
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА

УДК 621.7786:519.8

К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕМНОГО КОНЕЧНО–ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛЮЩЕНИЯ ЛЕНТЫ И ОБКАТКИ КРОМОК В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВАЛКАХ

А.М. Песин, К.Ю. Куранов
e-mail: pesin@mdv.ru

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

Статья поступила 30 мая 2003 г.

Введение

Вместо непрерывного роста производства в черной металлургии в настоящее время стремятся получить такие способы производства, при которых минимальные производственные издержки сочетаются с растущими требованиями к качеству. Для выполнения этих требований все большее значение необходимо придавать предварительному проектированию и моделированию процессов обработки давлением. Кроме того, многообразие и постоянное изменение сортамента выпускаемых плющенных лент в зависимости от потребности рынка (ежегодно только на Белорецком металлургическом комбинате осваивается до 10 типоразмеров плющенных лент из различных марок стали [1]), также приводит к необходимости прогнозирования разрабатываемых технологий производства.

Проведенный анализ существующего опыта по изучению процесса плющения [2] показал, что практически все предлагаемые зависимости носят эмпирический характер и имеют узкие границы использования. Это диктует необходимость его исследования и теоретического описания. Решить такую задачу можно только с помощью моделей, способных описать напряженно — деформированное состояние по всему объему деформированного металла. Принимая во внимание уровень развития современной вычислительной техники, наиболее подходят для этого модели, основанные на методе конечных элементов. Этот метод позволяет подойти к решениям технических проблем в условиях, близких к практическим, и без ограничений и помех, связанных с производственными неполадками.

В предлагаемой статье показана эффективность метода конечных элементов для моделирования процесса плющения ленты и обкатки ее кромок в вертикальных валках.

Описание конечно–элементной модели

На кафедре обработки металлов давлением Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова была разработана конечно–элементная модель и на ее основе создана программа для расчета объемной деформации [3].

В качестве входных параметров каждой клетки задавали: диаметры рабочих валков (горизонтальных), геометрию подката, обжатие в клетки, закон и коэффициенты трения на контактах деформируемого металла с валками, скорость вращения рабочих валков, механические свойства материала.

В результате решения задачи было необходимо найти геометрию получаемого проката.

Были приняты следующие допущения: решаемая задача — задача объемного деформирования, деформируемая среда — упругопластическая, материал заготовки под плющение — изотропен и однороден, закон трения — модернизированный закон Кулона–Амонтона (по К. Мори и К. Осакада) [4].

В качестве вариационного принципа принят модифицированный метод Лагранжа. Для деформируемой ленты действительно условие течения металла по Леви и фон Мизесу.

Численное исследование напряженно — деформированного состояния металла проводили для галевой ленты 0,3х2,0 (ленты используется в производстве пластинчатых галев для ткацкой промышленности), получаемой плющением проволоки диаметром 1,35 мм из Стали 50.

Данная программа потребовала адаптации к условиям деформирования ленты на плющильном стане конструкции СКМЗ 3/2х160 ОАО «Белорецкий металлургический комбинат».

Во-первых, адаптация заключалась в учете конкретных условий плющения ленты: фактических коэффициентов контактного трения, реального закона упрочнения соответствующей марки стали ленты, радиуса валков (горизонтальных) и геометрии подката. Для расчета вследствие симметричности достаточно было рассматривать только одну четверть проволоки (ленты) относительно продольных осей прокатки.

Во-вторых, для адаптации потребовался подбор подходящей сетки конечных элементов. Разбиение было сделано на элементы, представляющие собой четырехугольники.

Моделирование плющения ленты в горизонтальных валках

При выполнении расчета для первой клетки плющильного стана принимались следующие параметры: радиус проволоки перед первой клетью — 1,350 мм; толщина ленты на выходе из первой клетки — 0,667 мм; коэффициент трения — 0,07; материал — сталь 50; уровни натяжения: заднего — 2 Н/мм², переднего — 2 Н/мм²; диаметр горизонтальных валков — 160 мм (валки гладкие).

