

На правах рукописи



Шопин Иван Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛЬНОЙ
ПОЛОСЫ ПРИ СМОТКЕ В РУЛОН ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЛОСКОСТНОСТИ
ПОЛОСЫ В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка металлов давлением» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет»

Бельский Сергей Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор кафедр «Металлургия» и «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»

Шаталов Роман Львович

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Центра новых металлургических технологий Федерального государственного унитарного предприятия «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

Чащин Валерий Васильевич

Ведущая организация: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

Защита состоится «21» марта 2018 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.060.02, созданного на базе ФГБУН Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) по адресу: [119334, г. Москва, Ленинский пр., 49.](#), тел. +7 (499) 135-2060

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также на официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru> и на сайте ВАК <http://vak.ed.gov.ru>.
Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенные печатью) просьба отправлять по адресу: [119334, г. Москва, Ленинский пр., 49](#), Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: kalash.ds@mail.ru

Автореферат разослан « » _____ 201_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Калашников И. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Ужесточение требований потребителей плоского металлопроката к таким показателям качества, как точность геометрических размеров и плоскостность, а также стремление производителя к снижению затрат на изготовление продукции приводит к необходимости повышения эффективности производства. Это особенно актуально в сегодняшней ситуации на рынке металлопроката, характеризующейся снижением цен из-за избытка производственных мощностей в мире.

Потребители горячекатаных полос и листов (включая цеха холодной прокатки) все чаще обозначают в качестве проблемы не только дефект «неплоскостность», но и деформацию после раскроя, вызванную остаточными напряжениями (рис. 1).

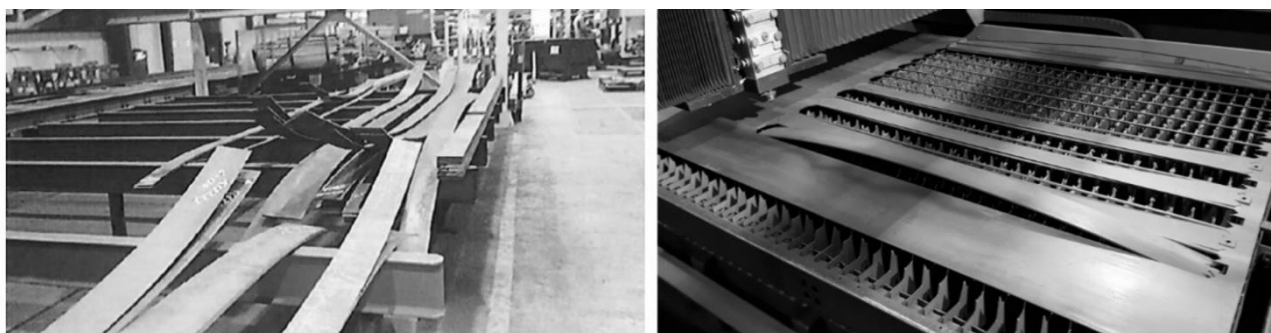


Рис. 1. Деформация горячекатаного листа после раскроя

Исследование формирования внутренних напряжений и плоскостности горячекатаных полос с целью более глубокого понимания и прогнозирования этих процессов является важной и актуальной задачей, решение которой позволит сократить издержки потребителей горячекатаного проката. При обработке полосы в клетях стана горячей прокатки формируется ее толщина, ширина и профиль поперечного сечения. Однако измеренная на выходе последней клетки чистовой группы плоскостность полосы не является окончательной: она может значительно отличаться от плоскостности, измеренной у потребителя. Это свидетельствует о том, что при смотке и охлаждении рулона плоскостность горячекатаных полос может изменяться под воздействием внутренних напряжений и высокой температуры.

Изучению вопросов, связанных с плоскостностью горячекатаных полос, посвящены работы Д.И.Суярова, М.А.Беняковского, Ю.Д.Железнова, В.Н.Выдрина, В.П.Полухина, С.Л.Коцаря, В.М.Салганика, Э.А. Гарбера, В.Л.Мазура, Л.А.Кузнецова, А.В.Третьякова, А.Ф.Пименова, В.Н.Хлопонина, Г.В.Ашихмина, Р.Л.Шаталова, С.М. Бельского, А.И.Трайно, Ю.А.Мухиина, В.А.Третьякова, В.В.Чащина, А.И.Божкова и других ученых-прокатчиков. Тем не менее, процессы формоизменения горячекатаной полосы при смотке остаются недостаточно изученными.

Научная проблематика диссертации заключается в исследовании напряженно-деформированного состояния и теплового состояния горячекатаных рулонов в процессах смотки и охлаждения в зависимости от толщины, ширины, поперечного профиля, шерохова-

тости и неплоскостности полосы, а также режимов смотки и охлаждения. Понимание закономерностей изменения напряженно-деформированного и теплового состояний горячекатаного рулона позволяет определять неравномерность вытяжки металла по ширине и, как следствие, прогнозировать изменение плоскостности полосы при смотке и охлаждении.

Исследуемая проблема актуальна для всех металлургических предприятий со станами горячей прокатки полос, в том числе и для ПАО «НЛМК»: маршрут обработки горячекатаных полос в цехе динамной стали включает агрегат подготовки горячекатаных рулонов, где вырезаются участки полосы с критической величиной неплоскостности для исключения потерь, связанных со сбоями в стыкосварочных машинах и уводами в накопителях последующих агрегатов: агрегата нормализации и непрерывно-травильного агрегата. Для подката с допустимой неплоскостностью агрегат подготовки горячекатаных рулонов может быть исключен из маршрута обработки, что снижает издержки производства. Однако отсутствие достоверной информации о фактической плоскостности полос, поступающих из цеха горячего проката в цех динамной стали, приводит к появлению риска образования дополнительных потерь.

Все это обуславливает актуальность исследования процессов формоизменения горячекатаных полос при смотке в рулон и последующем охлаждении.

Теоретические и экспериментальные исследования проведены в лабораториях и цехах горячего проката и динамной стали ПАО «НЛМК». Внедрение результатов осуществлялось в ПАО «НЛМК». Расчеты выполнены автором на кафедре «Обработки металлов давлением» ФГБОУ ВО «ЛГТУ».

Цель работы. Прогнозирование плоскостности остывшей полосы для снижения потерь в цехе динамной стали за счет математического моделирования процессов формоизменения при смотке и охлаждении рулона.

Поставленная цель реализуется путем решения комплекса следующих задач:

1. Разработка математической модели напряженно-деформированного состояния рулона при смотке с учетом комплексного влияния выпуклости профиля поперечного сечения, шероховатости, неплоскостности и температурного профиля горячекатаной полосы.
2. Разработка математической модели теплового и напряженно-деформированного состояний рулона горячекатаной полосы с учетом неравномерности плотности смотки по ширине, шероховатости, неплоскостности и температурного профиля.
3. Разработка математической модели формоизменения горячекатаной полосы в рулоне по механизму ползучести.
4. Проверка адекватности разработанных математических моделей.

5. Теоретический анализ формоизменения горячекатаной полосы в рулоне и разработка практических рекомендаций по снижению потерь в цехе холодной прокатки от неплоскостности горячекатаной полосы.

Научная новизна результатов исследования

1. Решена задача нахождения напряженно-деформированного состояния композиции неплотно сопряженных полых цилиндров переменной толщины неравномерно нагруженных по образующим со свободными торцами.

2. Разработаны модели напряженно-деформированного состояния рулона в процессе смотки, напряженно-деформированного и теплового состояний рулона в процессе охлаждения после горячей прокатки, отличающиеся учетом комплексного влияния режима натяжения, длины, толщины, ширины, профиля поперечного сечения, шероховатости, неплоскостности и температурного профиля полосы.

3. Показано, что процесс формоизменения при смотке и охлаждении рулона после горячей прокатки оказывает значимое воздействие на плоскостность полосы на концевых участках. Разработана модель прогнозирования плоскостности горячекатаной полосы, учитывающая неравномерность продольной деформации по механизму ползучести в процессе охлаждения рулона после смотки.

