

**С.М.Жучков, К.Ю.Ключников, А.П.Лохматов, И.В.Сикачина,
Ю.С.Галенко, Ю.М.Беклемешев, Л.П.Барышева**

**РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ
ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПЛЮЩЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЛЕНТ
ШИРОКОГО РАЗМЕРНОГО СОРТАМЕНТА МЕТОДОМ «ПРОКАТКА–
ВОЛОЧЕНИЕ»**

Целью работы явилась разработка основных подходов к проектированию технологических схем процесса «прокатка–волочение» для производства профилей ленточного типа широкого размерного сортамента. Разработаны средства математического моделирования процесса плющения, позволяющие проектировать технологические схемы производства профилей ленточного типа. Расчетно–аналитические исследования выполнены методом моделирования с помощью конечно–элементной модели.

процесс «прокатка–волочение», технологические схемы, плющение, профили ленточного типа, моделирование

Современное состояние вопроса. Отличительными особенностями высокоточных профилей и, в частности, профилей ленточного типа является высокая равномерность временного сопротивления по длине мотка, высокая точность формы и размеров (допуск по толщине от $-0,03$ до $0,04$ мм, а по ширине до $-0,01$), разноширинность в пределах мотка не более $0,07$ мм, гладкие (без рябизны) кромки с плавным закруглением и отношением ширины сечения к его толщине до 8 [1]. Схема производства высокоточных профилей, сложившаяся в мировой практике, включает в себя получение фасонных заготовок способом горячего деформирования – горячей прокаткой, горячим прессованием (основное формоизменение металла) и последующую холодную деформацию за один – три перехода волочения или холодной прокатки. Такая технологическая схема при рациональных параметрах процессов обеспечивает достаточно высокое качество заготовки и готовых изделий. Однако, по данным экономических исследований, проведенных в Германии, прокатывать профили на промышленных прокатных станах целесообразно только при годовой потребности одного профиля не менее 20 т. Такой же вывод был сделан российскими специалистами при анализе экономических показателей прокатки и горячего прессования [2].

В тоже время применение высокоточных профилей в современном машиностроении имеет большое значение с точки зрения повышения качества выпускаемых изделий и значительного снижения себестоимости их производства. Так, например, применение стальных поршневых колец, взамен традиционных чугунных позволяет значительно повысить моторесурс машин и агрегатов, упростить и в значительной степени автоматизировать технологический процесс изготовления колец, а также сократить трудоемкое и экологически вредное литейное производство.

В Украине производство высокоточных профилей крайне ограничено, а производство профилей ленточного типа вообще отсутствует. Объемы производства такой продукции при высокой потребности в широком размерном и марочном сортаменте относительно невелики (до 3 тыс. профилеразмеров общим объемом 45–50 тыс. т. в год) [3], поэтому создание специализированного предприятия по производству высокоточных профилей и стальной плющеной ленты в этих условиях (стоимость оборудования до 20 тыс. долларов США за тонну) экономически нецелесообразно, а ориентация на их импорт ставит в зависимость от зарубежных поставщиков экономическую и технологическую безопасность указанных отраслей экономики страны.

Целью работы явилась разработка основных подходов к проектированию технологических схем процесса плющения профилей ленточного типа широкого размерного сортамента методом «прокатка–волочение».

Постановка задачи. Поэтому было предложено использовать нетрадиционные решения и подходы при разработке технологии производства высокоточных профилей. В их основе лежит выбор стали специального состава, обработка металла давлением (плющение круглой заготовки) методом «прокатка–волочение» в неприводных роликовых волоках в сочетании с экологически чистыми способами термической обработки без использования вредных охлаждающих сред в виде масел, расплавов свинца, солей и кислоты. В настоящее время по предложенной технологии в условиях прокатной лаборатории ИЧМ освоено изготовление 10 профилеразмеров таких профилей (рис.1). В работе принимали участие И.В.Сикачина, Ю.М.Беклемешев, Л.П.Барышева, Ю.С.Галенко, Ю.В.Кармазина.

Вместе с тем, особенности условий пластического равновесия металла в очаге деформации [2,3,4] при плющении круглой заготовки прокаткой–волочением (рис.2) держивают освоение новых профилей, в том числе профилей ленточного типа с отношением их ширины к толщине больше двух. Дело в том, что неравномерность обжатия проволоки–заготовки приводит к неравномерному распределению напряжений по сечению профиля: в средней части – сжатия (–), у кромок – растяжения (+), а наличие тягового усилия увеличивает зоны действия растягивающих напряжений и их величину в объеме очага деформации и, в конечном счете, при определенных условиях вызывает разрушение кромок готового профиля.

