

УДК 621.982.45: 621.981

Саплин С. Ю.
Кулик Н. А.
Сатонин А. А.
Зеленский А. А.

ТРЕХМЕРНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ГОТОВОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С ИЗГИБОМ*

Одной из основных задач использования технологий и оборудования процессов правки растяжением с изгибом является устранение дефектов формы и плоскостности холоднокатаной полосы. Количественная оценка указанных дефектов может быть произведена на основании данных, получаемых с помощью стрессометрических систем [1, 2].

Для оценки эффективности используемых технологических режимов целесообразной является разработка математической модели влияния процесса правки растяжением с изгибом на основные показатели качества готового металлопроката.

На основании математической модели напряженно-деформированного состояния металла при реализации процесса правки растяжением с изгибом по аналогии с работами [3–7], была разработана трехмерная математическая модель, включающая учет напряженнодеформированного состояния металла не только в направлении изменения кривизны и толщины полосы, т. е. по ее длине, но и по ее ширине.

Для прогнозирования возможности получения качественной полосы, а также проектирования соответствующих технологических режимов для устранения сложных по ширине дефектов, возникающих вследствие неравномерности температурных условий, условий смазки, износа валков по длине бочки, возникает необходимость оценки параметров напряженно-деформированного состояния полосы с большим количеством разбиений по ширине.

Примером реализации указанного подхода применительно к процессу правки представлено моделирование напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества для семи различных линий тока по ширине полосы, что в большинстве случаев достаточно для описания сложных дефектов.

Непосредственно при математическом моделировании механизма изменения дефектов плоскостности и формы при реализации процесса правки растяжением с изгибом, исходя из известных значений $l_{01}, l_{02} \dots l_{07}$ в зависимости от исходных дефектов и показаний контрольной аппаратуры, с учетом рекомендаций работы [8] можно записать (рис. 1):

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= E_n a_s \frac{l_{11} - l_{01}}{l_{01}} = E_n a_s \left(\frac{l_{11}}{l_{01}} - 1 \right); \\ \sigma_2 &= E_n a_s \frac{l_{12} - l_{02}}{l_{02}} = E_n a_s \left(\frac{l_{12}}{l_{02}} - 1 \right); \\ &\quad \text{---} \\ \sigma_7 &= E_n a_s \frac{l_{17} - l_{07}}{l_{07}} = E_n a_s \left(\frac{l_{17}}{l_{07}} - 1 \right),\end{aligned}$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_7$ – напряжения натяжения T_1 , имеющие место по соответствующим линиям тока обрабатываемой полосы при ее растяжении;

$a_s \approx 1.1 \dots 1.2$ – коэффициент, учитывающий выравнивание напряжений за счет поперечного взаимодействия элементарных объемов полосы [9].

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. Сатонина А. В.

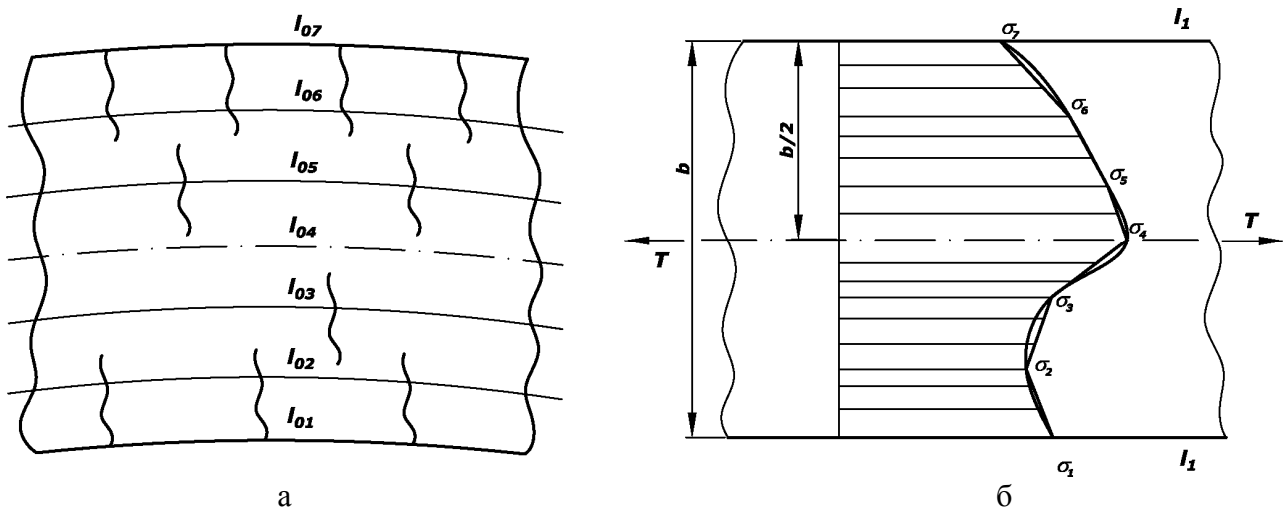


Рис. 1. Расчетная схема по математическому моделированию механизма изменения дефектов плоскости и формы

