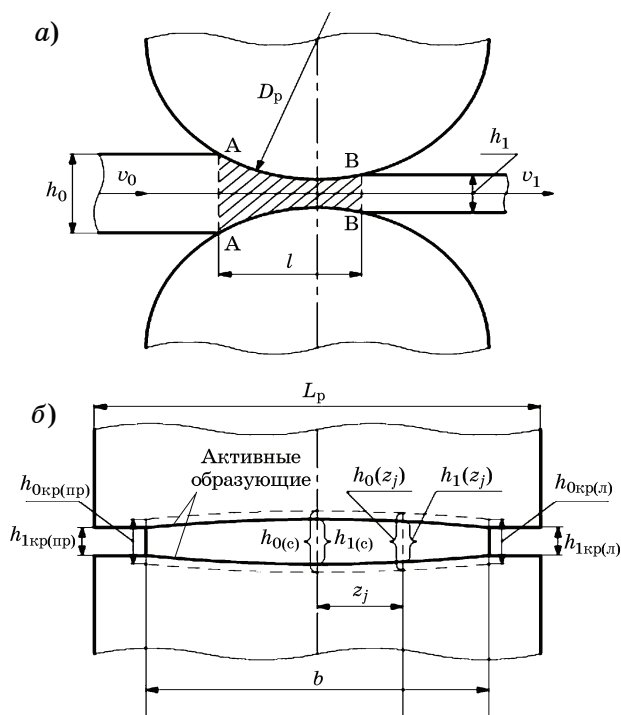
$$\lambda = L_1/L_0, \quad (1)$$

где L_0 , L_1 — длина одного и того же участка полосы соответственно перед входом в очаг деформации и на выходе из него.

На схеме фиг. 2, а показан геометрический очаг деформации в радиальной плоскости рабочих валков. Используя закон постоянства секундных объемов, а также схему на фиг. 2, б [19], коэффициенты вытяжки у правой ($\lambda_{пр}$) и левой ($\lambda_{л}$) кромок, в середине ширины полосы (λ_c) и их среднее значение (λ) можно определить через толщины полосы на входе в валки и выходе из них:

$$\begin{aligned} \lambda_{пр} &= h_{0кр(пр)}/h_{1кр(пр)}, \quad \lambda_{л} = h_{0кр(л)}/h_{1кр(л)}, \\ \lambda_c &= h_{0(c)}/h_{1(c)}, \quad \lambda = h_0/h_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где $h_{0кр(пр)}$, $h_{0кр(л)}$, $h_{0(c)}$, h_0 — толщины полосы на входе в очаг деформации соответственно по правой, левой кромкам, в середине ширины и средняя по ширине; $h_{1кр(пр)}$, $h_{1кр(л)}$, $h_{1(c)}$, h_1 — соответствующие толщины на выходе полосы из валков (см. схему б на фиг. 2).



Фиг. 2. Схема к расчету коэффициентов вытяжки полосы по ее ширине: а — полоса в очаге деформации в радиальной плоскости рабочих валков; б — форма сечения полосы в очаге деформации

Условие прокатки плоской полосы имеет вид:

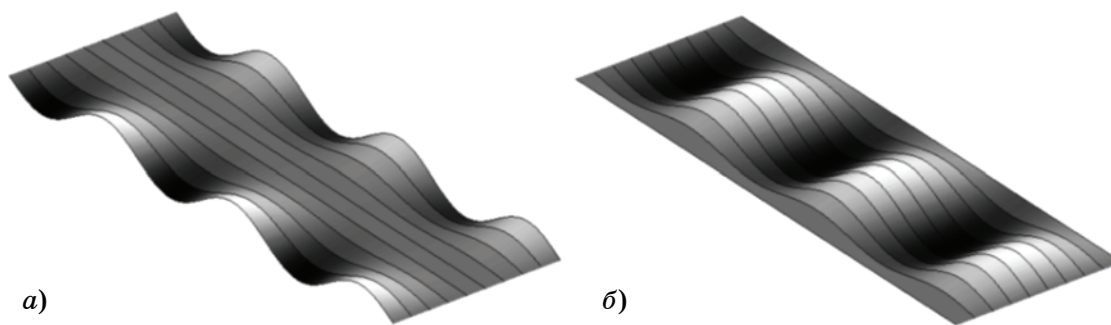
$$\lambda_{пр} = \lambda_{л} = \lambda_c = \lambda = \text{const.} \quad (3)$$