Авторы большинства публикаций, в которых рассматриваются деформационные и энергосиловые параметры процесса плющения прокаткой–волочением обычно дают только качественную оценку влияния остаточных напряжений на общее напряженно–деформированное состояние (НДС) ленты. Результаты конкретных исследований влияния параметров процесса «прокатка–волочение» на величину напряжений и характер их распределения по сечению ленты в рассмотренных публикациях отсутствуют. В то время как для обоснованного выбора параметров процесса плющения методом «прокатка–волочение» необходимо знать влияние этих параметров на величину и характер распределения напряжений по сечению ленты, с тем,

чтобы не допускать достижения растягивающими напряжениями критических значений. Такую задачу нами было предложено решать методом математического моделирования.

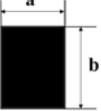
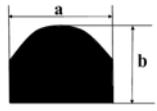
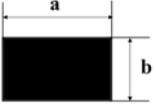
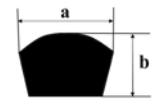
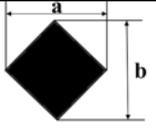
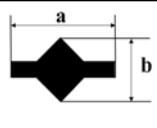
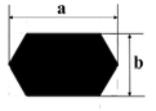
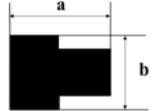
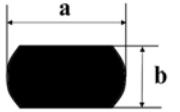
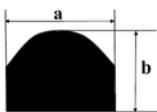
№	Сечение	Размеры, мм		№	Сечение	Размеры, мм	
		a, от– до	b, от– до			a, от– до	b, от– до
1		2,0– 6,0	2,0– 6,0	6		3,0– 16,0	2,0– 6,0
2		3,0– 8,0	2,0– 6,0	7		3,0– 8,0	3,0– 6,0
3		4,0– 8,0	3,0– 6,0	8		5,0– 8,0	3,0– 6,0
4		4,0– 10,0	2,0– 6,0	9		3,0– 8,0	3,0– 6,0
5		4,0– 10,0	2,0– 6,0	10		3,0– 6,0	3,0– 7,0

Рис. 1. Профили, освоенные в условиях прокатной лаборатории ИЧМ.

Изложение основных материалов исследования. Для выбора математической модели НДС металла в процессе плющения прокаткой–волочением был проведен анализ существующих методов его определения в процессе холодного плющения исходной круглой заготовки в двухвалковом калибре. Анализ показал, что для проведения исследований по влиянию технологических параметров процесса плющения прокаткой–волочением на изменение НДС металла наиболее достоверный результат обеспечивает использование вариационных методов, основанных на основных положениях теории пластичности [5,6]. К моделям, основанным на таком подходе, следует отнести конечно–элементную математическую модель НДС металла в процессе горячей прокатки в калибрах и на гладкой бочке, разработанную в Днепродзержинском Государственном техническом университете (ДГТУ).

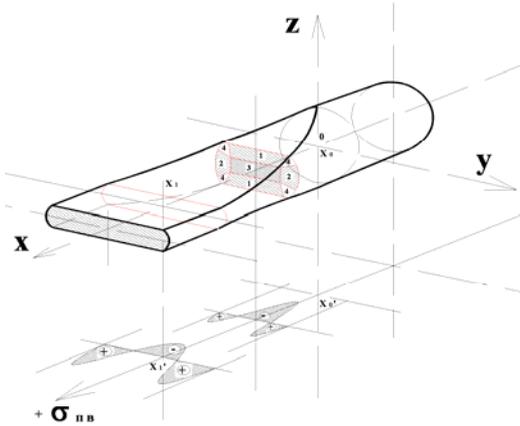


Рис.2. Схема геометрического очага деформации при плющении ленты прокаткой–волочением из круглой заготовки: X_0-X_1 – протяженность геометрического очага деформации.

Эта модель была принята нами за основу и адаптирована к условиям процесса плющения прокаткой–волочением. В

качестве основы указанной математической модели принят функционал Лагранжа в сочетании с методом штрафных функций, а в качестве математической идеализации деформируемой сплошной среды принято вариационное уравнение линейной вязкопластической среды [7–11].

Предварительно, в порядке проверки работоспособности такой модели было выполнено моделирование процессов, по которым имеются экспериментальные данные в литературных источниках: прокатка низкой полосы в гладких валках (А.И. Целиков) [12], плющение круглой заготовки в ленточный профиль в приводных валках (М.И. Злотников) [13] (рис.3).

