УДК 621.771.24: 51.001.57.003.12

К.Ю.Ключников, С.М.Жучков, А.П.Лохматов, Е.В.Барышев, Ю.В.Кармазина

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ КОНЕЧНО–ЭЛЕМЕНТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ В РОЛИКОВЫХ ВОЛОКАХ

Проведена оценка точности разработанной конечно–элементной математической модели процесса волочения в роликовых волоках. Проверка адекватности модели показала достаточную точность вычислений уширения и площади ленты, совпадения расчетного и фактического контура поперечного сечения ленты.

Состояние вопроса. В настоящее время наблюдается тенденция к повышению требований к качеству продукции и технологическому оборудованию для ее производства. В связи с этим при разработке и реализации новых технологий возникает необходимость снижения затрат при их освоении. Это возможно за счет более широкого использования математического моделирования процессов ОМД. Так, например, решение задачи аналитического описания процесса волочения ленточных профилей в роликовых волоках возможно только с помощью математических моделей, описывающих напряженно–деформированное состояние по всему объему деформированного металла. Поэтому разработка и конечно–элементных математических моделей напряженно–деформированного состояния металла процессов ОМД и оценка их точности являются актуальными задачами.

Цель исследований. Целью настоящего исследования является оценка точности разработанной конечно–элементной математической модели процесса волочения высокоточных профилей ленточного типа в роликовых волоках.

Задача исследований. На основании полученных результатов по формоизменению металла в процессе волочения в роликовых волоках (уширению, форме и площади поперечного сечения ленты), при проведении численного и экспериментального исследований, путем сравнения результатов расчетов и экспериментальных данных определить насколько разработанная конечно–элементная математическая модель точно описывает процесс деформации металла в роликовых волоках.

При проведении эксперимента по плющению круглой заготовки в роликовой волоке в качестве исходной заготовки использовалась проволока диаметром 3,67 мм. Выбор диаметра исходной заготовки обусловлен необходимостью решения конкретных прикладных задач, направленных на разработку технологии производства стальной ленты 0,7 х 4,0 мм (ТУ 3–939–77). Эта работа выполняется Институтом черной металлургии НАН Украины совместно с ДП «ОЗПК–Днепр».

Методика проведения аналитического исследования. Моделирование проводили для случая деформирования исходной круглой заготовки волочением в двухроликовой волоке с различными значениями максимального относительного обжатия за переход (от 10% до 40 %).

При выполнении расчетов в качестве исходных данных принимались следующие параметры:

1. Диаметр исходной заготовки – 3,67 мм.
2. Диаметр роликов с гладкой бочкой – 80 мм.
3. Материал исходной заготовки – Сталь 70.
4. Начальное значение сопротивления металла деформации – 916,4 Н/мм^2.
5. Скорость волочения – 3,05 м/с.
6. Режимы деформирования, представленные в табл. 1.
7. При расчетах исходная круглая заготовка разбивалась на 9480 конечных элементов.

Режим обжатия круглой заготовки диаметром 3,67 мм при проведении численного эксперимента приведен нижеэ

Относительное обжатие за переход, ε, %	10	20	30	40
Высота ленты после обжатия, h_1, мм	3,27	2,93	2,54	2,20

Как результат решения по конечно элементной модели при плющении круглого профиля волочением в роликовой волоке в плоский наибольший интерес представляет формоизменение металла, в частности форма поперечного сечения получаемого профиля и его уширение.

Методика проведения экспериментальных исследований.

В качестве исходного материала при проведении эксперимента использовалась катанка диаметром 5,5 мм производства ОАО «Макеевский металлургический комбинат». Материал катанки Сталь 70крд. Химический состав стали и механические свойства катанки приведены ниже.

Химический состав стали 70крд, %:

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
0,67	0,56	0,21	0,003	0,005	0,08	0,05	0,05

Механические свойства катанки:

– Временное сопротивление – 925 Н/мм^2;

– Относительное удлинение – 17%;

– Относительное сужение – 39%.

Исходная заготовка– проволока, принятая для проведения эксперимента, была получена из катанки диаметром 5,5 мм волочением в монолитных волоках по следующему маршруту:

5,5 →4,85→4,25→4,0→3,67 мм – без термообработки.

Механические свойства наклепанной исходной заготовки–проволоки диаметром 3,67 мм:

– Временное сопротивление – 1354 Н/мм^2;

– Относительное удлинение – 11,33 %.