Как следует из равенств (2) и (3), на возникновение неплоскостности будут оказывать влияние поперечные профили подката и готовой полосы. Последний параметр формируется под влиянием ряда технологических факторов, определяющих профиль межвалкового зазора, в числе которых:

- упругие деформации валков, зависящие от сил прокатки;
- тепловые профили бочек валков, зависящие от интенсивности и неравномерности их охлаждения, от тепловыделения в очаге деформации;
- исходные шлифовочные профилировки бочек валков;
- неравномерный по длине бочки износ поверхностного слоя каждого валка.

При этом такой дефект плоскостности, как волнистость (фиг. 3, а), определяется выполнением неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{л} &> \lambda_c \text{ и } \lambda_{пр} > \lambda_c \\ \lambda_{л} &> \lambda_c \text{ или } \lambda_{пр} > \lambda_c \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$



Фиг. 3. Виды дефектов плоскостности: а — волнистость; б — коробоватость [20]

Дефект коробоватости (фиг. 3, б) можно идентифицировать, если выполняется неравенство:

$$\lambda_{\text{кр.ср}} < \lambda_{\text{с}}, \quad (5)$$

где $\lambda_{\text{кр.ср}}$ — среднее значение коэффициента вытяжки полосы у ее кромок.

Зная коэффициенты вытяжки у кромок полосы, можно оценить наиболее важный параметр дефекта плоскостности — амплитуду [21], которая в зависимости от типа дефекта составит:

- при образовании волнистости в i -й клетки непрерывной группы клеток

$$a_{\text{vi}} = \frac{hE \left[1 - \cos \left(\frac{2\sigma_{\text{к}}(\lambda_{\text{кр}} - \lambda_{\text{с}})}{hE} \right) \right]}{\sigma_{\text{к}}}, \quad (6)$$

где h — толщина полосы; E — модуль упругости материала полосы; $\sigma_{\text{к}}$ — критическое напряжение потери устойчивости; $\lambda_{\text{кр}}$, $\lambda_{\text{с}}$ — коэффициент вытяжки у кромки полосы и в середине ее ширины;

- при образовании коробоватости в i -й клетки непрерывной группы клеток

$$a_{\text{ki}} = \frac{hE \left[1 - \cos \left(\frac{2\sigma_{\text{к}}(\lambda_{\text{с}} - \lambda_{\text{кр}})}{hE} \right) \right]}{\sigma_{\text{к}}}. \quad (7)$$

Критическим напряжением $\sigma_{\text{к}}$ в сопротивлении материалов называют напряжение потери исходного состояния равновесия. Величины критических напряжений для разных видов материалов представлены в справочниках и могут быть использованы для расчетов.

При этом подтверждено [21], что дефект плоскостности полосы будет накапливаться

на полосе от клетки к клетке. Причем, если один и тот же вид дефекта плоскостности проявится в последующих клетках, то амплитуды его будут суммироваться. Если же воздействие возникающих дефектов плоскостности окажется противоположным, то их амплитуды при оценке величины дефекта на готовой полосе будут вычитаться:

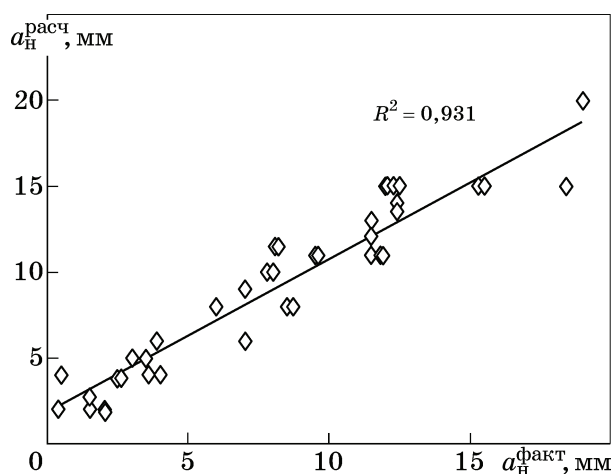
$$a_{\text{в}\Sigma} = \Sigma a_{\text{vi}} - \Sigma a_{\text{ki}}. \quad (8)$$

Используя описанный подход для оценки наличия дефектов плоскостности на готовой полосе, а также величины их амплитуды, далее оценим степень влияния основных из представленных на фиг. 1 факторов. На основании оценки значимости факторов по их влиянию на качество формы плоского проката представим подход к расчету параметров режима прокатки стальной полосы в непрерывной группе клеток с целью обеспечения высокой плоскостности этого проката.

Результаты исследования и их обсуждение. Описанная методика оценки плоскостности катаных полос проверена на достоверность. Для этого построена точечная диаграмма зависимости рассчитанной величины амплитуды $a_{\text{н}}$ неплоскостности (дефект плоскостности) от ее фактического значения для полос, прокатанных в чистовой группе клеток стана 2000. Эта диаграмма представлена на фиг. 4 [21].

Диаграмма и прямая, уравнение которой вычисляется из условия минимизации суммы квадратов разностей рассчитанных и фактических амплитуд дефектов, показывают высокую достоверность методики прогнозирования неплоскостности [22].

Продемонстрированная достоверность, характеризуемая коэффициентом множественной детерминации $R^2 = 0,931$, позволяет применить представленную методологию



Фиг. 4. Диаграмма зависимости рассчитанной величины амплитуды неплоскостности $a_n^{\text{расч}}$ от ее фактического значения $a_n^{\text{факт}}$

для определения технологических факторов, в наибольшей степени влияющих на плоскостность полос.

Для ранжирования технологических факторов при прокатке по степени их влияния на величину амплитуды неплоскостности используется коэффициент $K_{\text{эф.п}}$:

$$K_{\text{эф.п}} = \Delta a_n / 100, \quad (9)$$

где Δa_n — изменение амплитуды неплоскостности, % исходного значения, при максимально допустимом по условиям технологии диапазоне изменения исследованного фактора.

Результаты такого ранжирования на примере чистовой группы клеток стана 2000 представлены в табл. 2. Видно, что наибольшую степень воздействия на плоскостность готовой полосы оказывают распределения частных обжатий между клетями, изменения

величины вогнутости шлифовочной профилировки рабочих валков и изменения межперевалочного интервала. Следует отметить, что при проектировании технологических параметров процесса прокатки на существующем оборудовании в первую очередь необходимо управлять величинами частных обжатий при сохранении суммарного обжатия.

При разработке режимов можно использовать один из известных методов оптимизации, в котором критерием оптимальности будет выступать минимальная амплитуда дефектов плоскостности на готовых полосах, определяемая расчетным путем.

Также следует учесть, что при корректировке режима необходимо обеспечить минимально возможный уровень энергозатрат, неизменность теплового режима полос и обжатия в последней клетке для сохранения механических свойств металла на заданном уровне. С этой целью в исследовании применен метод оптимизации с помощью симплексов [22].

Результаты изменений величин частных обжатий в клетях чистовой группы стана 2000 при оптимизации процесса прокатки представлены на фиг. 5 [4].