Как актуальное и практически важное применение исследовали задачу отклонения ширины (уширения) при плющении круглого профиля в плоский. В результате решения получили, что ширина ленты равна 1,882 мм. После деформирования выполнена перестройка сетки конечных элементов.

Для второй клетки задавались следующие параметры: толщина ленты перед клетью — 0,667 мм; ширина ленты перед клетью — 1,882 мм; толщина ленты на выходе из второй клетки — 0,590 мм; коэффициент трения — 0,07; материал — сталь 50; уровни натяжения: заднего — 2 Н/мм², переднего — 2 Н/мм²; диаметр горизонтальных валков — 160 мм (валки гладкие).

Расчетная ширина после деформирования ленты во второй клетки составила 1,967 мм.

Для подтверждения адекватности модели на базе цеха №12 ОАО «Белорецкий металлургический комбинат» были отобраны образцы (недокаты) после каждой клетки при прокатке галевой ленты размером 0,3х2,0 мм по действующей на ОАО «БМК» технологии. С помощью толщиномера проведены замеры геометрии ленты (толщины и ширины). Отклонение расчетных значений от измеренных не превышало 0,4 %.

Проводили сравнение полученных фактических и расчетных результатов ширины ленты с вычислениями по известным формулам. Результаты расчетов и их сравнение с фактической шириной ленты сведены в табл. 1.

Расчеты по формуле Кривошекова не проводились ввиду отсутствия в работе [11] указаний по определению экспериментальных коэффициентов, отражающих влияние физического состояния деформируемого металла и некоторых других факторов. Однако средняя ошибка по проведенным автором вычислениям составила от 6,95 до 13 % [11].

Все предложенные экспериментальные зависимости предназначены для расчета свободного уширения при прокатке в горизонтальных валках. Действующие на ОАО «Белорецкий металлургический комбинат» схемы производства плющенных лент специального назначения предусматривают использование вертикальных клетей. Теоретического описания процесса деформирования в вертикальных валках нет, что делает невозможным расчет утолщений, возникающих на кромках ленты при боковых обжатиях. Это приводит к ограниченности применения известных формул, как правило, уже после третьей клетки.

Таким образом, несмотря на имеющиеся формулы для расчета уширения, его определение при прокатке плющенных лент требует дальнейшей разработки.

Таблица 1

**Результаты расчета ширины ленты по известным формулам
и сравнение с фактической шириной**

Формула	После первой клетки			После второй клетки		
	Расч. ширина, мм	Факт. ширина, мм	Откл., %	Расч. ширина, мм	Факт. ширина, мм	Откл., %
Злотников [5]	2,035	1,888	8,22	1,987	1,960	1,39
Вебер (БМК) [6, 7]	1,682		10,53	2,288		10,84
Вебер (Рукер) [6, 8]	2,014		7,12	2,152		9,79
Скороходов, Заверюха [9]	2,000		5,93	2,060		5,10
Деребас [10]	2,042		8,65	2,191		11,83
Деребас (с учетом натяжения) [10]	2,023		7,64	2,033		3,72
Кривошеков [11]	—		6,95—13	—		6,95—13
Предлагаемая модель	1,882		0,32	1,967		0,36

Для проверки правильности проведенных численных расчетов по результатам экспериментов изготовлены шлифы поперечного сечения ленты и сделаны снимки образцов с микроскопа EPIQUANT с использованием программы SIAMS–600.

Проведено сравнение фактической формы кромки ленты, полученной на снимках, с расчетной путем наложения графических изображений (рис. 1). Линией обозначена расчетная форма кромки.