Эксперимент по установлению зависимостей формоизменения металла при волочении исходной круглой заготовки–проволоки диаметром 3,67 мм проводился на волочильном стане магазинного типа UDZSA2500/5 прокатной лаборатории ИЧМ.

При проведении экспериментов варьировалось обжатие исходной заготовки–проволоки за переход:

Отн. обжатие за переход, %	10	20	30	40
Высота полосы после обжатия , мм	3,30	2,93	2,57	2,20

После каждого этапа проведения эксперимента с помощью микрометра измерялась толщина и ширина ленты с периодичностью 200 мм по длине мотка.

Экспериментальные данные замеров толщины и ширины ленты:

Отн. обжатие за переход, %	10	20	30	40
Высота полосы после обжатия, мм	3,27	2,93	2,54	2,20
Ширина ленты после обжатия, мм	3,74	4,03	4,36	4,60

Для сравнения рассчитанной формы и площади поперечных сечений с фактическими значениями после каждого случая обжатия были отобраны образцы и изготовлены шлифы поперечных сечений. После чего были сделаны фотоснимки образцов.

Площади поперечных сечений вычислялись наложением на изображение очень мелкой сетки с определенным размером квадратных ячеек и подсчетом их количества в определяемой площади.

Анализ полученных результатов. Для оценки адекватности разработанной математической модели сопоставлены расчетные значения уширения, формы и площади поперечного сечения полученной ленты с экспериментальными данными.

Сопоставление значений фактической ширины после каждого этапа проведения эксперимента с рассчитанной по конечно–элементной модели, представлено на рис.1. Здесь по оси абсцисс отложена величина относительного обжатия, ε, %, а по оси ординат – коэффициент уширения металла $\beta = b_1/b_0$.

Для оценки точности разработанной математической модели были выполнены расчеты уширения металла при различных обжатиях по известным формулам [2,3,11,12,13] и с использованием разработанной модели. Результаты расчетов ширины раската и сравнение их с экспериментальными данными представлены в табл.1 и на рис.2.

Наиболее лучшие результаты расчета уширения металла при плющении показывают расчеты по формулам 1 и 3 (Злотников [2] и Деребас [12]). Погрешность расчетов уширения по этим формулам для разных случаев обжатия не превышает 4%.

Отклонения от экспериментальных значений решения по математической модели несколько выше, чем по известным формулам. Минимальное отклонение составляет 4,87% (обжатие 10%), максимальное

15,16% (обжатие 40%). Однако следует отметить, что максимальное значение отклонения не превышает допустимых значений.

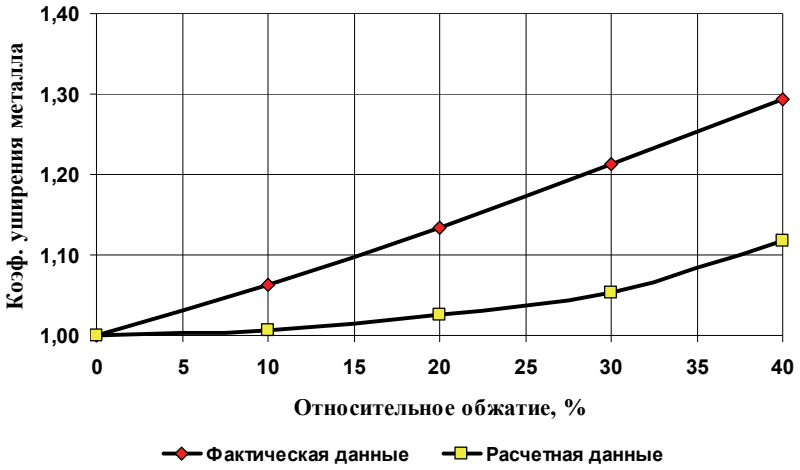

Рис.1. Изменение коэффициента уширения металла в зависимости от величины обжатия при волочении круглой заготовки диаметром 3,67 мм в роликовой волоке

Таблица 1. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных ширины раската при различных относительных обжатиях (ε)

