

А. В. САТОНИН, доктор техн. наук, проф., ДГМА, Краматорск
Ю. И. ВИТИТНЕВ, ст. преподаватель, ГВУЗ «КНУ», Кривой Рог
М. Г. КОРЕНКО, ассистент, ГВУЗ «КНУ», Кривой Рог
Н. В. СТАРОСТА, ассистент, ГВУЗ «КНУ», Кривой Рог

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ СОРТОВЫХ ПОЛОСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

В статье показана целесообразность использования численной математической модели точности результирующих геометрических характеристик, которая распространена и на условия реализации, учитывающие возможное наличие систем автоматического регулирования толщины.

Ключевые слова: математическое моделирование, очаг деформации, геометрические характеристики.

Введение. Металлургия – одна из ведущих отраслей промышленности, обеспечивающая технический прогресс во многих смежных отраслях. В современных экономических условиях возросшей конкуренции, на рынке металлопродукции, решающим фактором является качество проката и экономия металла. Одним из наиболее существенных источников экономии металла является повышение точности проката. Поэтому совершенствование технологических процессов горячей прокатки на сортовых станах является актуальным направлением ресурсосбережения в прокатном производстве.

Среди основных показателей качества горячекатаных сортовых полосовых профилей, наиболее существенным является точность прокатки по толщине, количественно определяемая величиной продольной разнотолщинности [1, 2].

В общем случае условий реализации процессов горячей прокатки величина продольной разнотолщинности, получаемых сортовых полосовых профилей, определяется целым рядом факторов. Основными, из которых, являются изменение величины предварительного межвалкового зазора, обусловленное радиальным биением рабочих валков, погрешностью отработки нажимных механизмов, температурными деформациями и т.д., а также стохастические изменения ширины, показателя механических свойств, температуры и скорости прокатки, коэффициентов внешнего трения, величины переднего и заднего натяжений [1 – 3].

Большинство математических моделей точности процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей, не учитывают наличие систем автоматического регулирования толщины, работающих по сигналу отклонения исходной толщины и температуры металла на входе в очаг деформации.

Целью работы является разработка конкретных практических рекомендаций по совершенствованию технологий и оборудования процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей.

Математическое моделирование точности результирующих геометрических характеристик горячекатаных сортовых полосовых профилей осуществлено путем разбиения их исходной длины L_0 на конечное множество N_L j -ых элементарных поперечных сечений (рис. 1) и последующей организации итерационной процедуры решения системы «рабочая клеть–прокатываемая заготовка». [4].

При этом текущие по длине значения исходной толщины h_{0j} , температуры t_{0j} и опорного значения сопротивления деформации $\sigma_{S_{0j}}$ определяли с использованием зависимостей вида:

© А. В. Сатонин, Ю. И. Вититнев, М. Г. Коренко, Н. В. Староста, 2012

$$h_{0j} = h_{0j|_{j=1}} + A_{h_{00}} \frac{x_j}{L_0} + A_{h_{01}} \sin\left(2\pi \frac{x_j}{L_{h_{01}}}\right) + A_{h_{02}} \sin\left(2\pi \frac{x_j}{L_{h_{02}}}\right); \quad (1)$$

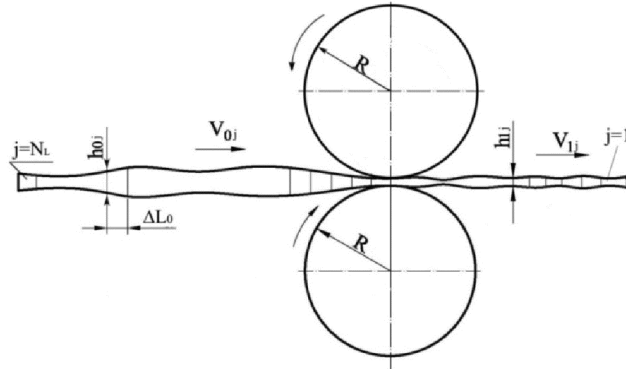


Рис. 1 – Расчетная схема применительно к численному математическому моделированию продольной разнотолщинности прокатываемых сортовых полосовых и ленточных заготовок

$$t_{0j} = t_{0j|_{j=1}} + A_{t_{00}} \frac{x_j}{L_0} + A_{t_{01}} \sin\left(2\pi \frac{x_j}{L_{t_{01}}}\right) + A_{t_{02}} \sin\left(2\pi \frac{x_j}{L_{t_{02}}}\right); \quad (2)$$

$$\sigma_{s0j} = \sigma_{s0j|_{j=1}} + A_{\sigma_{s00}} \frac{x_j}{L_0} + A_{\sigma_{s01}} \sin\left(2\pi \frac{x_j}{L_{\sigma_{s01}}}\right) + A_{\sigma_{s02}} \sin\left(2\pi \frac{x_j}{L_{\sigma_{s02}}}\right); \quad (3)$$