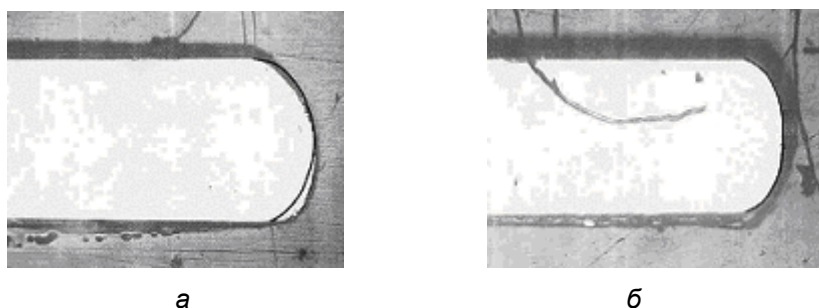


Рис. 1. Фактическая и расчетная формы кромок ленты после плющения в первой клетке (а) и после деформирования во второй клетке (б)

Для проверки эффективности моделирования процесса сравнивали фактическую площадь поперечного сечения ленты и результаты конечно–элементного расчета. Площади вычислялись путем наложения на изображения очень мелкой сетки с определенным размером квадратных ячеек и подсчетом количества элементов сетки в искомой площади.

Получены следующие результаты площади ленты после плющения в первой клетке:

$$F_{\text{расч}} = 1,174 \text{ мм}^2, \quad F_{\text{фактич}} = 1,169 \text{ мм}^2,$$

где $F_{\text{расч}}$ — площадь сечения ленты на основе расчета конечно–элементной модели;

$F_{\text{фактич}}$ — площадь ленты по снимку шлифа поперечного сечения.

Вычислены площади ленты после деформирования во второй клетке: $F_{\text{расч}} = 1,068 \text{ мм}^2$; $F_{\text{фактич}} = 1,061 \text{ мм}^2$. Отклонение расчетной площади сечения ленты от фактического составило для первой клетки 0,43 %, после деформирования во второй клетке — 0,65 %. Проводили срав

нение полученных фактических и расчетных результатов с вычислениями по известным формулам (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты расчета площади сечения ленты по известным формулам
и сравнение с фактической площадью**

Формула	После первой клетки			После второй клетки		
	Расч. площадь, мм ²	Факт. площадь, мм ²	Откл., %	Расч. площадь, мм ²	Факт. площадь, мм ²	Откл., %
Злотников [5]	1,1792	1,169	0,87	1,0937	1,061	3,08
Скороходов, Заверюха [9]	1,0726		8,25	0,9898		6,71
НИИМетиз [7]	1,1351		2,89	1,0395		2,03
Кривошеков [1]	1,1899		1,79	1,1028		3,94
Кривошеков [11]	1,1967		2,37	1,1085		4,47
Предлагаемая модель	1,174		0,43	1,068		0,65

Таким образом, результаты показывают высокую точность расчета ширины, профиля и площади сечения ленты при использовании предложенной модели в сравнении вычислениями по известным формулам.

Моделирование обкатки кромок ленты в вертикальных валках

Форма кромки и качество ее поверхности являются значимыми показателями качества для плющенных лент специального назначения (для ткацких берд, пластинчатых галев, поршневых колец автомобилей и т. д.), формирование которых связано с обкаткой в вертикальных валках [12]. Установлено, что полностью отсутствует теоретическое описание процесса деформирования в вертикальных валках, которыми оснащены практически все существующие плющильные станы [2].

Для описания процесса обкатки кромок плющенной ленты в вертикальных клетях (эджерах) была разработана объемная конечно-элементная модель. Приняты те же допущения, что и при моделировании плющения в горизонтальных валках, проведена адаптация к условиям деформирования на стане СКМЗ 3/2х160 ОАО «БМК». К входным параметрам добавили геометрию калибра эджерной клетки (рис. 2). Валки вертикальных клеток не приводные.

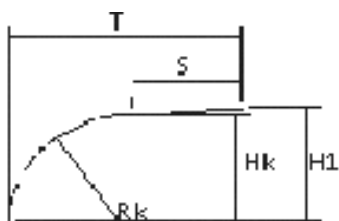


Рис. 2. Размеры калибра эджерной клетки

В качестве вариационного принципа принят модифицированный принцип Лагранжа.