№	Формула	ε = 10%			ε = 20%			ε = 30%			ε = 40%		
		Ширина, мм		Откл.%	Ширина, мм		Откл.%	Ширина, мм		Откл.%	Ширина, мм		Откл. %
		Расчет	Эксп..		Расчет	Эксп.		Расчет	Эксп.		Расчет	Эксп.	
1	[2]	3,81	**3,90**	2,18	4,00	**4,16**	3,86	4,27	**4,45**	4,07	4,56	**4,75**	3,91
2	[11]	3,79		2,74	3,91		5,90	4,08		8,36	4,25		10,54
3	[12]	3,82		1,89	4,06		2,46	4,45		0,04	4,90		3,21
4	[13]	3,68		5,42	3,75		9,91	3,87		13,02	4,02		15,31
5	[3]	3,81		2,31	3,96		4,75	4,15		6,60	4,33		8,70
6	Мат. модель	3,71		4,87	3,79		8,85	3,91		12,18	4,03		15,16

Для оценки точности разработанной математической модели при определении площади поперечного сечения ленты были выполнены расчеты площади поперечного сечения раската при различных обжатиях

по известным формулам [2,4, 14, 15] и разработанной модели. Результаты этих расчетов и их сравнение с экспериментальными данными представлены в табл.2 и на рис.3.

Таблица 2. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных площади поперечного сечения раската при различных относительных обжатиях (ε)

№	Формула	ε = 10%			ε = 20%			ε = 30%			ε = 40%		
		Площадь, мм^2		Откл.%	Площадь, мм^2		Откл.%	Площадь, мм^2		Откл.%	Площадь, мм^2		Откл. %
		Расч.	Эксп.		Расч.	Эксп.		Расч.	Эксп.		Расч.	Эксп.	
1	[2]	10,83	**10,56**	2,39	10,64	**10,46**	1,73	10,14	**10,21**	0,70	9,58	**9,83**	2,61
2	[14]	10,36		1,91	10,03		4,01	9,43		7,66	8,81		10,44
3	[4]	10,38		1,79	10,32		1,27	9,65		5,51	9,15		6,95
4	[15]	10,80		2,18	10,71		2,37	10,24		0,26	9,67		1,64
5	[15]	10,77		1,91	10,74		2,63	10,29		0,81	9,73		1,03
6	Мат. модель	10,04		4,94	9,58		8,41	8,75		14,29	8,07		17,93

Из диаграмм, представленных на рис.3, видно, что практически все используемые формулы применимы и дают достаточно точные результаты по расчету площади поперечного сечения раската. Отклонение площади поперечного сечения раската, полученной с помощью разработанной конечно–элементной модели от фактического не превышает в среднем 20%.

На рис.4 представлено сравнение фактической и расчетной формы поперечного сечения ленты для разных величин относительного обжатия. Из рис.4 видно, что разработанная конечно–элементная математическая модель достаточно точно описывает формоизменение поперечного сечения раската в зависимости от величины относительного обжатия.

Выводы. В результате проверки адекватности модели показана достаточная точность вычислений уширения и площади ленты, совпадения расчетного и фактического контура поперечного сечения ленты. Показано, что отклонения расчетных значений ширины и площади поперечного сечения раската, определенных с помощью разработанной конечно–элементной модели, от экспериментальных данных не превышают 15% и 17%, соответственно. Это подтверждает применимость разработанной математической модели для описания формоизменения металла при реализации процесса волочения круглой заготовки в роликовых волоках.

