

УДК 621.982.45

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРАВКЕ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПОЛОС В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Котов К.А.¹, менеджер по моделированию дирекции по техническому развитию и качеству (ka.kotov@severstal.com)

Болобанова Н.Л.², к.т.н., доцент кафедры металлургии, машиностроения и технологического оборудования (nlbolobanova@chsu.ru)

Нуштаев Д.В.¹, к.т.н., менеджер по моделированию дирекции по техническому развитию и качеству (dv.nushtae@severstal.com)

¹АО «Северсталь Менеджмент»

(162608, Россия, Вологодская обл., Череповец, ул. Мира, 30)

²Череповецкий государственный университет

(162600, Россия, Вологодская обл., Череповец, пр. Луначарского, 5)

Аннотация. Основной завершающей стадией производства горячекатаного проката является правка на роликовых правильных машинах (РПМ) в условиях циклической знакопеременной деформации. Из-за высвобождения остаточных напряжений, неравномерно распределенных по объему металла, при резке листа с применением высокотехнологичных методов он может искривляться. Подавляющее большинство моделей расчета процесса правки в условиях циклической знакопеременной деформации не обеспечивает адекватной оценки и прогнозирования остаточных напряжений в тонком стальном листе. В работе обоснована актуальность дальнейшего развития описания напряженного состояния полосы при правке на основе применения вычислительной среды конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus. Описана реализация модели процесса правки горячекатаной полосы на РПМ. Установлена адекватность получаемых в результате моделирования значений усилий правки стальных полос экспериментальным данным. Экспериментально подтверждена сходимость результатов моделирования с данными измерений неплоскостности полосок, получаемых после раскроя листов плазмой. Определено, что после правки на верхней поверхности листа остаются растягивающие продольные остаточные напряжения, на нижней – сжимающие, в середине по толщине они равны нулю, а в остальных частях сечения значения напряжений противоположны по знаку. Установлено, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к различным отклонениям напряжений по толщине. Рост предела текучести полосы приводит к увеличению отклонений напряжений по толщине полосы. Метод моделирования процесса правки предлагается использовать для исследования напряженно-деформированного состояния горячекатаного проката и проектирования усовершенствованных режимов правки полос с обеспечением минимальных отклонений листов после их высокотехнологичной обработки.

Ключевые слова: горячекатаная полоса, напряжения, роликовая правильная машина, циклическая знакопеременная деформация, моделирование, метод конечных элементов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-808-814

ВВЕДЕНИЕ

Основной завершающей стадией производства горячекатаного проката является правка на роликовых правильных машинах (РПМ), где полоса многократно последовательно изгибается при прохождении между роликами (рис. 1). Исправление неплоскостности полос на этой машине достигается знакопеременным упругопластическим изгибом, максимальным в первых роликах, постепенно уменьшающимся к последним за счет наклона верхней и неподвижной нижней кассет.

После правки лист, не имеющий неплоскостности, при резке с применением высокотехнологичных методов, например таких, как лазерная или плазменная резка, может искривляться. При этом отклонение от плоскости контрольной плиты нередко превышает тре-

бования, установленные стандартом. На рис. 2 показан изгиб горячекатаного листа толщиной 3 мм после раскроя на установке плазменной резки на полоски шириной 100 мм и длиной 2 м. Отклонение от плоскостности у краевых полосок в этом случае составляло 70 мм. Риск возникновения таких деформаций во время и после раскроя вынуждает потребителей металлопроката запрашивать обеспечение плоскостности деталей и после обработки листов.

Отклонение от плоскостности получаемых деталей на установках лазерной или плазменной резки объясняется высвобождением остаточных напряжений, неравномерно распределенных по объему металла [1]. Поэтому решение вопроса прогнозирования уровня остаточных напряжений в горячекатаных листах после завершающей стадии производства – правки на РПМ с обеспечением плоскостности после обработки