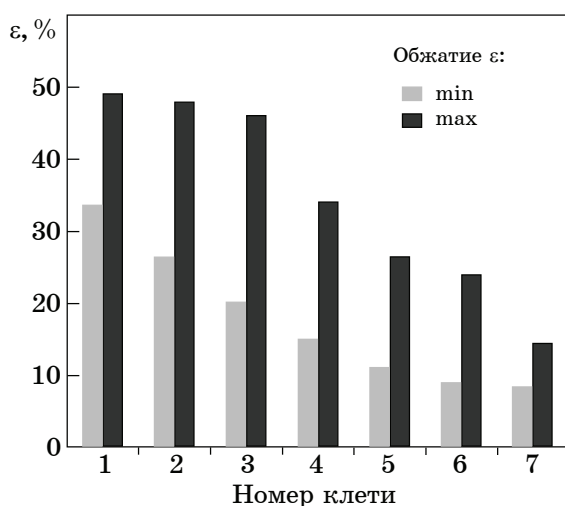
Средний расчетный уровень амплитуды неплоскостности стальных полос, произведенных с применением вновь предложенных частных обжатий в клетях, снизился на 5—7 мм по сравнению с расчетным значением, полученным для полос, прокатанных с использованием существующих обжатий.

Основной особенностью улучшенных режимов является постепенное снижение частных обжатий от первой до последней клетки чистовой группы клеток.

Таблица 2

Результаты ранжирования управляющих воздействий при прокатке по степени их влияния на амплитуду неплоскостности готовых полос

№ п.п	Наименование воздействия	$K_{\text{эф.п}}$
1	Перераспределение обжатий между клетями чистовой группы	0,971
2	Изменение величины вогнутости шлифовочной профилировки рабочих валков	0,472
3	Изменение межперевалочного периода рабочих валков	0,289
4	Изменение давления в системе гидроизгиба рабочих валков	0,195
5	Изменение расхода охлаждающей воды, подаваемой на валки	0,100
6	Изменение температуры подката, поступающего в чистовую группу клеток	0,002
7	Изменение межклетевых натяжений	0,001



Фиг. 5. Частные обжатия ε по толщине полосы в клетях чистовой группы стана 2000 при оптимизации процесса прокатки по критериям «минимум неплоскостности» и «минимум энергозатрат»

Выводы. 1. Сформулирован критерий появления неплоскостности на горячекатаной стальной полосе, на основании которого предложен подход к определению вида и амплитуды дефекта, учитывающий геометрическую характеристику сечения и свойства полосы.

2. Выполнено ранжирование технологических факторов, оказывающих влияние на показатели плоскостности. В результате выявлены наиболее значимые технологические воздействия на процесс, которые позволили сформулировать подход к расчету параметров горячей прокатки с помощью оптимизации по методу симплексов.

3. Средний расчетный уровень амплитуды неплоскостности стальных полос, произведенных с применением предложенных режимов прокатки в чистовой группе клетей стана 2000, снизился на 5—7 мм по сравнению с уровнем дефектов на полосах, прокатанных с использованием существующих режимов. Основная особенность улучшенных режимов заключается в постепенном снижении частных обжатий от первой до последней клетки чистовой группы клетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будаква, А.А. Профилирование валков листовых станов / А.А. Будаква, Ю.В. Коновалов, К.Н. Ткалич. — Киев : Техника, 1986. 190 с.
- Григорян, Г.Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки / Г.Г. Григорян, Ю.Д. Железнов, В.А. Черный [и др.]. — М. : Металлургия, 1983. 120 с.