где $h_{0j|_{j=1}}$, $t_{0j|_{j=1}}$, $\sigma_{s0j|_{j=1}}$ – значения исходной толщины, температуры и показателя механических свойств соответствующие первому ($j = 1$) поперечному сечению прокатываемой заготовки;

$A_{h_{00}}$, $A_{t_{00}}$, $A_{\sigma_{s00}}$ – размах изменения низкочастотных составляющих исходной толщины, температуры и показателя механических свойств;

$A_{h_{01}}$, $A_{t_{01}}$, $A_{\sigma_{s01}}$ – полуразмах изменения среднечастотных составляющих исходной толщины, температуры и показателя механических свойств;

$A_{h_{02}}$, $A_{t_{02}}$, $A_{\sigma_{s02}}$ – полуразмах изменения высокочастотных составляющих исходной толщины, температуры и показателя механических свойств;

$L_{h_{01}}$, $L_{t_{01}}$, $L_{\sigma_{s01}}$ – шаг изменения среднечастотных составляющих исходной толщины, температуры и показателя механических свойств;

$L_{h_{02}}$, $L_{t_{02}}$, $L_{\sigma_{s02}}$ – шаг изменения высокочастотных составляющих исходной толщины, температуры и показателя механических свойств;

$x_j = \Delta L_0(j-1)$ – геометрическая координата, соответствующая расстоянию от j -го элементарного поперечного сечения исходной заготовки до ее передней торцевой поверхности;

$\Delta L_0 = L_0 / N_L$ – шаг разбиения общей протяженности исходной заготовки.

В первом цикле расчетов ($j = 1$) производили расчет соответствующего значения силы прокатки $P_{j|_{j=1}}$, при помощи количественной оценки которого с использованием за-

висимости Головина-Симса, определяли номинальную, настроечную величину предварительного межвалкового зазора \overline{S}_0

$$\overline{S}_0 = h_{1j}|_{j=1} - P_{j}|_{j=1} / G_{\text{кл}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{кл}}$ – обобщенное значение модуля жесткости чистой рабочей клетки сортового полосового или сортового прокатного стана.

В последующих циклах расчета текущее значение предварительного межвалкового зазора S_{0j} варьировали с учетом величины радиального биения рабочих валков ΔR в соответствии с синусоидальным законом вида

$$S_{0j} = \overline{S}_0 + 2\Delta R \sin[x_j \overline{h}_0 / (\overline{h}_1 2\pi R)] \quad (5)$$

и именно данное значение использовали в качестве критериального при оценке сходимости итерационной процедуры расчета конечной толщины полосы h_{1j} , получаемой в каждом j -ом цикле решения.

Организация данной процедуры была осуществлена на основе метода дихотомии [5, 6].

Силу и момент прокатки в каждом j -ом цикле решения вычисляли с использованием либо численной математической модели, либо более простых и быстродействующих регрессионных аналитических зависимостей.

Помимо расчета текущего значения конечной толщины h_{1j} в рамках разработанной математической модели производили вычисление суммарной результирующей длины горячекатаных сортовых полосовых профилей L_1

$$L_1 = \sum_{j=1}^{N_L} \Delta L_0 h_{0j} / h_{1j}. \quad (6)$$

Помимо расчета традиционных схем процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей, полученная математическая модель точности результирующих геометрических характеристик распространена и на условия реализации, учитывающие возможное наличие систем автоматического регулирования толщины (САРТ), основанные на использовании быстродействующих гидравлических или гидромеханических нажимных механизмов, работающих по сигналу отклонения исходной толщины и температуры металла на входе в очаг деформации. С учетом условия обеспечения постоянства конечной толщины $h_{1j} = \overline{h}_1$ в этом случае определяли текущие значения силы прокатки P_j и требуемые значения величины предварительного межвалкового зазора $S_{0j} = \overline{h}_1 - P_j / G_{\text{кл}}$. Исходя из известных количественных оценок S_{0j} , в свою очередь, производили расчет требуемых значений скорости $V_{\text{гну}j}$ и ускорения $a_{\text{гну}j}$ перемещения исполнительного органа гидравлического нажимного устройства