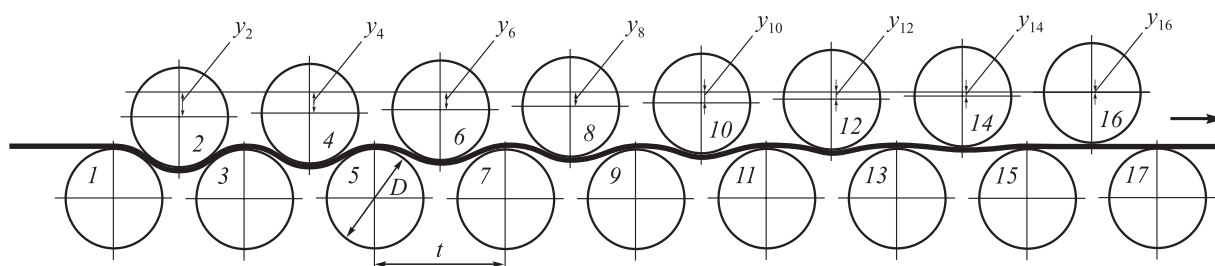


Рис. 1. Схема 17-роликовой правильной машины:
 $y_2 - y_{16}$ – смещения осей верхних роликов по вертикали; D – диаметр роликов; t – шаг роликов

Fig. 1. Scheme of 17-roller leveller:
 $y_2 - y_{16}$ – upper roller displacements; D – rollers diameter; t – pitch

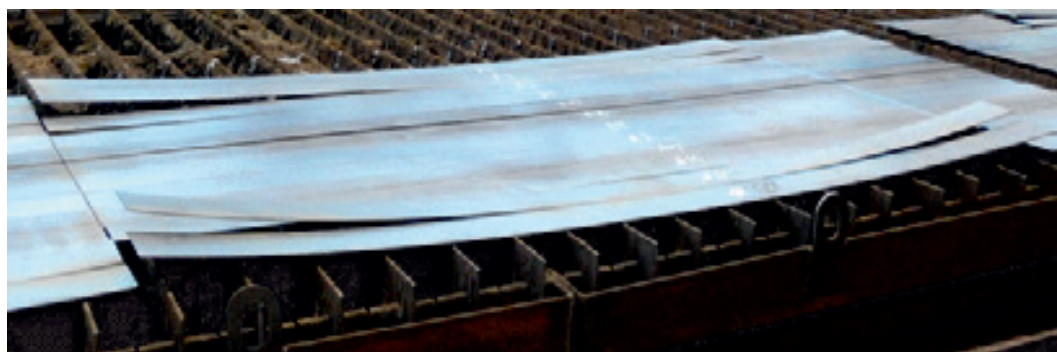


Рис. 2. Деформация листа после плазменной резки

Fig. 2. Sheet deformation after plasma cutting

высокотехнологичными методами актуально для прокатного производства.

Вопросам моделирования и изучения процесса правки в условиях циклической знакопеременной деформации посвящено большое количество исследований. В работах отечественных авторов [2 – 8] теоретический анализ и расчеты изгиба полос при правке основаны на гипотезе плоских сечений и предположении одноосного напряженно-деформированного состояния, что позволяет определять кривизну проката, энергосиловые параметры и максимальные значения напряжений при правке. При этом здесь не учитываются такие факторы, как трение при правке, скорость правки, исходная искривленность полосы. Применить их для раскрытия закономерностей распределения внутренних напряжений по толщине и ширине металла при правке горячекатаных полос не представляется возможным. В работах зарубежных авторов [9 – 14] активно используется метод конечных элементов для решения вопросов настройки роликовых правильных машин. Однако проблемы, связанные с оценкой внутренних напряжений, не затрагиваются. Авторы работы [15] проводили эксперимент на лабораторной 13-роликовой правильной машине и оценивали усилия, действующие на ролики. Авторы работ [16 – 18] рассматривали процесс правки, выполняя экспериментальные и численные исследования циклических испытаний пластины на изгиб,

исследовали вопросы управления кривизной листа после правки путем перемещения последнего верхнего ролика. В работе [18] высказывается предположение о возможности адаптации распределения остаточных напряжений по толщине в зависимости от перекрытия роликов и приводятся результаты моделирования распределений напряжений по толщине после правки в 7-роликовой правильной машине полосы из низкоуглеродистой стали DC01 толщиной 2 мм. При этом рассматривалась РПМ с независимой настройкой верхних роликов, что крайне редко применяется на практике, а также не было представлено, как в разработанной модели с использованием среды SIMULIA Abaqus учитывалась упругая разгрузка материала после правки, задавалось контактное взаимодействие полосы и роликов. Результаты исследований процесса правки в системе DEFORM, представленные в работах [1, 19, 20], также не учитывают упругое изменение напряжений в полосе после того, как она вышла из роликовой правильной машины и на нее перестали действовать внешние силы.