При выполнении расчета для первой эджерной клетки задавались следующие параметры: ширина ленты перед клетью — 1,960 мм; ширина ленты на выходе — 1,880 мм; толщина ленты перед эджерной клетью — 0,590 мм; коэффициент трения — 0,07; материал — сталь 50; уровни натяжения: заднего — 2 Н/мм², переднего — 2 Н/мм²; диаметр вертикальных валков — 25 мм; размеры калибра ($R_k = 0,3$ мм; $h_k = 0,3$ мм; $t = 0,55$ мм; $h_1 = 0,344$ мм; $S = 0,25$ мм).

Расчетная толщина ленты — 0,606 мм. После деформирования в каждой клетке выполнялась перестройка сетки конечных элементов.

При выполнении расчета для второй эджерной клетки задавались следующие параметры: ширина ленты перед клетью — 1,882 мм; ширина ленты на выходе — 1,805 мм; толщина ленты

перед эджерной клетью — 0,606 мм; коэффициент трения — 0,07; материал — сталь 50; уровни натяжения: заднего — 2 Н/мм², переднего — 2 Н/мм²; диаметр вертикальных валков — 25 мм; размеры калибра ($R_k = 0,32$ мм; $h_k = 0,32$ мм; $t = 0,55$ мм; $h_1 = 0,361$ мм; $S = 0,23$ мм).

Расчетная толщина ленты после второго эджера — 0,621 мм. Геометрия полосы после вертикальных клетей представлена на рис. 3.

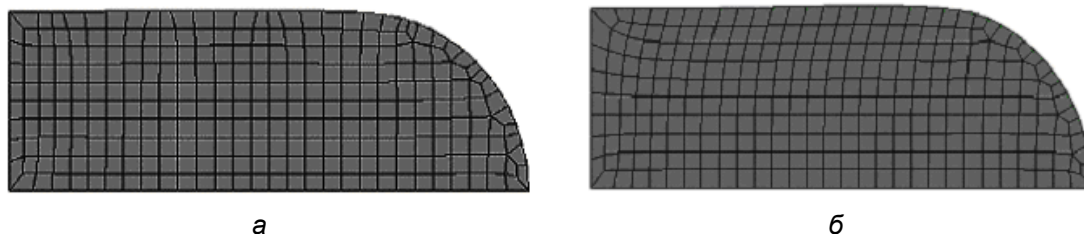


Рис. 3. Геометрия полосы и схема разбиения на элементы после первого (а) и второго (б) эджера

При сравнении результатов с расчетными, полученными в процессе конечно–элементного моделирования, показана хорошая точность вычисления ширины ленты. Отклонение расчетных значений от измеренных составило для первого эджера — 1,16 %, для второго — 1,47 %. Качественно показано утолщение на краю ленты.

Проведено сравнение фактической формы кромки ленты, полученной на снимках, с расчетной путем наложения графических изображений (рис. 4). На рис. 4, а видна небольшая асимметрия, которая вызвана неточной нарезкой калибра валка.



Рис. 4. Фактическая и расчетная формы кромок ленты после деформирования в первой (а) и второй (б) эджерных клетях

Показана высокая точность совпадения фактического и расчетного профилей ленты, что подтверждает эффективность разработанной объемной конечно–элементной модели для описания формоизменения в вертикальных валках.

Сравнивали фактическую площадь поперечного сечения ленты и результаты конечно–элементного расчета.

Площади ленты после обкатки в первой вертикальной клетке: $F_{\text{расч}} = 1,041$ мм²; $F_{\text{фактич}} = 1,054$ мм². Вычислены площади ленты после деформирования во второй эджерной клетке: $F_{\text{расч}} = 1,026$ мм²; $F_{\text{фактич}} = 1,009$ мм². Отклонение расчетной площади сечения ленты от фактического составило для первой вертикальной клетки 1,23 %, после деформирования во второй клетке — 1,68 %.