$$V_{\text{гну}j} = [S_{0j} - S_{0(j-1)}] / \tau_{vj} = [S_{0j} - S_{0(j-1)}] V_1 \overline{h}_1 / (\Delta L_{\text{зг}0} h_{0j}); \quad (7)$$

$$a_{\text{гну}j} = [V_{\text{гну}j} - V_{\text{гну}(j-1)}] / \tau_{vj} = [V_{\text{гну}j} - V_{\text{гну}(j-1)}] V_1 \overline{h}_1 / (\Delta L_{\text{зг}0} h_{0j}), \quad (8)$$

где $\tau_{vj} = \Delta L_{зг0} h_{0j} / (V_1 \bar{h}_1)$ – время прохождения $(j-1) - j$ -го участка прокатываемой заготовки при скорости прокатки V_1 .

Обработку полученных расчетных распределений конечной толщины и энергосиловых параметров исследуемой технологической схемы процесса прокатки производили с использованием методов теории вероятности и математической статистики, определяя средние выборочные значения, средние квадратические отклонения, коэффициенты вариации и выполняя построение расчетных гистограмм соответствующих распределений.

В качестве примеров результатов численной реализации рассмотренной математической модели на рис. 2 представлены расчетные согласно (1) и (2) распределения текущих значений исходной толщины h_{0j} и температуры t_{0j} по длине прокатываемой заготовки.

Результирующие распределения конечной толщины h_{1j} и приведенного значения силы P_j/B прокатки в зависимости от количественных оценок модуля жесткости рабочей клетки и наличия систем автоматического регулирования толщины иллюстрированы рис. 3.

Кроме того, на рис. 4 представлены расчетные распределения требуемых значений скорости $V_{гнуж}$ и ускорения $a_{гнуж}$ перемещений исполнительного механизма гидравлического нажимного устройства, обеспечивающего постоянство конечной толщины прокатываемой заготовки $h_{1j} = \bar{h}_1$ при его работе в рамках системы автоматического регулирования.

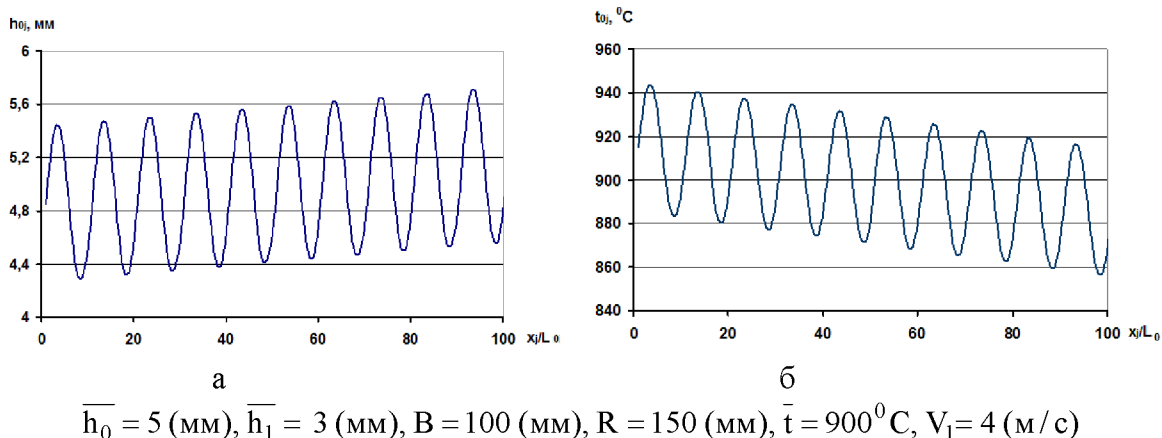


Рис. 2 – Расчетные распределения текущих значений исходной толщины (а) и температуры (б) по длине полосового профиля из стали 60С2ХА