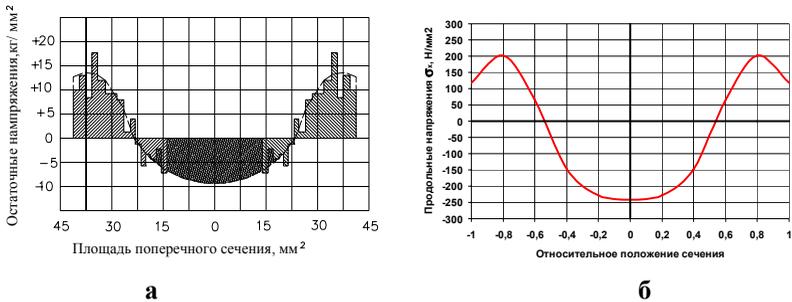


Рис 3. Эпюры распределения напряжений по поперечному сечению плющенной ленты. а – экспериментальные данные; б – расчетные данные.

Переход от модели естественного процесса прокатки (плющение в приводных валках) к прокатке–волочению осуществлен по схеме, показанной на рис.4. На рис.5 представлено сравнение фактической и расчетной формы поперечного сечения плющенной ленты.

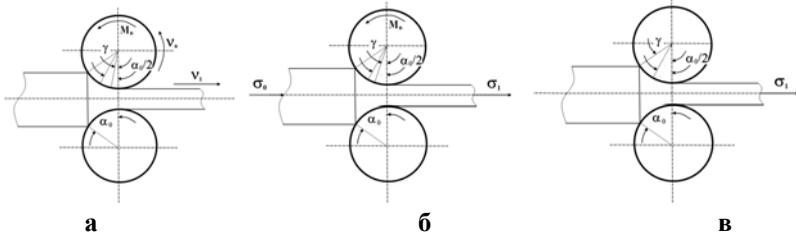


Рис. 4. Принципиальные схемы прокатки. а – естественный процесс прокатки: $\sigma_1 = \sigma_0 = 0$, $0 < \gamma = \gamma_e < \alpha_0/2$; б – прокатка с активной продольной силой: $\sigma_1 - \sigma_0 > 0$; $\gamma_e < \gamma < \alpha_0/2$; $0 < M_B < M_{Be}$; в – прокатка–волочение: $\sigma_0 = 0$, $\sigma_1 - \sigma_0 > 0$; $\gamma_{пв} = \alpha_0$; $M_B < 0$.

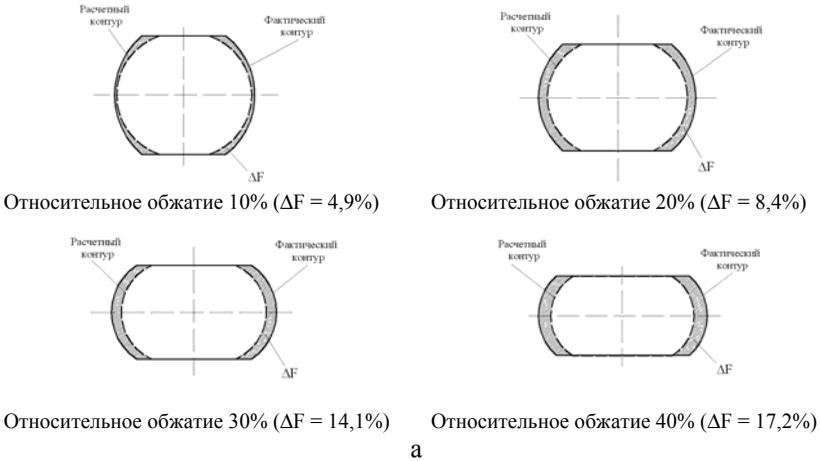


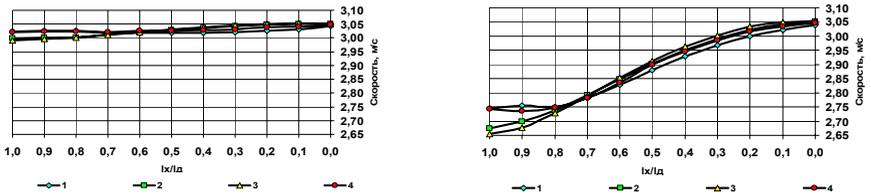
Рис.5. Результаты проверки адекватности выбранной модели процесса плющения прокаткой–волочением, адаптированной к условиям прокатной лаборатории ИЧМ: а – Сравнение фактической и расчетной формы поперечного сечения ленты; б – Изменение предела текучести металла при проведении экспериментальных и численных исследований.