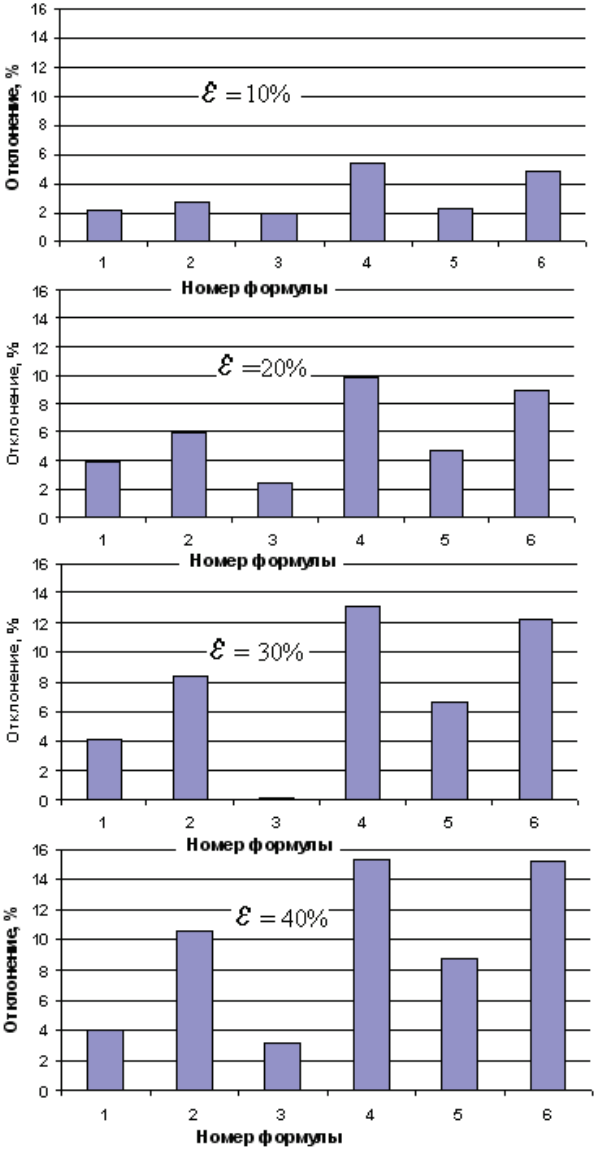

Рис.2. Сравнительный анализ отклонений расчетных значений ширины раската, определенной по разработанной математической модели и известным формулам от экспериментальных данных

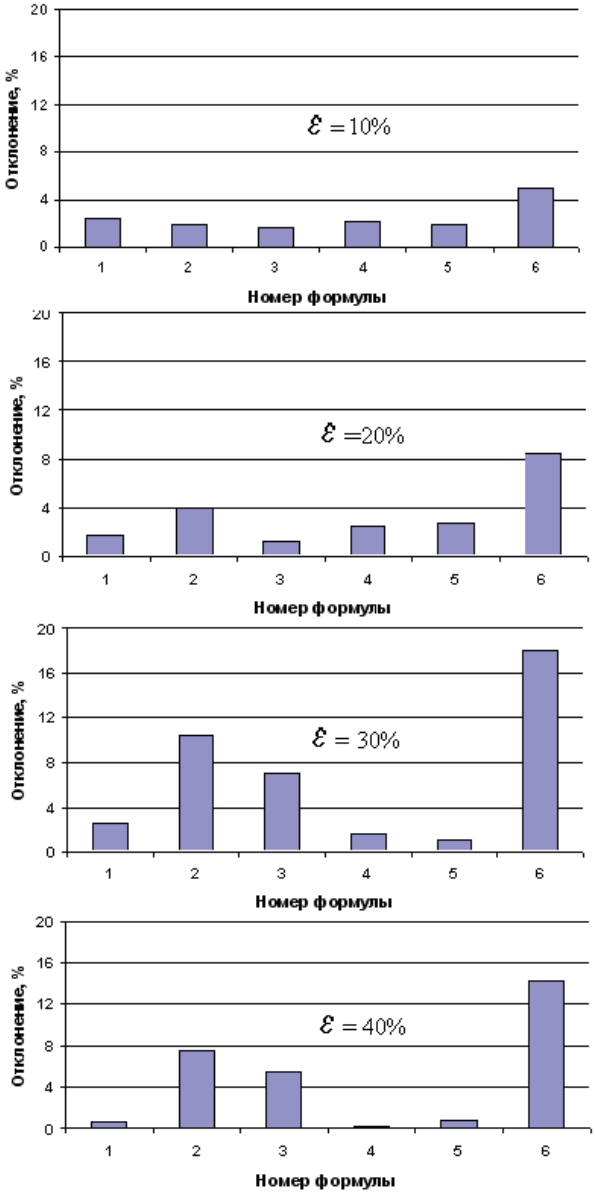

Рис.3. Сравнительный анализ отклонений расчетных значений площади поперечного сечения раската, определенной по разработанной математической модели и известным формулам от экспериментальных данных