Для устранения выявленных недостатков в данной работе рассматривается дальнейшее развитие описания напряженного состояния полосы при правке знакопеременной циклической деформацией на основе применения вычислительной среды конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Реализация модели процесса правки горячекатаной полосы на РПМ включала следующие этапы.

1. Создание конечно-элементной модели полосы, размещаемой между верхними и нижними роликами. На рис. 3 в качестве примера показана настройка конечно-элементной модели правки полосы в 17-роликовой правильной машине. Принималась упругопластическая модель полосы, поведение стального материала полосы описывалось с кинематическим упрочнением, полученным при знакопеременном нагружении образцов на универсальной испытательной машине. Также в расчете использовались следующие характеристики материала полосы: плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; модуль упругости первого рода $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Для сокращения вычислительных затрат конечно-элементная модель полосы длиной 3000 мм имела участок с 36-ю элементами по толщине длиной 700 мм, располагаемый перед началом правки на входе в РПМ. На остальных участках модель полосы была сформирована из четырех элементов по толщине. Тип элементов модели полосы – четырехузловой гексаэдрический элемент «CPE4R». Использование таких элементов позволяет, несмотря на двухмерную постановку задачи, учесть тензор напряжений по ширине полосы, задав в этом направлении размер элемента, равным реальной ширине полосы – 1500 мм. В этом случае учитывается сила тяжести полосы. Каждый ролик представлен жестким оболочным элементом «R2D2».

Для описания контактного взаимодействия между роликами и заготовкой использовались встроенные возможности системы SIMULIA Abaqus, позволяющие учитывать статический и динамический коэффициент трения. При отсутствии касательных перемещений в контактной паре, что соответствует перемещению роликов вниз, задавался статический коэффициент трения, равный 0,25, а после начала движения полосы – динамический, равный 0,12.

2. Перемещение верхних роликов вниз в рабочее положение с обеспечением заданной величины перекрытия или зазора между верхними и нижними роликами.

3. Приложение силы тяжести к системе при отсутствии движения роликов.

4. Задание скорости вращения роликов для моделирования движения полосы за счет сил трения между ней и роликами.

5. Оценка упругой разгрузки материала после правки.

Первый и третий этапы – динамические с заданием поступательного и вращательного движения роликов РПМ, остальные – статические без задания движения роликов.

Адекватность модели оценивалась путем сравнения усилий, действующих на ролики, полученных расчетным методом и измеренных в результате эксперимента на лабораторной 13-роликовой правильной машине инженерами фирмы Fagor Arrasate [15]. Рассматривался процесс правки полосы толщиной 1,5 мм из стали TRIP700 с пределом текучести 491 МПа и пределом прочности 800 МПа. Диаметры рабочих роликов 45 мм, шаг роликов 48 мм, перемещение первого верхнего ролика на входе РПМ составляло $y_2 = 2,6 \text{ мм}$, на выходе – $y_{12} = 0,22 \text{ мм}$.

По результатам моделирования построен график изменения усилий, действующих на ролики в процессе правки (рис. 4, кривая 1). Сравнение его с кривой 2 на рис. 4, полученной в работе [15] при правке полосы в 13-роликовой машине, показал, что среднее значение погрешности расчета не превышает 10 %. Также на рис. 4 приведена кривая 3, полученная при моделировании процесса правки в системе Abaqus с изотропной моделью материала. Видно, что в этом случае не происходит снижения усилия на ролики в процессе правки из-за упрочнения материала.

Исходя из полученных результатов, был сделан вывод, что разработанная конечно-элементная модель с кинематическим упрочнением материала, учитывающим эффект Баушингера, с достаточной точностью