Практическая значимость работы

1. В результате выполнения представленной в диссертации работы были разработаны рекомендации по критическим величинам параметров профиля поперечного сечения, симметричной и ассиметричной составляющих плоскостности, при превышении которых изменяется маршрут обработки рулона. Это позволило уменьшить количество аварийных остановок и, как следствие, снизить расходный коэффициент на агрегате нормализации с 1,013 т/т в 2014 году до 1,009 т/т в 2015 году. Результаты исследований были закреплены в «Регламенте по предъявлению несоответствующей продукции и отнесению на виновника горячекатаных рулонов с превышением нормативного расходного коэффициента».

2. Результаты работы позволили классифицировать дефекты горячекатаных полос по степени критичности. Внедрение разработанного «Классификатора дефектов электротехнической изотропной стали 0-3-й группы легирования и углеродистых марок стали» привело к увеличению доли рулонов, обрабатываемых без агрегата подготовки горячекатаных рулонов цеха динамной стали с 44% (январь-октябрь 2016г.) до 66% (ноябрь-декабрь 2016 г.) без увеличения производственных потерь на непрерывно-травильном агрегате цеха динамной стали.

3. На основе слоистой модели напряженно-деформированного состояния рулона разработан и внедрен в производство оптимальный режим смотки проката с полимерным покрытием, позволивший снизить расходный коэффициент с 1,0013 т/т до 1,0003 т/т, выход брака с 0,0411%

до 0,0047% и выход несоответствующей продукции с 0,3168% до 0,2860% за счет улучшения устойчивости рулонов.

4. Разработаны программы расчета напряженно-деформированного и теплового состояний рулона в процессе смотки горячекатаной полосы; программы зарегистрированы в Общероссийском фонде алгоритмов и программ (свидетельства о регистрации №2017614068 и №2017611244).

5. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы на металлургических предприятиях полного цикла, включая «Северсталь», ММК, ArcelorMittal Темиртау и др., производящие холоднокатаный прокат.

Апробация и реализация результатов диссертации

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках: международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», г. Липецк, Россия, 8–11 декабря 2015 г.; II-ой международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», г. Липецк, Россия, 23–25 ноября 2016 г.; международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития машиностроения», Липецк, 17-18 ноября 2016 г.; областного профильного семинара «Школа молодых ученых по проблемам гуманитарных, естественных и технических наук», Липецк, 24 ноября 2016 г.; VIII конференция молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий», Москва, 1 марта 2017г.

Публикации

Основное содержание и результаты работы опубликованы в 20 печатных трудах, в том числе 7 статей в изданиях, входящих в перечень ведущих российских рецензируемых научных журналов [1-7], рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и библиографического списка (включающего 187 наименований) и восьми приложений. Работа изложена на 238 страницах машинописного текста, содержит 117 рисунков и 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость исследования.

В первой главе проведен аналитический обзор литературных источников, посвященных процессу формирования плоскостности горячекатаной полосы на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки. Наиболее полно рассмотрены работы, связанные с процессом формоизменения полосы после обработки в чистовой группе клетей. Показано, что под воздействием температуры внутренние напряжения, возникающие при обработке на отводящем роль-

ганге, при смотке полосы и при охлаждении рулона, изменяют форму горячекатаной полосы.

Представлен сравнительный анализ моделей расчета напряженно-деформированного состояния рулона в процессе смотки, температурного поля и напряженно-деформированного состояния остывающего горячекатаного рулона. Сделаны выводы по точности и применимости моделей; сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

Во второй главе рассмотрено решение задачи для полого цилиндра конечной длины в форме Папковича-Нейбера, его сложность и недостатки. Предложено упрощенное решение в виде суммы решений задачи Ляме для каждого витка рулона. Разработана слоистая модель напряженно-деформированного состояния рулона, которая учитывает образование межвитковых зазоров, что в свою очередь позволяет корректно учитывать профиль поперечного сечения, шероховатость и неплоскостность горячекатаной полосы.

В слоистой модели рулон представляется набором вложенных цилиндров, что аналогично модели напряжений в толстостенных трубах, вложенных одна в другую с натягом. Однако модель составных труб имеет существенные недостатки: модель не обобщена для случая более трех цилиндров; модель не учитывает изменение радиуса на величину натяга, что весьма значимо для тонких слоев; для определения внутренних напряжений от натяга вложенных цилиндров необходимо знать величины внутреннего и внешнего радиуса каждого отдельного цилиндра, а также величину натяга, в общем случае для слоистой системы (витков рулона) эти данные неизвестны. Изложенные недостатки устраняются в слоистой модели.

В слоистой модели отдельный виток представляется полым цилиндром конечной длины, неравномерно нагруженным по образующим, поведение которого описывается уравнением закона Гука, выраженным через перемещения. После элементарных, но громоздких преобразований уравнений теории упругости получается система уравнений (1):

$$\begin{cases} d_N^{\text{HH}} r_{N+1} + d_N^{\text{HB}} r_N = -\nu - 1 \\ d_i^{\text{BH}} r_{i+1} + (d_i^{\text{BB}} - d_{i-1}^{\text{HH}}) r_i - d_{i-1}^{\text{HB}} r_{i-1} = 0 \\ d_0^{\text{BH}} r_1 + d_0^{\text{BB}} r_0 = -\nu - 1 \end{cases}, \quad (1)$$

где $d_i^{\text{HH}} = -(R + \nu)/r_i^{\text{H}}$; $d_i^{\text{HB}} = 2r_i^{\text{B}}/[(r_i^{\text{H}})^2 - (r_i^{\text{B}})^2]$; $d_i^{\text{BH}} = -2r_i^{\text{H}}/[(r_i^{\text{H}})^2 - (r_i^{\text{B}})^2]$; $d_i^{\text{BB}} = (R - \nu)/r_i^{\text{B}}$; $R = [(r_i^{\text{H}})^2 + (r_i^{\text{B}})^2]/[(r_i^{\text{H}})^2 - (r_i^{\text{B}})^2]$; r_0^{B} , r_0^{H} - внутренний и внешний радиусы барабана моталки; r_i^{B} , r_i^{H} - внутренний и внешний радиусы i -го витка; r_i , r_{i+1} - внутренний и внешний радиусы i -го витка под нагрузкой; ν - коэффициент Пуассона.

Решением данной системы уравнений являются радиусы витков в деформированном состоянии, по которым находятся перемещения наружной и внутренней поверхностей витков. Из известных перемещений находятся радиальные и тангенциальные напряжения в рулоне.

Проверена адекватность слоистой модели расчета по косвенному параметру: ширина зоны плотной смотки. Напрямую протяженность зоны плотной смотки не используется, она определяется в процессе расчета распределения силы натяжения по ширине. Но при этом зона плот-

ной смотки является величиной, которая характеризует напряженно-деформированное состояние рулона в целом. В среднем фактическая зона плотной смотки от измеренной отличается на 3%, что свидетельствует об адекватности разработанной модели (рис. 2).