Проводили сравнение полученных фактических и расчетных результатов с вычислениями по известным формулам.

Результаты показывают высокую точность расчета площади сечения ленты после вертикальных клетей при использовании разработанной конечно–элементной модели в сравнении с известными формулами.

Таблица 3

Результаты расчета площади сечения ленты после вертикальных клетей по известным формулам и сравнение с фактической площадью

Формула	После первой клетки			После второй клетки		
	Расч. площадь, мм ²	Факт. площадь, мм ²	Откл., %	Расч. площадь, мм ²	Факт. площадь, мм ²	Откл., %
Злотников [5]	1,062	1,054	0,76	1,037	1,009	2,77
Скороходов, Заверюха [9]	0,962		8,73	0,942		6,64
НИИМетиз [7]	1,008		3,09	0,985		2,37
Кривошеков [1]	1,071		2,92	1,046		3,66
Кривошеков [11]	1,076		3,46	1,052		4,26
Предлагаемая модель	1,040		1,23	1,026		1,68

Заключение

Таким образом, численное моделирование плющения галевой ленты дает результаты, пригодные для сопоставления с опытными данными и способные послужить основой для оптимизации процесса и для новых разработок. Благодаря простоте изменения вводимых данных обеспечивается повышенная гибкость проектно–конструкторских разработок. Результаты моделирования позволяют описать контуры ленты в процессе деформации и тем самым управлять ее обжатием и геометрическими характеристиками.

Список литературы

1. Производство плющенных лент // Изготовление высококачественных метизов. Научный и практический опыт БМК. Коллективная монография. Белорецк, 1999. С. 213—238.
2. Песин А.М., Салганик В.М., Куранов К.Ю., Трахтенгерц Е.Л., Черняховский М.Б., Рудаков В.П. Плющение ленты: теория, технология, новые решения. Монография. Магнитогорск, 2002. 144 с.
3. Куранов К.Ю. Математическая модель асимметричного плющения с учетом обжатия ленты в вертикальных валках // Новые материалы: получение и технологии обработки: Тез. Всероссийской конференции. Красноярск, 2001. с.207.
4. Mori K., Osakada K. Finite Element Simulation of Three-Dimensional Deformation in Shape Rolling, Int. J. Numer. Meth. Eng., 30, 1990, 1431—1440.
5. Злотников М.И. Производство плющенной ленты. М.: Metallurgizdat., 1951. 144с.
6. Veber R.A. Wire flattening and practice // The wire industry. 1956. (273), T. 23. S. 234—246.
7. Владимир Ю.В., Нижник П.П., Пуртов Ю.А. Производство плющенной стальной ленты. М.: Metallurgiya, 1985. 120 с.
8. Рукер В.Н. Расчет усилий при плющении лент // Черная металлургия: Бюл. НТИ, 1988. № 10. С. 193.
9. Номограммы расчета технологии производства плющенных лент. Справочное издание. Скороходов Н.Е., Заверюха В.Н., Нижник П.П., Поляков М.Г., Пуртов Ю.А., Скороходов В.Н. М.: Metallurgiya, 1980. 64 с.
10. Деревас А.И. Влияние колебаний натяжения на разноширинность лент при плющении: Автореф. канд. дис. Магнитогорск: МГМИ, 1975.
11. Кривошеков В.Л. Формоизменение и силовые параметры при прокатке плющенных лент // Сталь, 2001, № 5. С. 47—50.
12. Лунев В.Е., Куранов К.Ю., Шубин И.Г., Румянцев М.И., Пуртов Ю.А. Управление шероховатостью лент и влияние шероховатости на адгезию // Моделирование и развитие процессов

обработки металлов давлением: Межрегиональный сборник научных трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 300—303.