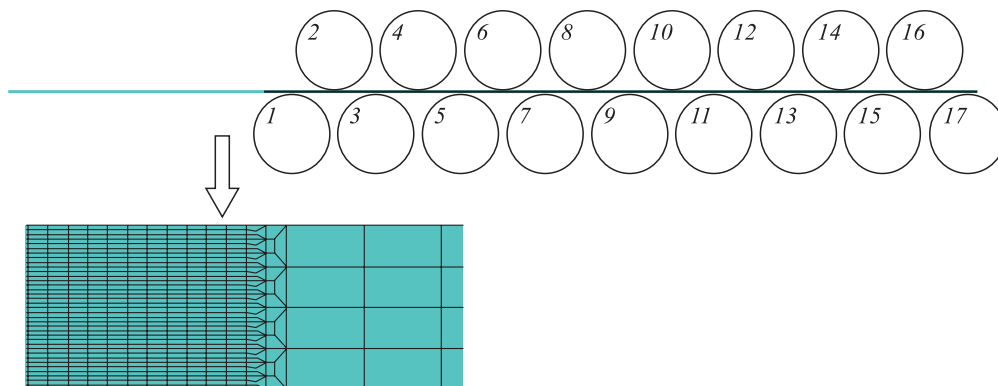


Рис. 3. Настройка модели: диаметр роликов $D = 80 \text{ мм}$; шаг роликов $t = 89 \text{ мм}$; толщина полосы $h = 3 \text{ мм}$

Fig. 3. Simulation model settings: rollers diameter $D = 80 \text{ мм}$; roller pitch $t = 89 \text{ мм}$; strip thickness $h = 3 \text{ мм}$

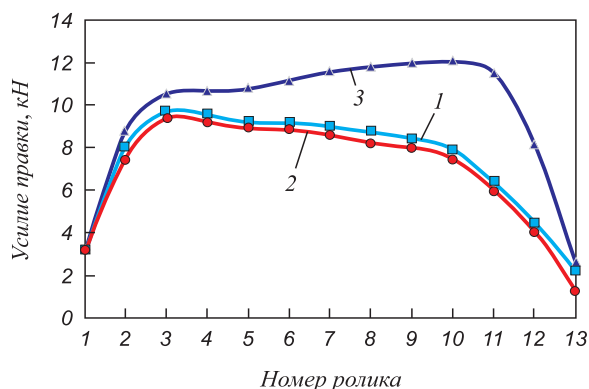


Рис. 4. Результаты изменения усилия правки, полученные: 1 – при моделировании с кинематической моделью материала полосы; 2 – в лабораторном эксперименте; 3 – при моделировании с изотропной моделью материала полосы

Fig. 4. Roller reaction forces: 1 – simulation with isotropic material hardening; 2 – experiment; 3 – simulation with kinematic material hardening

определяет напряженно-деформированное состояние полосы при правке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для изучения влияния параметров процесса правки на изгиб листов после плазменной резки был выполнен промышленный эксперимент, включающий правку горячекатаной полосы толщиной 3 мм и шириной 1500 мм из стали S355MC на 15-роликовой правильной машине фирмы LDM, установленной в АИР-3 ПАО «Северсталь». Также произведен отбор листов и их порезка на машине плазменной резки SatroniK LS3000. В промышленном эксперименте отобрано четыре листа размером 3×1500×3000 мм. Отклонения полосок от плоскостности после резки листов определялись согласно разработанной методике, включающей порезку листа на продольные полоски шириной 100 мм, отрезку участков длиной не менее 500 мм по краям полосок для исключения влияния механического реза после правки

и определение величины фактического изгиба каждой полоски длиной 2000 мм.

Выбранные четыре режима правки, отличающиеся величиной наклона верхней кассеты роликов $\Delta = y_2 - y_{14}$, полученные при моделировании максимальные напряжения и результаты измерений отклонений полосок после плазменной резки представлены в табл. 1. Скорость правки v составляла 1,6 м/с.

Анализ результатов, полученных после резки, позволил сделать следующие выводы:

- наименьшие отклонения от плоскостности после порезки имели листы, прошедшие правку по режиму № 3, что совпало с результатами моделирования – он характеризуется меньшим значением напряжений при правке;
- разработанная модель правки в среде конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus может быть использована для исследования напряженно-деформированного состояния горячекатаного проката и проектирования усовершенствованных режимов правки полос с обеспечением минимальных отклонений листов после их высокотехнологичной обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для определения характера распределения напряжений после правки рассматривалась знакопеременная циклическая деформация горячекатаной полосы в 17-роликовой правильной машине (см. рис. 1) с диаметром роликов $D_p = 80$ мм и шагом роликов $t = 89$ мм для варианта перемещений верхних роликов $y_2 \dots y_{16}$, представленного в табл. 2. В качестве материала полосы толщиной 3 мм взяты стали S235MC и S355MC, как наиболее подходящие для всех видов резки, включая лазерную, и поэтому широко востребованные современным машиностроительным производством, применяющим высокотехнологичные методы раскроя металла.