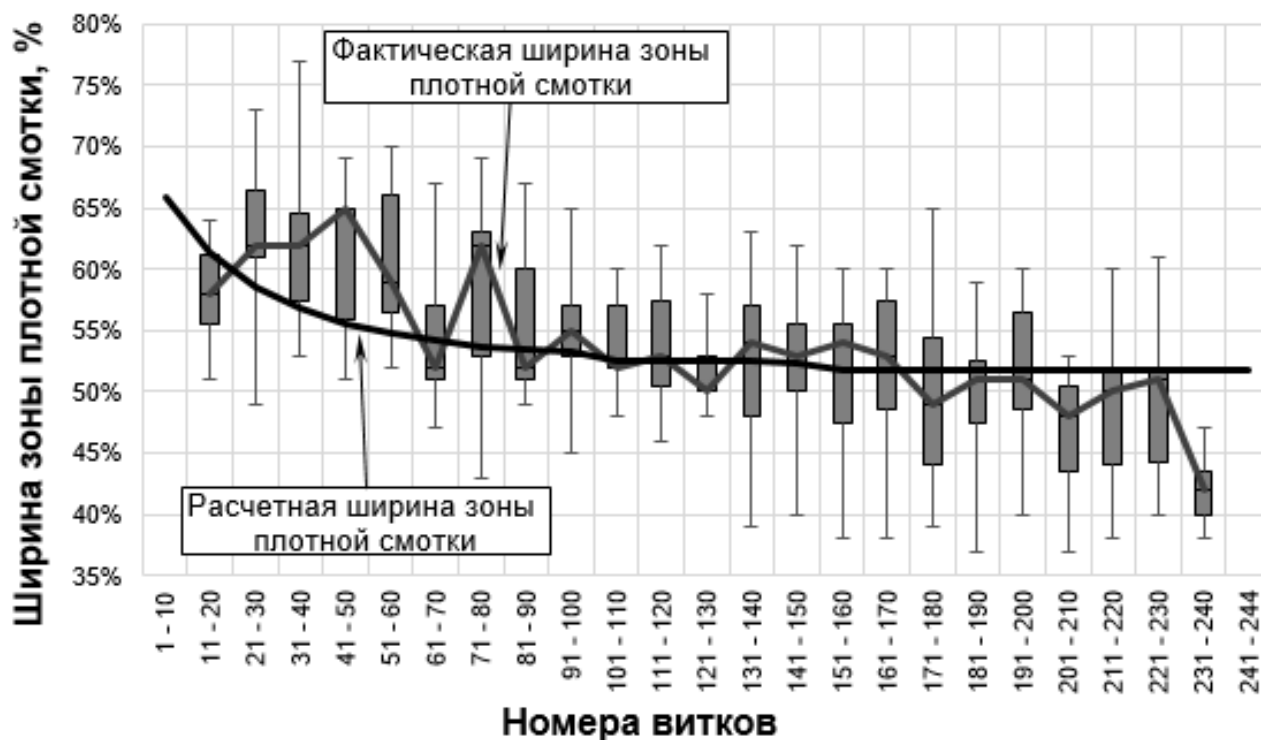


Рис. 2. Сравнение результатов расчета с фактически измеренной шириной зоны плотного прижатия соседних витков

Влияние шероховатости полосы на напряженно-деформированное состояние рулона, как правило, учитывают через анизотропию упругих свойств, но сложность данного подхода заключается в точности определения коэффициентов анизотропии и изменении этих коэффициентов по мере роста толщины рулона на барабане моталки. Поэтому для учета влияния шероховатости в работе используется теоретико-вероятностный подход: зависимость расстояния между средними линиями профилей шероховатости контактирующих поверхностей от среднего контактного давления определяется через интеграл вероятностей для нормального распределения и твердость материала полосы.

С целью включения в слоистую модель напряженно-деформированного состояния рулона факторов профиля поперечного сечения и неплоскостности полосы рулон разбивается на отдельные участки по ширине. В пределах одного участка допускается равномерное распределение давлений со стороны барабана моталки и внешнего витка. При условии отсутствия касательных напряжений на образующих рулона решения для отдельных участков по ширине через уравнение Ляме сходятся с решением для рулона, неравномерно нагруженного по образующим.

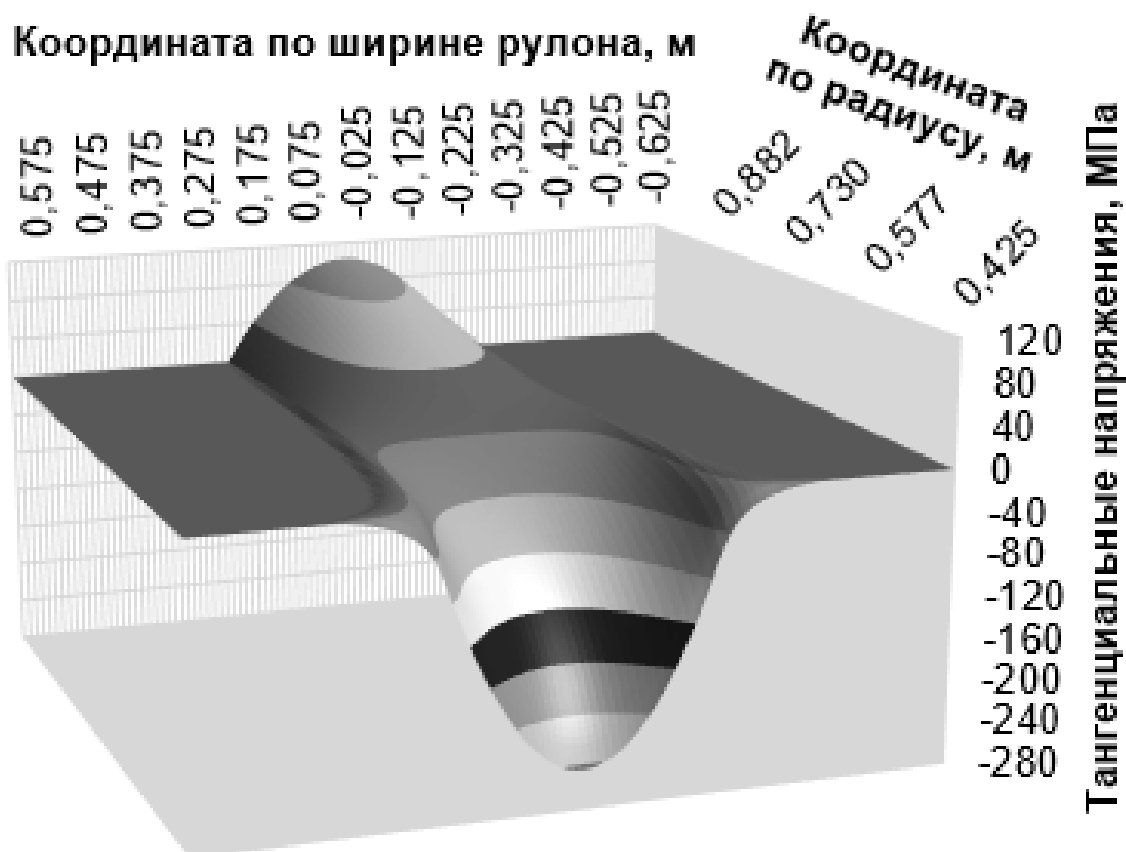


Рис. 3. Напряженное состояние в рулоне, снятом с барабана моталки

Характерное для горячекатаного рулона распределение тангенциальных напряжений в поперечном сечении представлено на рис. 3. По краям полосы наблюдаются нулевые напряжения, что свидетельствует об отсутствии контакта между витками по краям рулона. Это обусловлено, прежде всего, воздействием профиля поперечного сечения на распределение силы натяжения по ширине в процессе смотки. Напряженно-деформированное состояние рулона описывается несколькими характерными кривыми: распределением напряжений по радиусу рулона в точке максимальной толщины (в данном случае в сечении $z=0$), где напряжения максимальны; распределением тангенциальных напряжений на наружном и внутреннем витках.

Профиль поперечного сечения полосы наиболее значимый фактор для напряженно-деформированного состояния рулона. При чечевицеобразном профиле +30 мкм рост напряжений относительно плоской полосы составляет 330%. Это связано с уменьшением зоны плотного прижатия витков в рулоне и концентрацией силы натяжения в зоне максимальной толщины полосы. Величина максимальных тангенциальных напряжений зависит как от величины поперечного профиля, так и от формы профиля поперечного сечения полосы, что объясняется влиянием формы профиля на величину зоны плотной смотки. При этом разнотолщинность полосы в границах зоны плотной смотки примерно одинакова для различных величин поперечного профиля и формы профиля.