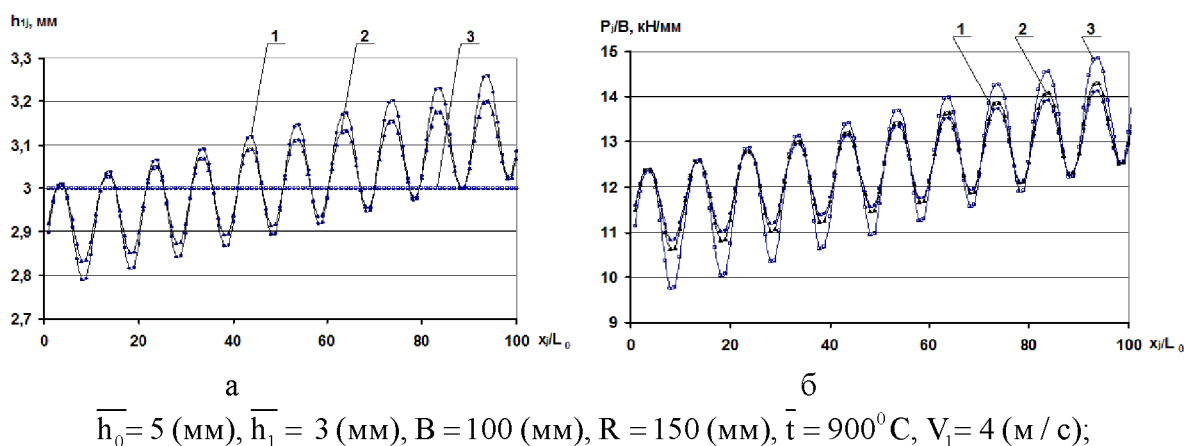
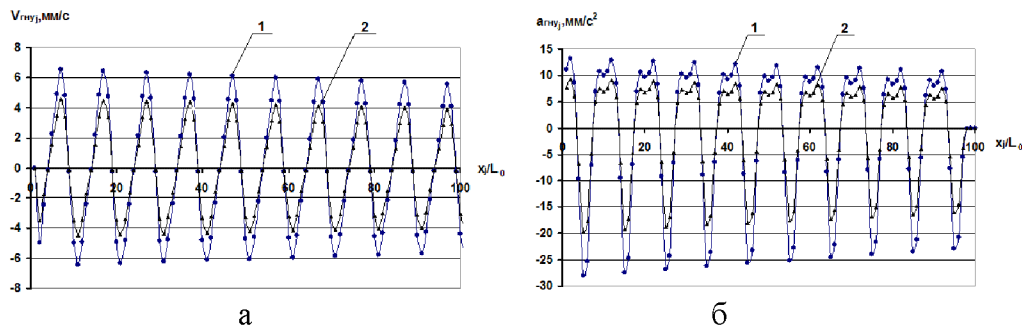


Рис. 3 – Расчетные распределения текущих значений конечной толщины (а) и приведенной силы (б) по длине полосового профиля из стали 60С2ХА



$\bar{h}_0 = 5$ (мм), $\bar{h}_1 = 3$ (мм), $B = 100$ (мм), $R = 150$ (мм), $\bar{t} = 900^\circ\text{C}$, $V_1 = 4$ (м / с);
 1 – $G_{\text{кл}} = 1000$ кН/мм; 2 – при работе САРТ

Рис. 4 – Расчетные распределения, требуемых для работы САРТ, значений скорости (а) и ускорения (б) перемещения гидравлического нажимного устройства, полученные применительно к горячей прокатке полосового профиля из стали 60С2ХА

Обобщая результаты анализа представленных и аналогичных им расчетных распределений по отношению к процессу горячей прокатки относительно тонких сортовых полосовых и ленточных заготовок, можно отметить следующее:

- увеличение размаха стохастического изменения исходных технологических параметров однозначно приводит к увеличению размаха изменения конечной толщины, при этом интенсивность данного увеличения может быть снижена за счет увеличения модуля жесткости рабочей клетки или использования систем автоматического регулирования толщины;
- увеличение размаха стохастического изменения исходных технологических параметров, а также увеличение модуля жесткости рабочей клетки и использование САРТ обуславливает весьма существенное увеличение размаха изменения энергосиловых параметров исследуемого процесса;
- к увеличению размаха стохастического изменения толщины приводит также и увеличение радиальных биений рабочих валков, при этом с увеличением модуля жесткости $G_{\text{кл}}$ влияние данного фактора возрастает и возрастает весьма существенно.