На рис. 5, а приведен фрагмент распределений напряжений по толщине горячекатаной полосы из ста-

Таблица 1

Значения перемещений верхних роликов вниз при правке в 15-роликовой РПМ и результаты моделирования напряжений и измерений отклонений полосок после плазменной резки

Table 1. Upper roller displacements of 15-roller leveller, stress state results after levelling and deformation of strip after plasma cutting

Номер режима	Перемещение роликов, мм							Δ , мм	σ_{max} , МПа	Число полосок, имеющих отклонения более 5 мм	Максимальное отклонение полосок
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}				
1	4,00	3,83	3,67	3,50	3,30	3,17	3,00	1,0	297	9	45
2	4,50	4,25	4,00	3,75	3,50	3,25	3,00	1,5	294	8	40
3	5,00	4,50	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	3,0	284	1	35
4	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	0	305	10	100

Параметры процесса правки полос толщиной 3 мм на 17-роликовой правильной машине

Table 2. Settings modes for leveling strips with thickness of 3 mm on 17-roller leveller

Сталь	Перемещение роликов, мм								v, м/с
	Y ₂	Y ₄	Y ₆	Y ₈	Y ₁₀	Y ₁₂	Y ₁₄	Y ₁₆	
S235MC и S355MC	6,00	5,57	5,14	4,71	4,29	3,86	3,43	3,00	1

ли S235MC на выходе из РПМ при ее прохождении между тремя последними роликами. Видно, что под последним верхним роликом № 16 верхние волокна сжимаются, а нижние – растягиваются. После выхода из правильной машины происходит упругая разгрузка, которая приводит к снижению и перераспределению внутренних напряжений (рис. 5, б). В сравнении с рис. 5, а, изменяется не только характер распределения напряжений по толщине полосы, но и значения напряжений. После упругой разгрузки они уменьшаются в 1,5 раза.

Для сопоставления напряженного состояния полос из сталей различной категории прочности (S235MC и S355MC) были построены графики распределений напряжений в поперечном сечении полосы на выходе из РПМ под роликом № 16 (рис. 6, а) и после упругой разгрузки (рис. 6, б).

Из рис. 6 видно, что под роликом № 16 в середине полосы на высоте от 1,3 до 1,7 мм от поверхности

имеется участок с упругой деформацией. Напряжения в оставшейся части полосы выше предела текучести, т. е. материал деформируется в упругопластической области. Максимальное отклонение напряжений составляет ±300 МПа при правке полосы из стали S235MC и ±480 МПа при правке из стали S355MC. После упругой разгрузки характер распределения напряжений по толщине становится более сложным. Верхние волокна полосы растягиваются, а волокна, расположенные на высоте от 0,5 до 1,5 мм от поверхности, сжимаются. И, наоборот, нижние волокна сжимаются, а далее, на высоте от 0,5 до 1,5 мм от нижней поверхности, растягиваются. В середине толщины полосы также происходит смена знака напряжений. При этом максимальные отклонения напряжений наблюдаются в слоях, расположенных на высоте от 1,1 до 1,4 мм от поверхности (чуть выше и в самой зоне упругих деформаций, отмечаемых на рис. 6, а). Они составляют от –189 МПа до +184 МПа в полосе из стали S235MC и от +279 МПа до –285 МПа из стали S355MC. Сравнивая эти значения с напряжениями на верхних и нижних волокнах, которые равны соответственно 125 МПа и –120 МПа в прокате из стали S235MC и 192 МПа и –174 МПа из стали S355MC, можно констатировать, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к различным отклонениям напряжений по толщине.

Выводы

На основе моделирования процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации получено, что после правки на верхней поверхности листа остаются растягивающие продольные остаточные напряжения, на нижней – сжимающие, в середине по толщине они равны нулю, а в остальных частях сечения значения напряжений противоположны по знаку.

Моделированием установлено, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к различным отклонениям напряжений по толщине. Рост предела текучести полосы приводит к увеличению отклонений напряжений по толщине полосы.