При увеличении шероховатости полосы, сжимающие напряжения на внутренних витках значительно уменьшаются (с 35 МПа при $Ra = 0$ мкм до 18 МПа при $Ra = 2,0$ мкм, умень-

шение на 57%). Так же растягивающие напряжения при росте шероховатости начинают быстрее убывать по направлению от внешних витков к центру рулона, что приводит к уменьшению зоны растягивающих напряжений на внешних витках: с 0,4 м при $R_a = 0$ мкм (примерно 70% толщины рулона), до 0,27 м при $R_a = 2,0$ мкм (примерно 45% толщины рулона). Данный эффект является следствием амортизирующего влияния шероховатости.

Неплоскостность оказывает воздействие на протяженность зоны плотной смотки полосы в рулоне: наблюдается увеличение для коробоватой полосы и уменьшение для волнистой. На внутренних витках зона плотной смотки равна: для волнистой полосы 46% от всей ширины полосы, для коробоватой полосы 74% и для ровной полосы 64%. На наружных витках 42% для волнистой полосы, 46% для коробоватой полосы и 44% для ровной полосы.

Различие величины зоны плотной смотки является следствием различия контакта барабана моталки с волнистой или коробоватой полосой. Кромки коробоватой полосы плотно прижаты к барабану моталки, что в свою очередь приводит к уменьшению радиальных напряжений в центре рулона из-за перераспределения силы натяжения. Поэтому первые смотанные витки при одной и той же величине натяжения прижаты друг к другу плотнее. Расстояние между первым и вторым витком в зоне минимальной толщины полосы для случая коробоватой полосы составляет 18 мкм, для случая сильно волнистой полосы 32 мкм. По мере накопления суммарного влияния разнотолщинности, влияние неплоскостности на распределение силы натяжения по ширине полосы уменьшается. Радиальные напряжения на краях внутренних витков не уравновешены внутри рулона, полное их снятие происходит после снятия с барабана моталки.

Третья глава посвящена исследованию устойчивости рулона из полимерного проката на основе слоистой модели напряженно-деформированного состояния. На основе результатов математического моделирования напряженно-деформированного состояния рулона определена абсолютная величина натяжения, толщина и величина гильзового натяжения, обеспечивающие устойчивость рулонов после обработки на агрегате полимерных покрытий цеха динамной стали. Это свидетельствует о том, что слоистая математическая модель напряженно-деформированного состояния рулона может быть использована для решения широкого круга задач.

Четвертая глава посвящена исследованию теплового состояния рулона и процессов формоизменения при охлаждении.

Температурное поле остывающего рулона определяется решением нестационарного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах с анизотропными нелинейными коэффициентами, представленного в следующем виде:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_r}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{r \partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad , \quad (2)$$

где T – температура; c и ρ – теплоемкость и плотность материала; τ – временная координата; λ_m , λ_r – коэффициенты теплопроводности по ширине и радиусу рулона; r , φ и z – координаты по радиусу, центральному углу и ширине рулона.

Для решения уравнения (2) требуется определить теплопроводность в радиальном направлении λ_r . Теплопроводность в радиальном направлении можно рассчитать по формуле коэффициента теплопроводности многослойной стенки (среднее гармоническое взвешенное):

$$\lambda_r = (h_m + h_n) / (h_m / \lambda_m + h_n / \lambda_n) \quad , \quad (3)$$

где h_m – толщина смотанной полосы; h_n – толщина промежуточного слоя между витками (воздуха, окарины, сажи и т.д.) с коэффициентом теплопроводности λ_n .

С учетом того, что основную долю промежуточного слоя в рулоне горячекатаной стали составляет воздух, то теплопроводность промежуточного слоя приравнивается к теплопроводности воздуха. Модель напряженно-деформированного состояния рулона в процессе смотки полосы, описанная в главе 2, позволяет определять толщину промежуточного слоя между любыми соседними витками по всей толщине и ширине рулона.

Для нахождения напряженно-деформированного состояния рулона в процессе охлаждения можно использовать слоистую модель. Однако для этого нужно знать перемещения наружной u_i^H и внутренней u_i^B поверхностей i -го витка при изменении температурного поля рулона. Перемещения находятся решением задачи термоупругости:

$$u_i^B = \frac{2}{3} \frac{r_i^B}{(r_i^H)^2 - (r_i^B)^2} \int_{r_i^B}^{r_i^H} \omega(r) r dr \quad , \quad (4)$$

$$u_i^H = \frac{2}{3} \frac{r_i^H}{(r_i^H)^2 - (r_i^B)^2} \int_{r_i^B}^{r_i^H} \omega(r) r dr \quad , \quad (5)$$

$$\omega(r) = 3\alpha_T [T(r) - T_0(r)] \quad , \quad (6)$$

где r_i^H , r_i^B – наружный и внутренний радиусы i -го витка; α_T – коэффициент температурного расширения; $T_0(r)$, $T(r)$ – начальная и конечная температура i -го витка.

Для решения практических задач часто используют реологическую модель релаксации напряжений К. Максвелла:

$$-d\sigma/d\tau = k\sigma \quad , \quad (7)$$

где σ – напряжение, τ – время; k – эмпирический параметр.

Ряд исследователей отождествляют природу явлений релаксации и ползучести, поэтому примем следующее допущение для связи между приращением напряжения и деформации:

$$d\sigma/d\tau = -E d\varepsilon/d\tau \quad (8)$$

где ε – деформация ползучести.

Явление ползучести крайне чувствительно к температуре. Эмпирическое уравнение связи между скоростью ползучести ($\xi_c = d\varepsilon/d\tau$) и температурой T полученное А. Милениным на установке GLEEBLE 3800 для углеродистых марок стали:

$$\xi_c = B(T)\sigma^{n(T)} \quad , \quad (9)$$

$$n(T) = 0,00004T + 3,7545, \quad (10)$$

$$B(T) = 1,332 \cdot 10^{-8} e^{0,0196T}. \quad (11)$$

Релаксация напряжений в чистом виде проявляется при постоянной начальной суммарной деформации. Основное условие релаксации (в упругой области) можно выразить соотношением:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_y + \varepsilon_{\text{п}} = \text{const}, \quad (12)$$

где ε_0 , ε_y и $\varepsilon_{\text{п}}$ – полная, упругая и пластическая деформация.

Условие (12) справедливо только для случая стационарной нагрузки. Для случая нестационарной нагрузки, например, термических напряжений, условие (12) не соблюдается, но при рассмотрении задачи в квазистационарной постановке можно допустить его выполнение. Для этого необходимо разбить период воздействия нагрузки на отдельные временные интервалы таким образом, чтобы в пределах отдельного интервала изменение напряжений вследствие воздействия внешних факторов можно было считать незначительным. Уравнения (8)-(12) составляют используемую в работе модель формоизменения полосы при смотке и охлаждении.

Величина зазора между соседними витками зависит от параметров, определяющих напряженно-деформированное состояние рулона: профиль поперечного сечения, шероховатость, неплоскостность полосы и натяжение при смотке. В свою очередь величина зазора между витками определяет теплопроводность в радиальном направлении и воздействует на тепловое состояние рулона.

Выделим характерные особенности процесса охлаждения рулона. Для любого рулона характерно, что торцы, внутренние и наружные витки остывают быстрее. Данная особенность позволяет характеризовать тепловое состояние рулона в целом тремя параметрами: максимальная и минимальная температуры в рулоне и разница между ними. Сформированное в процессе смотки напряженно-деформированное состояние рулона при охлаждении изменяется. Вследствие неравномерности охлаждения рулона происходит перераспределение напряжений. Но напряжения на наружных и внутренних витках изменяется противоположным образом. Скорость охлаждения граничных витков в 3-4 раза выше, чем центральных витков, что приводит к тому, что сжимающие напряжения на внутренних витках уменьшается примерно в 2 раза, а растягивающие напряжения на внешних витках наоборот увеличиваются примерно в 2,5 раза. Эта особенность определена уменьшением радиуса при уменьшении температуры витка. Неравномерность охлаждения торцов практически не сказывается на напряженно-деформированное состояние рулона вследствие отсутствия контакта между соседними витками. Напряженно-деформированное состояние в процессе охлаждения рулона характеризуется тангенциальными напряжениями на внутреннем и наружном витке, особенно в точке с максимальной толщиной полосы, в данном случае – в центре полосы.