- Шаталов, Р.Л. Уточнение метода расчета критических напряжений и показателей плоскостности полосы при тонколистовой прокатке / Р.Л. Шаталов, Е.А. Максимов // Сталь. 2016. №4. С.26—30.
- Шалаевский, Д.Л. Повышение плоскостности готовых стальных полос на энергосберегающих режимах непрерывной горячей прокатки / Д.Л. Шалаевский, А.В. Митрофанов, К.П. Корепина // Сталь. 2022. №2. С.15—17.
- Пименов, В.А. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 1 / В.А. Пименов, С.М. Бельский, Е.В. Кузнецова, А.Н. Шкарин // Производство проката. 2018. №1. С.11—15.
- Пименов, В.А. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 2 / В.А. Пименов, С.М. Бельский, Е.В. Кузнецова, А.Н. Шкарин // Производство проката. 2018. №6. С.9—14.
- Шкарин, А.Н. Формирование плоскостности холоднокатаных полос с учетом особенностей профиля поперечного сечения горячекатаного подката : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Шкарин Александр Николаевич. — Липецк. 2021. 22 с.
- Xiaodong Wang. Calculation of thermal stress affecting strip flatness change during run-out table cooling in hot steel strip rolling / Xiaodong Wang, Quan Yang, Anrui He // J. Mater. Proc. Techn. 2008. №10. P.130—146.
- Hrabovsky, J. Experimental and numerical study of hot-steel-plate flatness / J. Hrabovsky, M. Pohanka, Pil Jong Lee, Jong Hoon Kang // Mater. Techn. 2016. №1. P.17—21.
- Hao Wu. Predicting stress and flatness in hot-rolled strips during run-out table cooling / Hao Wu, Jie Sun, Xing Lu, Wen Peng // J. Manufact. Proc. 2022. №2. P.815—831.
- Божков, А.И. Влияние режимов термообработки на плоскостность полос электротехнических изотропных сталей / А.И. Божков, Д.А. Ковалев, О.В. Черников, В.С. Юсупов, С.Н. Ивлиев, С.С. Дегтев // Сталь. 2019. №2. С.26—28.
- Шопин, И.И. Исследование формоизменения горячекатаной стальной полосы при смотке в рулон для прогнозирования плоскостности в холодном состоянии : автореф. дис. ... канд. тех. наук / Шопин Иван Иванович. — М. 2018. 20 с.
- Кухта, Ю.Б. Совершенствование процесса формирования поперечного профиля и плоскостности горячекатаных полос на основе моделирования работы валковой системы «кварто» : автореф. дис. ... канд. тех. наук / Кухта Юлия Борисовна. — Магнитогорск. 2009. 23 с.
- Salganik, V. Mathematical modeling of roll load and deformation in a four-high strip mill // Metal Forming 2000 : Proceed. 9-th Intern. Conf. Metal Forming / The University of Birmingham. 2002. September 9—11. P.695—699.
- Салганик, В.М. Уточнение описания контактного взаимодействия рабочего и опорного валков системы кварто для расчета их нагрузок и деформаций / В.М. Салганик, О.В. Синецкий, П.П. Полецков // Моделирование и развитие процессов обработки ме-

- таллов давлением : сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. — Магнитогорск : Изд. МГТУ им. Носова, 2006. С.34—42.
16. *Синицкий, О.В.* Совершенствование процесса формирования геометрии и формы листового проката в условиях ПСГП 2500 ОАО «ММК» / О.В. Синицкий, А.А. Шарнина, Ю.О. Гусева // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2015. №21. С.131—136.
 17. *Дема, Р.Р.* Исследование процесса формирования поперечного профиля и плоскостности горячекатаных и холоднокатаных полос в условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Сообщение 1. Анализ причин возникновения локальных утолщений в прикромочной области при производстве полос на ПСГП 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / Р.Р. Дема, О.В. Синицкий, Д.Н. Чикишев [и др.] // Производство проката. 2016. №3. С.9—14.
 18. ГОСТ 19903—2015, Межгосударственный стандарт. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. — М. : Стандартинформ, 2016.
 19. *Гарбер, Э.А.* Исследование, моделирование и уменьшение неплоскостности при горячей прокатке стальных широких полос / Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский, П.А. Мишнев, И.А. Михеева, С.А. Кухтин. — М. : Теплотехник, 2016. 112 с.
 20. *Molleda, J.* On-line flatness measurement in the steelmaking industry / J. Molleda, R. Usamentiaga, D.F. Garcia // Sensors. 2013. №13 (8). P.10245—10272. <https://doi.org/10.3390/s130810245>.
 21. *Шалаевский, Д.Л.* Оценка вида и амплитуды дефекта планшетности горячекатаной стальной полосы, произведенной на непрерывном стане / Д.Л. Шалаевский // Металлург. 2023. №11. С.15—21.
 22. *Саутин, С.Н.* Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С.Н. Саутин. — Ленинград : Химия, 1975. 48 с.