Предложенный метод моделирования процесса правки, подтвержденный количественным соответ-

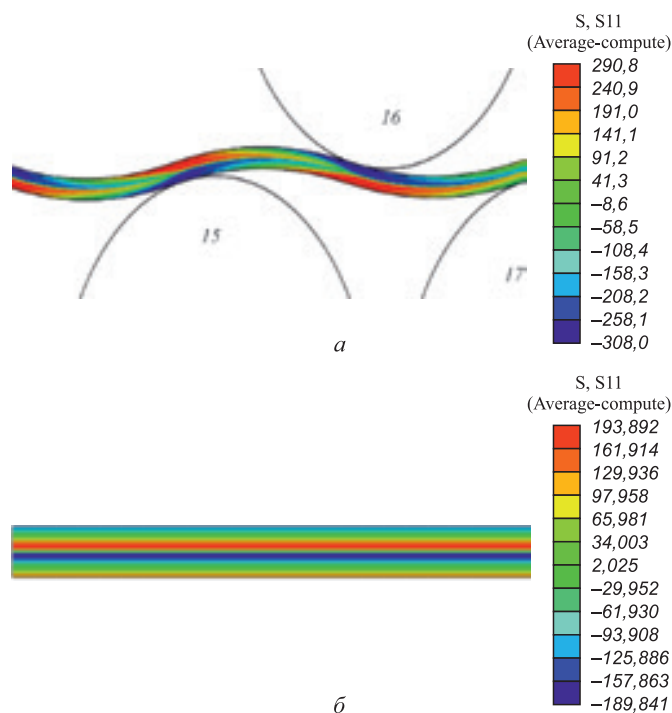


Рис. 5. Распределение напряжений по толщине полосы: а – на выходе РПМ; б – после упругой разгрузки

Fig. 5. Stress distribution over strip thickness: а – at the end of leveller; б – after levelling

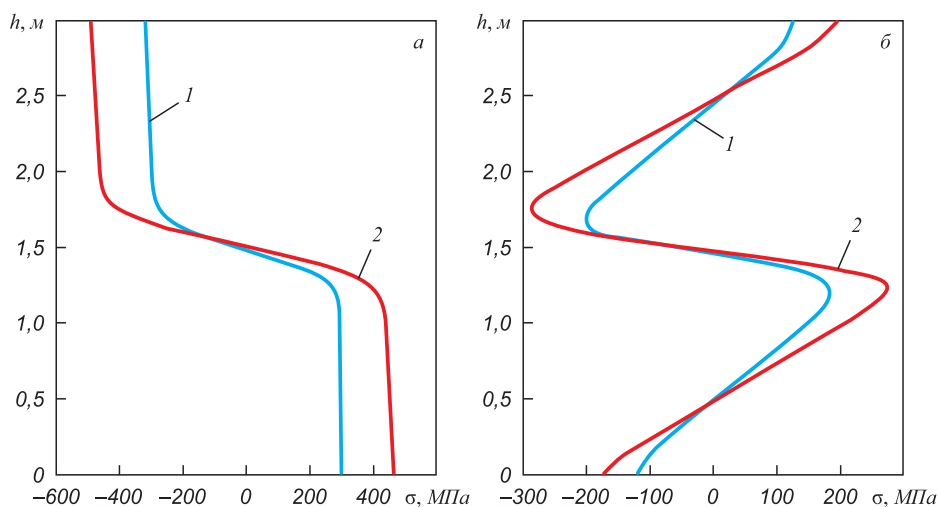


Рис. 6. Распределение напряжений по толщине полосы из сталей:
1 – S235MC; 2 – S355MC; а – под роликом № 16; б – после правки с упругой разгрузкой

Fig. 6. Stress distribution over strip thickness for steel grades:
1 – S235MC; 2 – S355MC; а – at the end of leveller; б – after levelling