С ростом шероховатости уменьшается скорость охлаждения. Максимальная температура сечения уменьшается до 400°C при шероховатости $Ra = 1,5$ мкм примерно на 2 часа дольше, чем при $Ra = 0,5$ мкм. Это связано с тем, что шероховатость полосы увеличивает межвитковый зазор и, как следствие, ослабляет теплопроводность в радиальном направлении. Уменьшение теплопроводности с ростом шероховатости приводит к росту неравномерности температуры по сечению рулона. При $Ra = 1,5$ мкм неравномерность температуры по сечению рулона на $10-15^{\circ}\text{C}$ больше, чем при $Ra = 0,5$ мкм. Изменение шероховатости почти не оказывает воздействие на максимальные тангенциальные напряжения на наружном витке. Снижение теплопроводности в радиальном направлении приводит к большему градиенту температур и, как следствие, увеличению давления на наружных витках. Поэтому снижение напряжений с ростом шероховатости полосы компенсируется увеличением напряжений из-за роста неравномерности температуры по сечению рулона. Из-за этого компенсационного эффекта шероховатость полосы также практически не влияет на деформацию при смотке и охлаждении.

Влияние величины натяжения при смотке полосы на тепловое состояние рулона несущественно. Разница во времени охлаждения до 400°C менее часа и неравномерность температуры по сечению рулона отличается не более, чем на 10°C . Влияние натяжения на тепловое состояние рулона связано с тем, что рост натяжения уменьшает межвитковые зазоры и, как следствие, увеличивает коэффициент теплопроводности в радиальном направлении. С ростом натяжения увеличивается и уровень напряжений. На каждые 10 МПа удельного натяжения уровень напряжений в рулоне увеличивается в среднем на 30 МПа на наружном витке и на 50 МПа на внутреннем витке (рис. 4).

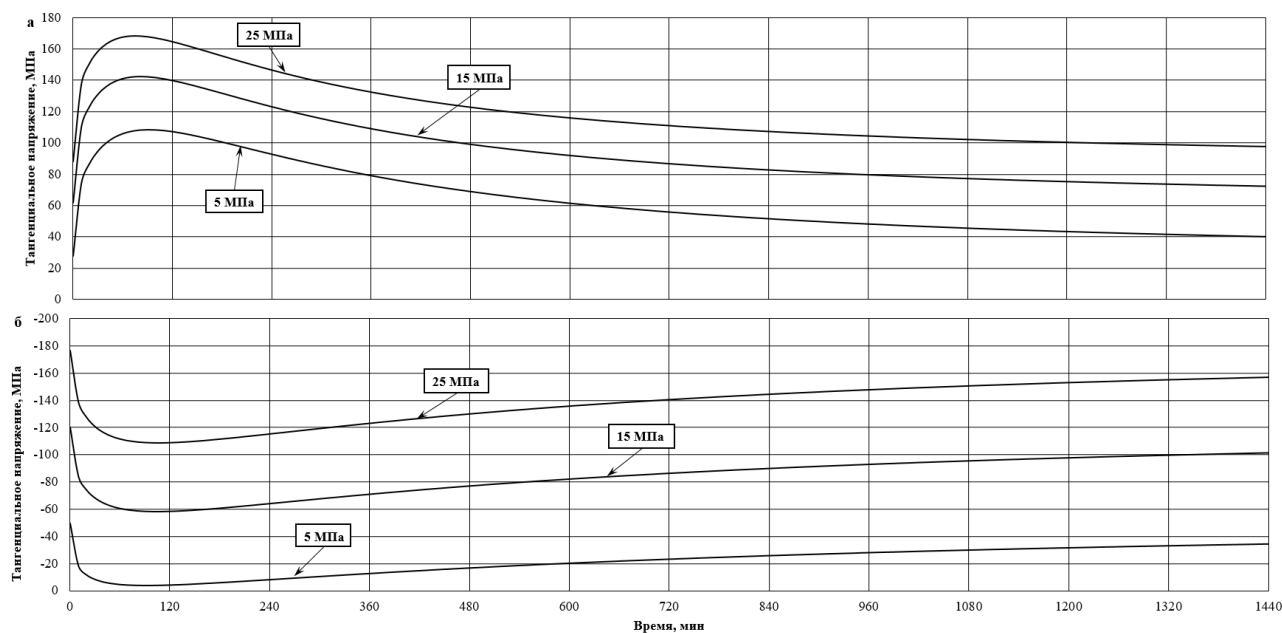


Рис. 4. Изменение максимальных тангенциальных напряжений на наружном (а) и внутреннем (б) витках в процессе охлаждения рулона в зависимости от натяжения

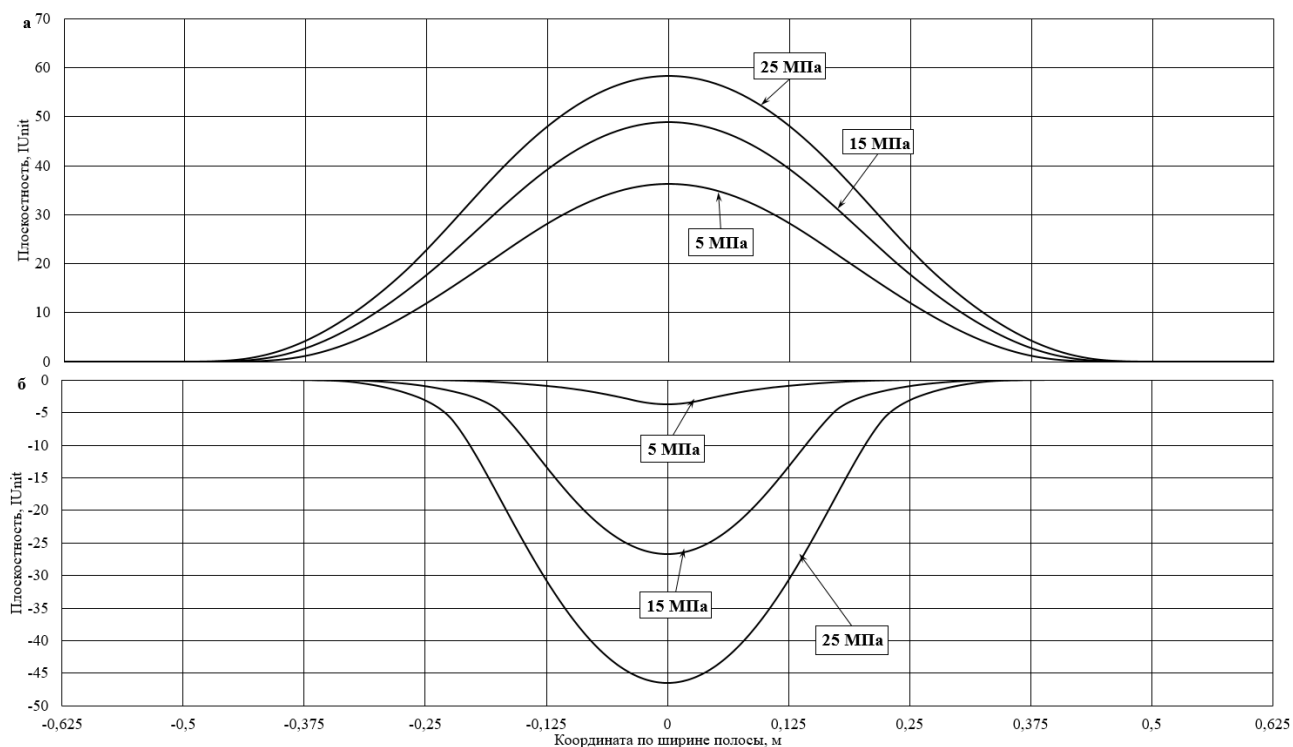


Рис. 5. Изменение плоскостности на наружном (а) и внутреннем (б) витках в процессе охлаждения рулона в зависимости от натяжения полосы при смотке

При этом с ростом натяжения форма кривых практически не меняется и почти полностью повторяет форму кривой разницы между максимальной и минимальной температурой в рулоне. Рост натяжения приводит к росту неплоскостности полосы как на наружном, так и на внутреннем витках рулона (рис. 5).