Выводы. В целом, наличие довольно сложного характера распределений исходных и результирующих параметров, наряду с аналогичным довольно сложным распределением требуемых кинематических параметров системы автоматического регулирования толщины, подтверждают целесообразность использования рассмотренной численной математической модели применительно к анализу влияния и разработке конкретных практических рекомендаций по совершенствованию технологий и оборудования процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей.

Разработаны программные средства по автоматизированному расчету основных показателей точности результирующих геометрических характеристик, а также силы и моментов прокатки с учетом стохастического изменения исходных технологических параметров, радиального биения рабочих валков и модуля жесткости чистовых рабочих клеток полосовых и сортопрокатных станов.

Список литературы: 1. Сатонин А. В. Прогнозирование основных показателей качества листового металлопроката и разработка рекомендаций по их повышению / А. В. Сатонин // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 187–194. 2. Коновалов Ю. В. Повышение точности прокатки листов и полос / Ю. В. Коновалов, Е. А. Руденко, П. С. Гринчук – К. : Техніка, 1987. – 144 с. 3. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. –

Краматорск : ДГМА, 2010. – 243 с. 4. *Капланов В.И.* Численное математическое моделирование точности геометрических характеристик при горячей прокатке лент и полос /В. И. Капланов, М.Г. Коренко, С.С. Настоящая /«Стратегия качества в промышленности и образовании»: Сб. VI I Международная конференция, ТУ, Болгария, Варна, 2011. С. 110-113. 5. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике (для инженеров и учащихся вузов) / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 720 с. 6. *Калиткин Н. Н.* Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука. – 1978. – 512 с.

Надійшла до редколегії 15.10.2012

УДК 621.771.06

Математическое моделирование точности при горячей прокатке сортовых полосовых профилей / Сатонин А.В., Вититнев Ю. И., Коренко М. Г., Староста Н. В.// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С. 172-177. – Бібліогр.: 6 назв.

У статті показана доцільність використання чисельної математичної моделі точності результуючих геометричних характеристик, яка поширена й на умови реалізації, що враховують можливу наявність систем автоматичного регулювання товщини.

Ключові слова: математичне моделювання, осередок деформації, геометричні характеристики.

The article shows the feasibility of using of the numerical mathematical model of the resulting geometric accuracy which extended to condition implementation, taking into account the possible presence of automatic control of thickness.

Keywords: mathematical modeling, the heart of deformation, the geometrical characteristics.

УДК 621.774.72

В. Г. СЕРЕДА, канд. техн. наук, доц., ДГМА, Краматорск

Е. В. ГОРБАЧ, аспирант, ДГМА, Краматорск

В. А. ПАЛАМАРЧУК, канд. техн. наук, доц., ДГМА, Краматорск

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ ДНИЩ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ТРЕНИЯ

Рассмотрены виды днищ, получаемые методом тангенциальной обкатки, и способы их получения. С помощью метода морфологического анализа проведена классификация выпуклых днищ. На её основе выявлены особенности проектирования инструмента трения для обкатки выпуклых днищ. Предложены способы проектирования инструмента в среде DELCAM PowerShape.

Ключевые слова: тангенциальная обкатка, днище, морфологический анализ, проектирование инструмента.

Видное место среди процессов в производстве заготовок деталей машин из труб занимает процесс обкатки. Наиболее универсальной является схема тангенциальной обкатки. Тангенциальная обкатка инструментом трения – это высокопроизводительный металлосберегающий технологический процесс [1]. Он представляет собой деформирование предварительно нагретого до ковочной температуры конца вращающейся трубчатой заготовки профилированным инструментом, поступательно движущимся в направлении, перпендикулярном к оси вращения заготовки. По этой схеме при взаимодействии вращающейся заготовки с инструментом переменного профиля происходит постепенное деформирование конца заготовки до заданной формы. Достоинство процесса обкатки состоит в локализации очага деформации, что уменьшает силовые параметры процесса и расширяет его технологические возможности [2].

В последнее время значительно расширена область применения тангенциальной обкатки, в частности освоено изготовление новых типов изделий из труб, таких как днища, горловины баллонов, фланцы, переходы, опоры, оси, среди которых важное место занимают днища [3].

© В. Г. Середя, Е. В. Горбач, В. А. Паламарчук, 2012