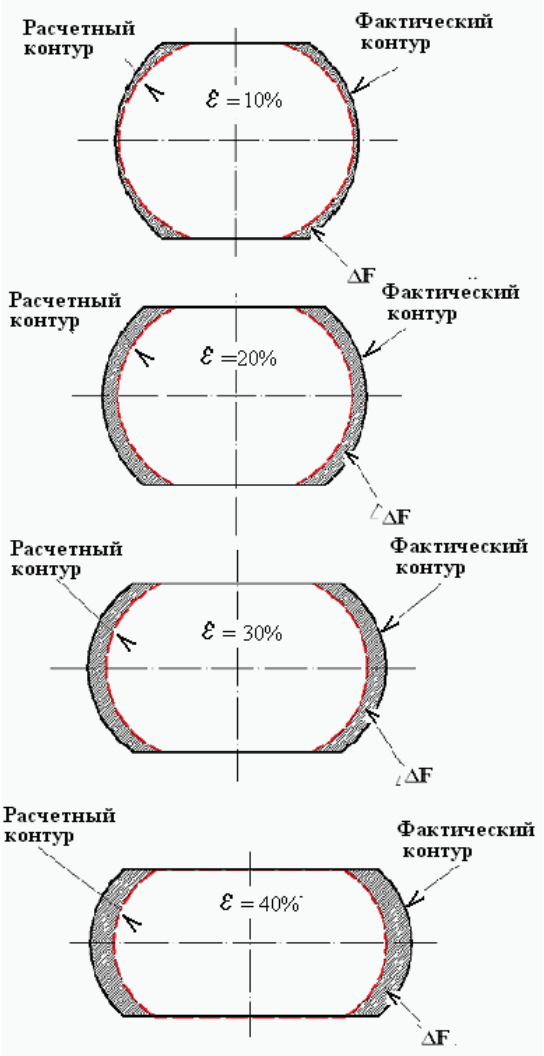

Рис.4. Сравнение фактической и расчетной формы поперечного сечения ленты

1. *Павлов И.М.* Теория прокатки (общие основы обработки металлов давлением): Учебник. – М.: Металлургиздат, 1950. – 610с.
2. *Злотников М.И.* Производство плющеной ленты. – М.: Металлургиздат, 1951. – 114с.
3. *Гулько В.И., Войцеховский В.А., Григорьев А.К.* Производство профилей и проволоки в роликовых волоках. – Ижевск: «Удмуртия», 1989. –132с.

4. *Владимиров Ю.В., Нижник П.П., Пуртов Ю.А.* Производство плющеной ленты. – М.: Металлургия, 1985. –120с.
5. *Северденко В. П., Астахов И.Г.* Распределение удельного давления по контактной поверхности при прокатке прутков круглого сечения в гладких валках // Обработка металлов давлением (сборник статей). Вып. третий. – М.: Металлургиздат, 1954. – С.63–73.
6. *Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гунн Г.С.* Деформация металла в многовалковых калибрах. – М.: Металлургия, 1979 – 240 с.
7. *Калибрование* фасонных профилей. / В.Н. Аргунов, М.З. Ерманок, А. И. Петров, М.В. Харитонович. М.: Металлургия, 1989. – 208с.
8. *Дукмасов В.Г., Выдрин А.В., Баричко Б.В.* Математическая модель формоизменения в очаге деформации при плющении проволоки в роликовой волоке // Метизное производство в 21 веке: Теория и практика: межвузовский сборник научных трудов. Магнитогорский гос. техн. ун–т. – Магнитогорск: изд–воМГТУ, 2001. –С.51–59.
9. *Кривощеков В.Л.* Формоизменение и силовые параметры при прокатке плющенных лент // Сталь. – 2001. – № 5. – С.47 – 50
10. *Гринкевич В.А., Данченко В.Н.* Краткий обзор современных методов решения краевых задач обработки металлов давлением и основные тенденции их развития // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2002. – С.113–115.
11. *Veber R.A.* Wire flatting and practice // The wire industry. – 1956. – (273), T. 23. –S.234–246.
12. *Дереба А.И.* Влияние колебаний натяжения на разноширинность лент при плющении: Автореф. Кандю дис. Магнитогорск: МГМИ, 1975
13. *ВУ До Лонг.* Уширение при плющении проволоки // Вести АН Белоруссии. – 1994. – №8, –С.47–48.
14. *Номограммы* расчета технологии производства плющенных лент. Справочное издание. // Н.Е. Скороходов, В.Н. Заверюха, П.П. Нижник и др. – М.: Металлургия, 1980. – 64с.
15. *Производство* плющенных лент // Изготовление высококачественных метизов. Научный и практический опыт БМК. – Белорецк: БМК, 1999. – С.213–238.

Статья рекомендована к печати канд.техн.наук В.И.Бибой