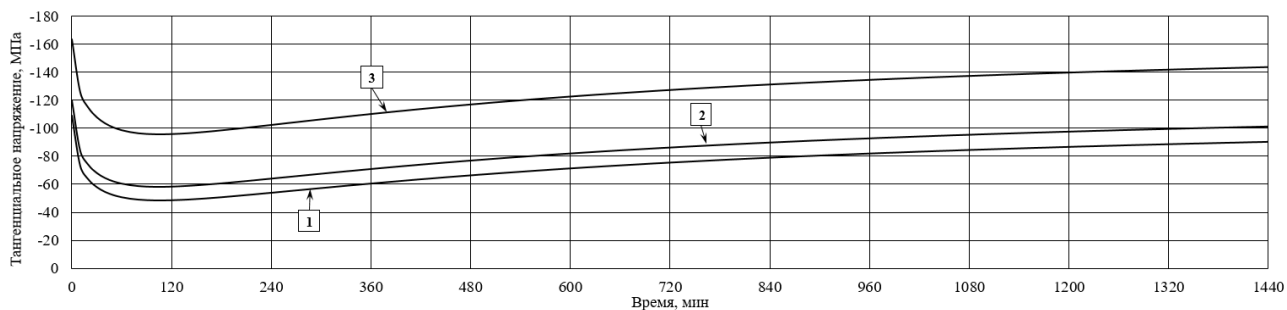


Рис. 6. Изменение максимальных тангенциальных напряжений внутреннем витке в процессе охлаждения рулона в зависимости от плоскостности:

1 – волнистость; 2 – ровная полоса; 3 – коробчатость

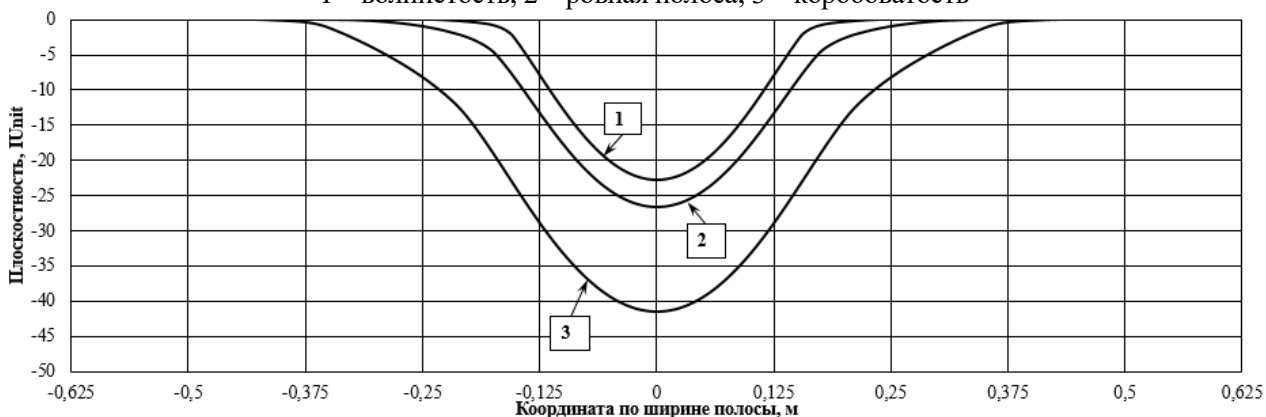


Рис. 7. Изменение плоскостности на наружном (а) и внутреннем (б) витках в процессе охлаждения рулона в зависимости от вида неплоскостности полосы при смотке:

1 – волнистость; 2 – ровная полоса; 3 – коробчатость

Неплоскостность полосы практически не оказывает влияния на тепловое состояние рулона при охлаждении. Разница в уровне напряжений для волнистой (-25 IU) и коробчатой (25 IU) полосы на внутренних витках рулона составляет примерно 50 МПа (рис. 6).

Воздействие обусловлено тем, что при смотке коробчатой полосы внутренние витки прилегают друг к другу значительно плотнее, чем витки ровной или волнистой полосы. Вид неплоскостности практически не влияет на процесс формоизменения на наружном витке. Но на внутреннем витке коробчатость усиливает процесс формоизменения (рис. 7).

Для сравнительной оценки значимости процесса формоизменения полосы при смотке и охлаждении на рис. 8. представлена сумма неплоскостности исходной полосы и сформированной в процессе формоизменения. Исходная коробчатость усиливается на наружных витках и в значительной степени устраняется на внутренних витках. Исходная волнистость усиливается на наружных и устраняется на внутренних.