Поскольку анализ распределений напряжений натяжения проводится по достаточно большому количеству линий тока, можно принять допущение о линейном характере распределения напряжений между каждой парой соседних линий тока (см. рис. 1). Исходя из этого, по отношению к известной интегральной величине переднего натяжения T можно сделать следующий вывод:

$$T_1 = (\sigma_1 + 2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4 + 2\sigma_5 + 2\sigma_6 + \sigma_7) \frac{bh_1}{12}. \quad (1)$$

Уравнение может быть представлено в виде:

$$\sigma_1 + 2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4 + 2\sigma_5 + 2\sigma_6 + \sigma_7 = \frac{12T_1}{bh}. \quad (2)$$

Для анализа напряженно-деформированного состояния растянутой полосы воспользуемся известным соотношением функциональной связи напряжений и упругих деформаций, рассматриваемых для каждой из анализируемых линий тока по ширине:

$$\sigma_2 - \sigma_1 = E_n a_s \left[\frac{(l_{12} - l_{02})}{l_{02}} - \frac{(l_{11} - l_{01})}{l_{01}} \right]; \quad (3)$$

$$\sigma_3 - \sigma_2 = E_n a_s \left[\frac{(l_{13} - l_{03})}{l_{03}} - \frac{(l_{12} - l_{02})}{l_{02}} \right]; \quad (4)$$

$$\sigma_4 - \sigma_3 = E_n a_s \left[\frac{(l_{14} - l_{04})}{l_{04}} - \frac{(l_{13} - l_{03})}{l_{03}} \right]; \quad (5)$$

$$\sigma_5 - \sigma_4 = E_n a_s \left[\frac{(l_{15} - l_{05})}{l_{05}} - \frac{(l_{14} - l_{04})}{l_{04}} \right]; \quad (6)$$

$$\sigma_6 - \sigma_5 = E_n a_s \left[\frac{(l_{16} - l_{06})}{l_{06}} - \frac{(l_{15} - l_{05})}{l_{05}} \right]; \quad (7)$$

$$\sigma_7 - \sigma_6 = E_n a_s \left[\frac{(l_{17} - l_{07})}{l_{07}} - \frac{(l_{16} - l_{06})}{l_{06}} \right]. \quad (8)$$

Исходя из допущения, что величина натяжения полосы является достаточной для обеспечения ее плоскостности:

$$l_{11} = l_{12} = \dots = l_{17} = l_1.$$

После ряда математических преобразований (3) можно получить:

$$-\frac{\sigma_1}{E_n a_s} + \frac{\sigma_2}{E_n a_s} = \frac{(l_1 - l_{02})}{l_{02}} - \frac{(l_1 - l_{01})}{l_{01}}; \quad (9)$$

$$-\frac{\sigma_1}{E_n a_s} + \frac{\sigma_2}{E_n a_s} = \frac{l_1}{l_{02}} - \frac{l_1}{l_{01}}. \quad (10)$$

Аналогичным образом были преобразованы уравнения (4)–(8).

Учитывая пропорциональность напряжений и соответствующих им упругих деформаций растяжения можно записать:

$$\begin{aligned} & \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6 + \sigma_7 = \\ & = E_n a \left[\frac{l_1 - l_{01}}{l_{01}} + \frac{l_1 - l_{02}}{l_{02}} + \frac{l_1 - l_{03}}{l_{03}} + \frac{l_1 - l_{04}}{l_{04}} + \frac{l_1 - l_{05}}{l_{05}} + \frac{l_1 - l_{06}}{l_{06}} + \frac{l_1 - l_{07}}{l_{07}} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Предпоследнее уравнение (11) системы (2), (10), (11) может быть преобразовано к следующему виду:

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_1}{E_n a_s} + \frac{\sigma_2}{E_n a_s} + \frac{\sigma_3}{E_n a_s} + \frac{\sigma_4}{E_n a_s} + \frac{\sigma_5}{E_n a_s} + \frac{\sigma_6}{E_n a_s} + \frac{\sigma_7}{E_n a_s} = \\ & = l_1 \left(\frac{1}{l_{01}} + \frac{1}{l_{02}} + \frac{1}{l_{03}} + \frac{1}{l_{04}} + \frac{1}{l_{05}} + \frac{1}{l_{06}} + \frac{1}{l_{07}} \right) - 7. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, с учетом известных значений начальных длин по линиям тока l_{01} , l_{02} , ... l_{07} система восьми уравнений (2), (10), (12) содержит восемь неизвестных величин, а именно напряжения σ_1 , σ_2 , ... σ_7 и результирующую длину l_1 . Решение данной системы было осуществлено с помощью объектно-ориентированного языка Object Pascal в среде Delphi 7.0.