вием с опубликованными данными и результатами порезки листов после правки, может быть использован для исследования напряженно-деформированного состояния горячекатаного проката и проектирования усовершенствованных режимов правки полос с обеспечением минимальных отклонений листов после их высокотехнологичной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Применение метода конечных элементов для выявления причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // *Металлы*. 2018. № 1. С. 103 – 108.
2. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката. – М.: Металлургия, 1988. – 576 с.
3. Слоним А.З., Сонин Л.А. Машины для правки листового и сортового проката. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
4. Недорезов И.В. Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. – Екатеринбург: АКВА-пресс, 2003. – 255 с.
5. Шинкин В.Н. Приближенные методы расчета (2n+1)-роликовой листопрямительной машины. Часть 1. Первое приближение // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2017. № 2 – 1. С. 40 – 44.
6. Шелест А.Е., Юсупов В.С., Перкас М.М. и др. Разработка методики определения геометрических и деформационных параметров правки металлических листов на роликопрямительных машинах // *Производство проката*. 2016. № 7. С. 2 – 8.
7. Салганик В.М., Зайцев Д.А. Математическое описание процесса холодной правки толстых листов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2016. Т. 1. № 1. С. 56 – 59.
8. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Васильев Ю.С. Уточнение методики расчета параметров правки толстых листов на роликовой правильной машине // *Сталь*. 2017. №1. С. 35 – 38.
9. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. Adjusting of roller levellers by finite element simulations including a closed-loop control // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1018. P. 207 – 214.
10. Behrens B.-A., Nadi T.El., Krimm R. Development of an analytical 3D-simulation model of the leveling process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211. No. 6. P. 1060 – 1068.
11. Madej L., Muszka K., Perzyński K. etc. Computer aided development of the levelling technology for flat products // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 60. No. 1. P. 291 – 294.
12. Liu Z. A new curvature analytical method in plate levelling process // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No. 6. P. 1094 – 1101.
13. Chen W.A 2.5-dimensional analytical model of cold levelling for plates with transverse wave defects // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2015. Vol. 22. No. 8. P. 664 – 671.
14. Doege E., Menz R., Huinink S. Analysis of the levelling process based upon an analytic forming model // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2002. Vol. 51. No. 1. P. 191 – 194.
15. Silvestre E., Sáenz de Argandoña E., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll levelling process // *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 611 – 612. P. 1753 – 1762.
16. Grüber M., Hirt G. Numerical investigation of a process control for the roller levelling process based on a force measurement // *Materials Science Forum*. 2015. Vol. 854. P. 249 – 254.
17. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. The effect of the initial stress and strain state in sheet metals on the roller levelling process // *Key Engineering Materials*. 2015. Vol. 651. P. 1023 – 1028.
18. Grüber M., Hirt G. A strategy for the controlled setting of flatness and residual stress distribution in sheet metals via roller levelling // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 207. P. 1332 – 1337.
19. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Выявление и устранение причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // *Производство проката*. 2017. № 6. С. 11 – 15.
20. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Моделирование напряжений и деформаций в плоской стальной полосе при ее правке в роликовой правильной машине // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2018. № 1. С. 68 – 73.

Поступила в редакцию 20 декабря 2019 г.
После доработки 22 декабря 2019 г.
Принята к публикации 20 октября 2020 г.

MODELING THE STRESS STATE OF STEEL STRIP AT ROLLER LEVELLING MACHINE UNDER CYCLIC ALTERNATING DEFORMATIONS

K.A. Kotov¹, N.L. Bolobanova², D.V. Nushtaev¹

¹JSC Severstal Management, Cherepovets, Vologda Region, Russia

²Cherepovets State University, Cherepovets, Vologda Region, Russia

Abstract. The final stage in the production of hot rolled steel is levelling on roller levellers under cyclic alternating deformation. When laser is cutting a sheet it may bend due to the release of residual stresses that are unevenly distributed over the volume. The majority of roller leveller models for calculating the process under cyclic alternating deformation does not provide an adequate assessment and prediction of residual stresses in a steel sheet. On the basis of finite element analysis, formation of residual stresses owing to roller levelling of hot rolled strip is disclosed. The implementation of a model of the levelling process was performed in SIMULIA Abaqus. Models are verified by comparing forces under the rollers. We have experimentally confirmed the convergence of the simulation results with the measurements of the strip flatness obtained after sheets plasma cutting. It was found that after levelling, tensile longitudinal residual stresses remain on the upper surface of the sheet, compressive ones remain on the lower surface, stresses are zero in the middle in thickness, and the stress values are opposite in sign in the remaining parts of the section. It was established that the same parameters of the levelling process of different strength categories lead to different deviations of stresses. An increase in yield strength of the strip leads to an increase in the deviation of residual stresses along the strip thickness. The proposed method of simulation of roller levelling process should be used to study the stress-strain state of hot-rolled steel and to design improved strip levelling setting modes with minimal residual stress deviations.