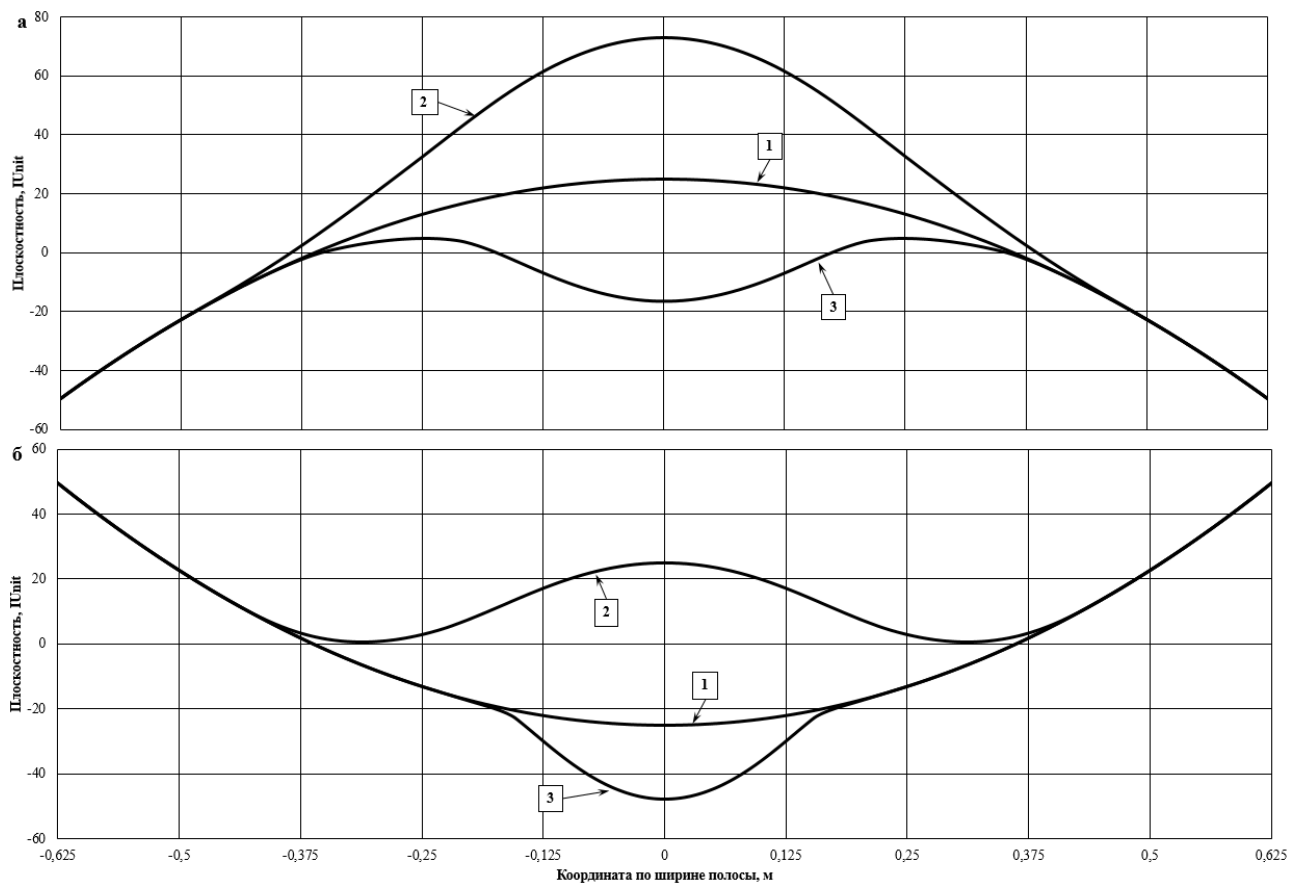


Рис. 8. Суммарная неплоскостность коробчатой (а) и волнистой (б) полос:
1 – исходная неплоскостность; 2 – наружный виток; 3 – внутренний виток

Несмотря на то, что профиль поперечного сечения полосы оказывает сильное воздействие на напряженно-деформированное состояние рулона при смотке, влияние на тепловое состояние в процессе охлаждения рулона незначительно. Снижение выпуклости с 30 мкм до 10 мкм приводит к росту скорости охлаждения (примерно на 1 час быстрее охлаждается до 400°C), но и росту неравномерности температуры по сечению рулона (примерно на 5°C). Это связано с тем, что

уменьшение зазора с уменьшением выпуклости профиля поперечного сечения вне зоны контакта соседних витков компенсируется ростом зазора между соседними витками в зоне плотного прижатия из-за уменьшения межвиткового давления.

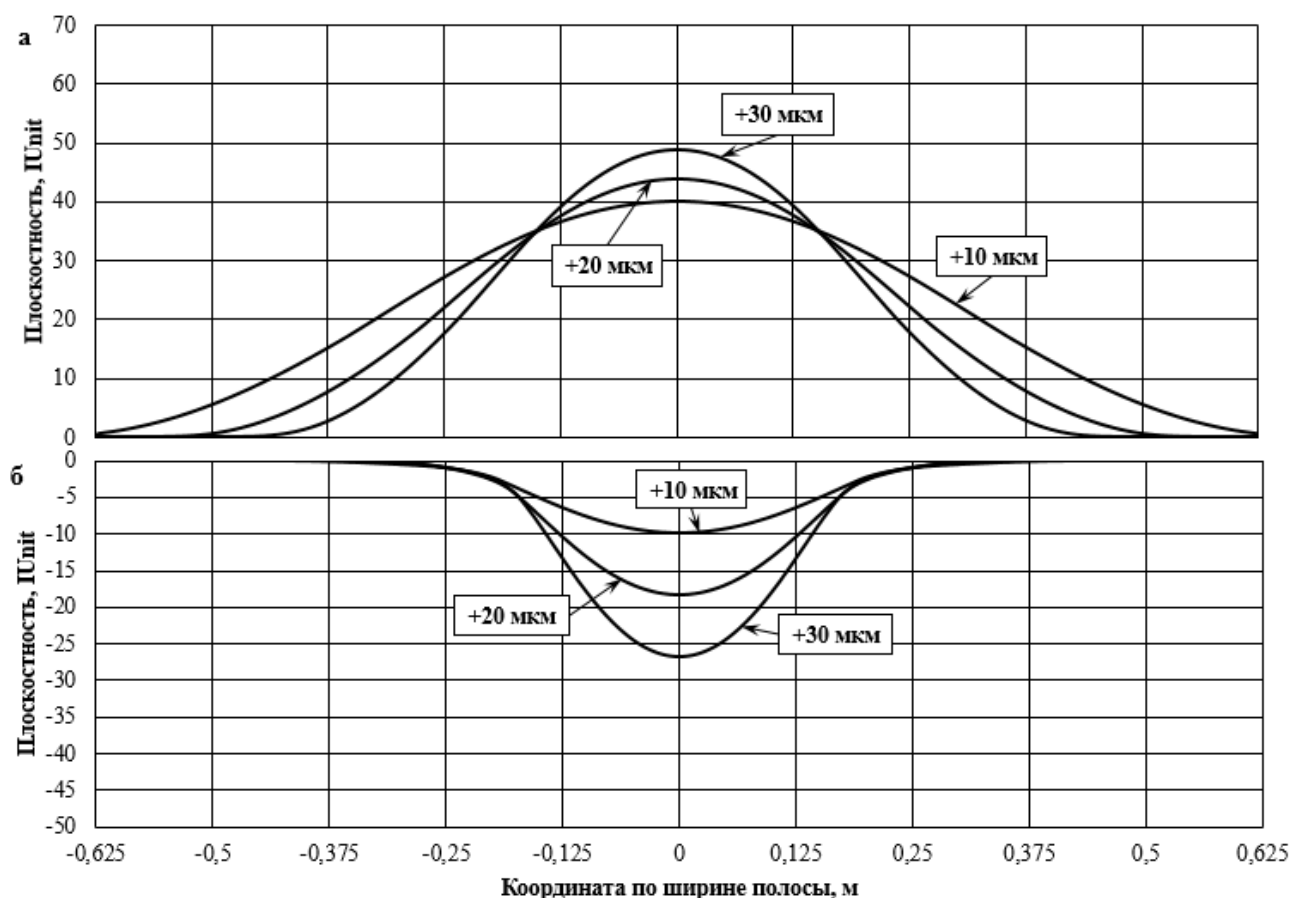


Рис. 9. Плоскостность на наружном (а) и внутреннем (б) витках от поперечного профиля полосы

За счет перераспределения напряжений по ширине полосы профиль поперечного сечения оказывает значимое воздействие на напряженно-деформированное состояние рулона при охлаждении и процесс формоизменения, особенно на наружных витках (рис. 9). При изменении выпуклости с 30 мкм до 10 мкм коробоватость полосы на наружных витках снижается с 50 IU до 40 IU.

Пятая глава посвящена анализу практического применения разработанной модели формоизменения плоскостности полосы при смотке и охлаждении рулона.

Для полученной на выходе чистовой группы клетей стана горячей прокатки плоской полосы любое последующее воздействие на плоскостность является негативным. Поэтому процент выхода металла, соответствующего наиболее жестким требованиям по плоскостности, ограничен в том числе воздействием формоизменения при смотке и охлаждении рулона.

Возможно скомпенсировать негативное воздействие смотки и охлаждения на плоскостность, задав в качестве уставки в чистовой группе клетей противоположную по величине неплоскостность полосы. Но диапазон изменения величины выпуклости профиля поперечного сечения (от 2 мкм до 155 мкм) и формы профиля поперечного сечения, характеризующегося

коэффициентом детерминации профиля (квадрат коэффициента корреляции между фактически измеренным профилем поперечного сечения и его параболической составляющей; изменяется от 0,70 до 0,99) практически исключают воздействие на процесс формоизменения при смотке и охлаждении через уставку на плоскостность полосы в чистой группе клетей. Дальнейшее совершенствование технологии горячей прокатки для стабилизации формы и величины выпуклости профиля поперечного сечения, может позволить реализовать технологию компенсации формоизменения при смотке и охлаждении через воздействие на плоскостность полосы.

Для обеспечения требуемого качества поверхности полосы режим натяжений при смотке определен в зависимости от группы жесткости марки стали, толщины и температуры смотки полосы. Воздействие на процесс формоизменения полосы через режим натяжений может привести к ухудшению качества поверхности горячекатаного проката.