Для математического моделирования возможности устранения дефектов с более сложным характером распределения напряжений по ширине необходимо осуществлять анализ напряженно-деформированного состояния по большему количеству линий тока. Обобщенное решение данной задачи для произвольного количества анализируемых линий тока в общем виде может быть получено с помощью представленной ниже системы уравнений:

$$\frac{-\sigma_1}{E_n a_s} + \frac{\sigma_2}{E_n a_s} + \left(\frac{1}{l_{01}} - \frac{1}{l_{02}} \right) l_1 = 0; \quad (13)$$

$$\frac{-\sigma_k}{E_n a_s} + \frac{\sigma_{(k+1)}}{E_n a_s} + \left(\frac{1}{l_{0k}} - \frac{1}{l_{0(k+1)}} \right) l_1 = 0; \quad (14)$$

$$\frac{-\sigma_{k_z-1}}{E_n a_s} + \frac{\sigma_{k_z}}{E_n a_s} + \left(\frac{1}{l_{0(k_z-1)}} - \frac{1}{l_{0k_z}} \right) l_1 = 0; \quad (15)$$

$$\frac{1}{E_n a_s} \sum_{k=1}^{k_z} \sigma_k - l_1 \sum_{k=1}^{k_z} \frac{1}{l_{0k}} = -k_z; \quad (16)$$

$$\sigma_1 + 2 \sum_{k=2}^{k_z-1} \sigma_k + \sigma_{k_z} = \frac{2(k_z - 1) \Gamma}{bh}, \quad (17)$$

где k_z – количество анализируемых линий тока по ширине полосы.

Совокупность зависимостей (13)–(17) представляет собой систему линейных уравнений, решением которой является распределение напряжений натяжения по анализируемым линиям тока и результирующее значение длины всех волокон в нагруженном состоянии.

Решение данной системы может быть получено с помощью численных методов [10–12], в частности, методом Гаусса [10–11].

В целом, представленная математическая модель определения распределений напряжений натяжения, в сочетании с двухмерной моделью напряженно-деформированного состояния [13] составили алгоритм трехмерного моделирования напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества холоднокатаных лент и полос при обеспечении учета конструктивных особенностей оборудования, а также реализуемого технологического процесса.

Программирование рассмотренной трехмерной модели было выполнено на объектном языке Object Pascal. Примером результата численной реализации разработанной математической модели на рис. 2 представлена зависимость соотношения результирующего и исходного показателей плоскостности полосы Φ_{Sp}/Φ_{S0} от приведенной величины заднего натяжения $T_0/(bh\sigma_T)$. Расчеты проведены применительно к опытно-промышленной установке для правки растяжением с изгибом на базе промышленно-лабораторного стана 105/260 × 250 кафедры АММ ДГМА.