Keywords: hot rolled strip, stresses, roller levelling machine, cyclic alternating deformation, modeling, finite element method.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-808-814

REFERENCES

- Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A. Application of the finite element method to reveal the causes of loss of planeness of hot-rolled steel sheets during laser cutting. *Russian Metallurgy (Metallurgy)*. 2018, vol. 2018, no. 1, pp. 103–108.
- Tselikov A.I., Polukhin, P.I., Grebenik, V.M. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. T. 3. Mashiny i agregaty dlya proizvodstva i otdelki prokata* [Machines and Units of Metallurgical Plants. Vol. 3. Machines and Units for Production and Finishing of Rolled Products. Textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 576 p. (In Russ.).
- Slonim A.Z., Sonin L.A. *Mashiny dlya pravki listovogo i sortovogo prokata* [Machines for Levelling of Sheet and Long Products. Textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 232 p. (In Russ.).
- Nedorezov I.V. *Modelirovanie protsessov pravki prokata na rolikovykh mashinakh* [Modeling of Levelling Processes on Roller Machines. Textbook]. Ekaterinburg: AKVA-press, 2003, 255 p. (In Russ.).
- Shinkin V.N. Approximate methods for calculating a $(2n + 1)$ -regular sheet levelling machine. Part 1. First approximation. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2017, no. 2, pp. 40–44. (In Russ.).
- Shelest A.E., Yusupov V.S., Perkas M. M., Sheftel' E.N., Prosvirnin V.V., Akopyan K.E. Development of a method for determining the geometric and deformation parameters of metal sheets levelling on roller machines. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 7, pp. 2–8. (In Russ.).
- Salganik V.M., Zaitsev D.A. Mathematical description of the process of cold levelling of thick sheets. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2016, vol. 1, no. 1, pp. 56–59. (In Russ.).
- Maksimov E.A., Shatalov R.L., Vasil'ev Yu.S. Refinement of the methodology for calculating the parameters of levelling thick sheets on a roller machine. *Stal'*. 2017, no. 1, pp. 35–38. (In Russ.).
- Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. Adjusting of roller levellers by finite element simulations including a closed-loop control. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1018, pp. 207–214.
- Behrens B.-A., Nadi T.El., Krimm R. Development of an analytical 3D-simulation model of the levelling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, no. 6, pp. 1060–1068.
- Madej L., Muszka K., Perzyński K., Majta J., Pietrzyk M. Computer aided development of the levelling technology for flat products. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2011, vol. 60, no. 1, pp. 291–294.
- Liu Z. A new curvature analytical method in plate levelling process. *ISIJ International*. 2018, vol. 58, no. 6, pp. 1094–1101.
- Chen W.A. 2.5-dimensional analytical model of cold levelling for plates with transverse wave defects. *Journal of Iron and Steel Research Int*. 2015, vol. 22, no. 8, pp. 664–671.
- Doege E., Menz R., Huinink S. Analysis of the levelling process based upon an analytic forming model. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2002, vol. 51, no. 1, pp. 191–194.
- Silvestre E., Sáenz de Argandoña E., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll levelling process. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 611–612, pp. 1753–1762.
- Grüber M., Hirt G. Numerical investigation of a process control for the roller levelling process based on a force measurement. *Materials Science Forum*. 2015, vol. 854, pp. 249–254.
- Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. The effect of the initial stress and strain state in sheet metals on the roller levelling process. *Key Engineering Materials*. 2015, vol. 651, pp. 1023–1028.
- Grüber M., Hirt G. A strategy for the controlled setting of flatness and residual stress distribution in sheet metals via roller levelling. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 207, pp. 1332–1337.
- Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A. Detection and elimination of reasons of flatness loss in hot-rolled steel sheets during laser-beam cutting. *Proizvodstvo prokata*. 2017, no. 6, pp. 11–15. (In Russ.).
- Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A. Simulation of stresses and deformations in plane steel strip during its straightening in roller leveler. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2018, no. 1, pp. 68–73. (In Russ.).

Information about the authors:

K.A. Kotov, Modeling Manager, Directorate of Technical Development and Quality (ka.kotov@severstal.com)

N.L. Bolobanova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy, Mechanical Engineering and Technological Equipment" (nlbolobanova@chsu.ru)

D.V. Nushtaev, Cand. Sci. (Eng.), Modeling Manager, Directorate of Technical Development and Quality (dv.nushtaev@severstal.com)

Received December 20, 2019

Revised December 22, 2019

Accepted October 20, 2020