Учитывая вышеизложенное, все значимые параметры (натяжение при смотке и профиль поперечного сечения полосы), определяющие процесс формоизменения полосы при смотке и охлаждении, являются практически неуправляемыми. Однако, разработанная модель позволяет прогнозировать плоскостность полосы в холодном (остывшем) состоянии, что в свою очередь позволяет уменьшить издержки потребителей горячекатаного подката.

Для сокращения количества аварийных остановок агрегата нормализации и непрерывно-травильного агрегата из-за критической неплоскостности горячекатаной полосы были разработаны рекомендации, в которых указаны допустимые диапазоны величин выпуклости профиля поперечного сечения горячекатаных полос, а также симметричной и асимметричной составляющим их неплоскостности для исключения использования агрегата подготовки горячекатаных рулонов.

Это позволило сократить расходный коэффициент на агрегате нормализации с 1,013 т/т до 1,009 т/т и уменьшить количество рулонов, обрабатываемых без агрегата подготовки горячекатаных рулонов цеха динамной стали рулонов с необрезной кромкой с 44% до 66% без увеличения производственных потерь на непрерывно-травильном агрегате цеха динамной стали.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана слоистая математическая модель напряженно-деформированного состояния рулона при смотке с учетом режима натяжения, длины, толщины, ширины, шероховатости, поперечного профиля, неплоскостности и температурного профиля сматываемой полосы.

2. Разработаны математические модели теплового и напряженно-деформированного состояний рулона горячекатаной полосы с учетом неравномерности плотности смотки по ширине из-за профиля поперечного сечения, шероховатости, неплоскостности и температур-

ного профиля.

3. На основе результатов математического моделирования напряженно-деформированного состояния рулона определена абсолютная величина натяжения, толщина и величина гильзового натяжения, обеспечивающие устойчивость рулонов после обработки на агрегате полимерных покрытий цеха динамной стали. Это свидетельствует о том, что слоистая математическая модель напряженно-деформированного состояния рулона может быть использована для решения широкого круга задач.

4. Разработана математическая модель изменения плоскостности полосы в процессе охлаждения рулона горячекатаной стали.

5. Слоистая модель напряженно-деформированного состояния рулона проверена по параметру ширины зоны плотной смотки. Ширина расчетной зоны плотной смотки в среднем отличается от измеренной на 3%. Модель теплового состояния рулона проверена по фактическим измерениям температуры. Средняя погрешность равна 2,2 °С. Модель изменения плоскостности полосы по механизму ползучести верифицирована путем сопоставления расчетного и фактического вида неплоскостности. Точность прогноза вида неплоскостности составляет 62%, на концевых участках полосы до 92%.

6. Проведен факторный анализ и разработаны практические рекомендации, позволившие снизить потери цеха динамной стали ПАО «НЛМК»: увеличить долю металла без обработки на агрегате подготовки горячекатаных рулонов с 44% до 66%; снизить расходный коэффициент на агрегате нормализации на 4 кг/т с 1,013 т/т до 1,009 т/т; снизить на полимерном прокате расходный коэффициент с 1,0013 т/т до 1,0003 т/т, выход брака с 0,0411% до 0,0047% и выход несоответствующей продукции с 0,3168% до 0,2860%. В годовом выражении это позволяет получить экономический эффект в размере 6 359 тысяч рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Шопин И.И., Бельский С.М. Упрощенная модель напряженно-деформированного состояния рулона на моталке // Производство проката. 2016. № 5. стр. 13-17.

2. Шопин И.И., Бельский С.М. Слоистая модель напряженно-деформированного состояния рулона на моталке. // Производство проката №8. 2016. стр. 3-7.

3. Шопин И.И., Бельский С.М. Влияние шероховатости полосы на напряженно-деформированное состояние рулона. // Производство проката №10. 2016. стр. 3-7.

4. Шопин И.И., Бельский С.М. Слоистая модель напряженно-деформированного состояния рулона с учетом поперечной разнотолщинности полосы. Сообщение 1. // Производство проката №3. 2017. стр. 12-19.

5. Шопин И.И., Бельский С.М. Слоистая модель напряженно-деформированного состояния рулона с учетом поперечной разнотолщинности полосы. Сообщение 2. // Производство проката №4. 2017. стр. 12-18.

6. Шопин И.И., Бельский С.М. Математическая модель напряженно-деформированного состояния рулона с учетом взаимного влияния шероховатости и поперечной разнотолщинности полосы. // Производство проката №8. 2017. стр. 3-7.

7. Бельский С.М., Шопин И.И. Параметрическая модель напряженно-деформированного состояния рулона на моталке. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том 60. №11. стр.925-931.

8. Напряженно-деформированное состояние рулона в процессе смотки на стане горячей прокатки / Шопин И. И., Бельский С.М. // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», посвященной 5-летию металлургического института ЛГТУ, ч. I, Липецк. 8-11 декабря 2015 г. - стр. 152-158

9. Напряженно- деформированное состояние рулона в процессе охлаждения / Шопин И. И., Бельский С.М. // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», посвященной 5-летию металлургического института ЛГТУ, ч. I, Липецк. 8-11 декабря 2015 г. - стр. 343-347

10. Модель изменения плоскостности горячекатаной полосы от последней клетки стана горячей прокатки до задачи рулона в обработку в цехе холодной прокатки / Шопин И. И., Бельский С.М. // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», посвященной 5-летию металлургического института ЛГТУ, ч. II, Липецк. 8-11 декабря 2015 г. - стр. 89-94

11. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Шопин И.И. Верификация модели напряженно-деформированного состояния рулона в условиях неплотной смотки. // Сборник научных трудов II-ой международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», Липецк. 23-25 ноября 2016 г. с. 32-34.

12. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Шопин И.И. Модель изменения плоскостности полосы в процессе охлаждения рулона после горячей прокатки. // Сборник научных трудов II-ой международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», Липецк. 23-25 ноября 2016 г. с. 78-80.

13. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Шопин И.И. Тепловая модель охлаждения рулона после горячей прокатки. // Сборник научных трудов II-ой международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», Липецк. 23-25 ноября 2016 г. с. 110-112.

14. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Шопин И.И. Слоистая модель напряженно-деформированного состояния рулона с учетом неплоскостности полосы. // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы разви-

тия машиностроения», ч.2, Липецк. 17-18 ноября 2016 г. с. 27-29.

15. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Шопин И.И. Формирование межвитковых зазоров при смотке горячекатаной шероховатой полосы. // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития машиностроения», ч.2, Липецк. 17-18 ноября 2016 г. с. 30-33.

16. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Шопин И.И. Расчет напряженно-деформированного состояния рулона в условиях неплотной смотки. // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития машиностроения», ч.2, Липецк. 17-18 ноября 2016 г. с. 83-86.

17. Шопин И.И., Бельский С.М. Упрощенное аналитическое решение уравнения теории упругости для полного цилиндра конечной длины, неравномерно нагруженного по образующим // Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых по проблемам гуманитарных, естественных и технических наук», Липецк. 24 ноября 2016 г. с. 312-321.

18. Шопин И.И., Бельский С.М. Формоизменение горячекатаной полосы при смотке в рулон // Сборник тезисов VIII Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий», Москва. 1 марта 2017 г. с. 18-20.

19. Шопин И.И., Бельский С.М. Программное обеспечение «Расчет напряженно-деформированного состояния рулона с учетом режима натяжения, материала и размеров сматываемой полосы». Инвентарный номер 2017614096. М.: ВНИИЦ, 2017.

20. Шопин И.И., Бельский С.М. Программное обеспечение «Программная реализация слоистой модели расчета напряженно-деформированного состояния рулона с учетом шероховатости, разнотолщинности и неплоскостности полосы». Инвентарный номер 2017614068. М.: ВНИИЦ, 2017.