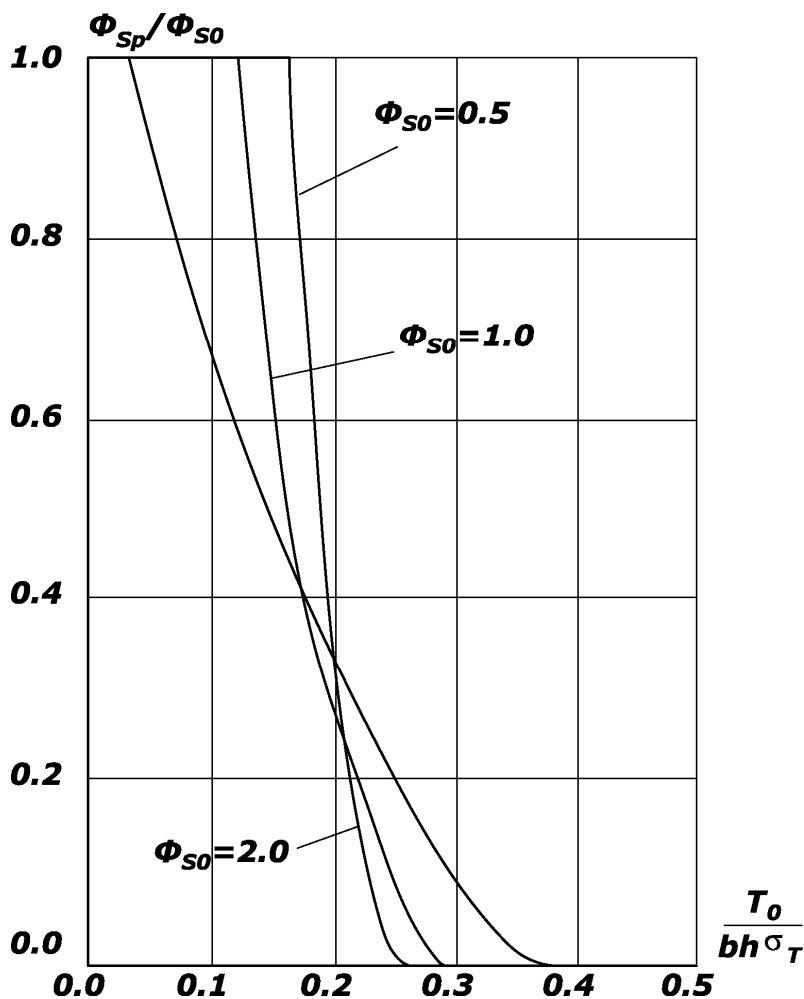


Рис. 2. Расчетные распределения соотношения результирующего Φ_{Sp} и исходного Φ_{S0} показателей плоскостности в зависимости от приведенной величины заднего натяжения $T_0/(bh\sigma_T)$ (сталь 45; $b = 200$ мм; $h = 1$ мм)

ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о существенном и однозначном влиянии натяжения на показатели плоскостности. При высоких уровнях технологического натяжения показатель плоскостности достигает нулевого значения значительно быстрее, чем при низких, т. е. рост величины натяжения интенсифицирует процесс правки. При этом наличие значительной величины неплоскостности исходной заготовки приводит к проявлению влияния натяжения при более низких его значениях. Указанное влияние натяжения усиливается при уменьшении радиусов правильных роликов и увеличении величины их перекрытия.

Результаты численной реализации разработанной трехмерной математической модели основных показателей качества готовой металлопродукции при реализации процесса правки растяжением с изгибом на основании разбиения полосы по ее ширине и последующего совместного геометрического решения и анализа условий равновесия отдельных линий тока позволяют прогнозировать степень устранения таких дефектов формы и плоскостности, как серповидность, коробоватость и волнистость в зависимости от величины заднего натяжения, а также в зависимости от диаметров рабочих роликов, их общего количества и особенности настройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Контроль плоскостности полосы в процессе холодной прокатки цветных металлов / Б. В. Мысиков, О. В. Миронова // Цветные металлы. – 1986. – № 1. – С. 66–69.
2. Николаев В. А. Технология прокатки листов и полос : учеб. пособие / В. А. Николаев. – К. : УМК ВО, 1990. – 168 с.
3. Крылов Н. И. Исследование нового способа правки листового проката растяжением с изгибом / Н. И. Крылов, А. З. Слоним, А. А. Гурьянов // Тр. ВНИИМЕТМАШ. – М., ВНИИМЕТМАШ. – 1971. – 429. – С. 68–80.
4. О правке металлических полос при знакопеременном изгибе с растяжением / Г. Л. Химич и др. / Исследование процессов правки и термического упрочнения полос. – МТТМ СССР. – ВНИИМЕТМАШ. – М., 1980. – С. 3–7.
5. Федоринов В. А. Математическое моделирование основных показателей качества холоднокатаных лент и полос при прокатке на многовалковых станах / В. А. Федоринов, С. К. Добряк, С. Н. Удовенко // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА. – 2000. – С. 313–315.
6. Федоринов В. А. Методы расчета показателей качества при холодной прокатке и дрессировке в рабочих клетях с нулевым значением модуля жесткости / В. А. Федоринов // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск : ДГМА. – 1998. – С. 22–25.
7. Выбор рациональных уровней технологических натяжений при прокатке и отделке относительно тонких холоднокатаных лент / В. Д. Нотченко, С. К. Добряк, А. В. Герасименко, С. Ю. Саплин // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 189–192.
8. Слоним А. З. Машины для правки листового и сортового материала / А. З. Слоним, А. Л. Сонин. – М. : Машиностроение. – 1975. – 208 с.
9. Совершенствование производства холоднокатаной листовой стали / Ю. Д. Железнов и др. – М. : Металлургия, 1982. – 232 с.
10. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина / Флетчер К.; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 352 с.
11. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
12. Бахвалов Н. С. Численные методы : учеб. пособие / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М. : Наука, 1987. – 600 с.
13. Одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при правке проволоки растяжением с изгибом / А. В. Сатонин, С. Ю. Саплин, В. Д. Шеремет, В. Д. Нотченко // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – С. 172–176.

Саплин С. Ю. – канд. техн. наук, ст. преп. ДГМА;
Сатонин А. А. – студент ДГМА;
Кулик Н. А. – аспирант ДГМА;
Зеленский А. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: saplin@mail.ru