Расчетно–аналитические исследования выполнялись методом моделирования с помощью конечно–элементной модели, адаптированной

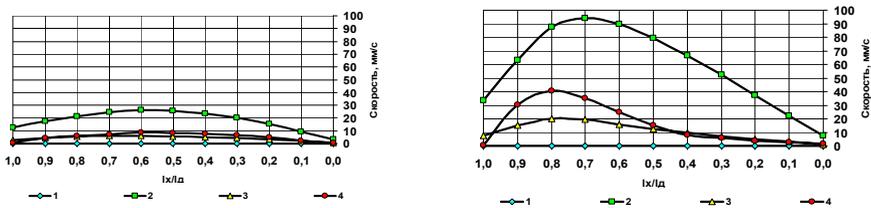
к условиям производственного участка прокатной лаборатории ИЧМ, на котором проводилась проверка результатов моделирования. Сравнение фактической и расчетной формы поперечного сечения плющеной ленты показало, что с увеличением величины относительного обжатия отклонение расчетного контура от фактического увеличивается, но не превышает допустимых пределов. Анализ изменения напряжения текучести металла при проведении экспериментальных и расчетно-аналитических исследований показал достаточно высокую точность его определения в зависимости от изменения величины относительного обжатия (отклонение при относительном обжатии 40% не превышает 5%).

В результате аналитических исследований впервые установлены особенности изменения НДС металла (рис.6,7) при плющении прокаткой-волочением исходной круглой заготовки в свободно вращающихся валках с гладкой бочкой.

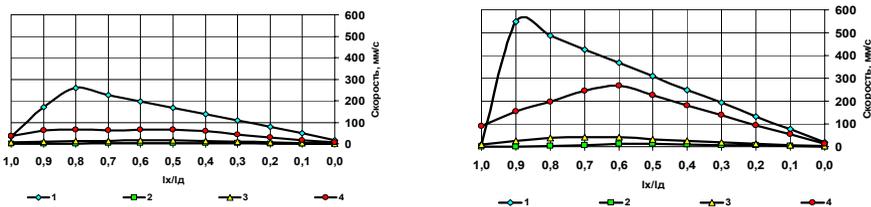
Изменение продольной составляющей скорости течения металла v_x



Изменение поперечной составляющей скорости течения металла v_y



Изменение вертикальной составляющей скорости течения металла v_z



Относительное обжатие 10%

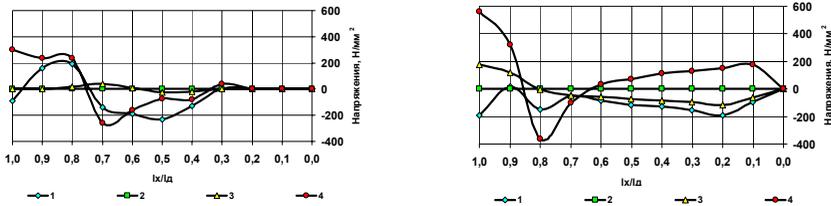
Относительное обжатие 40%

Рис. 6. Изменение составляющих поля скоростей по областям 1..4 (рис.2) поперечного сечения вдоль геометрического очага деформации.

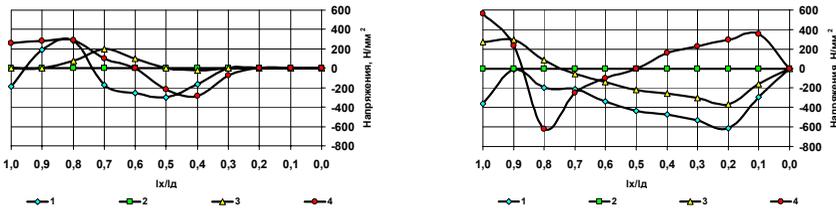
Показано, что областью поперечного сечения очага деформации, в которой возникают максимальные растягивающие напряжения,

приводящие к появлению поверхностных дефектов при плющении круглой заготовки прокаткой–волочением в свободно вращающихся валках с гладкой бочкой, является граница контактной и боковой внеконтактной областей (область 4 поперечного сечения, рис.2).

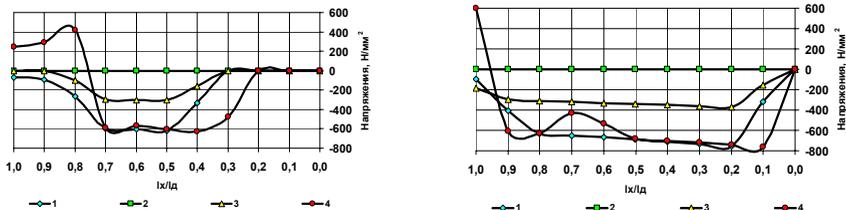
Изменение продольной составляющей поля напряжений металла σ_x



Изменение поперечной составляющей поля напряжений металла σ_y



Изменение вертикальной составляющей скорости течения металла v_z



Относительное обжатие **10%**

Относительное обжатие **40%**

Рис.7. Изменение составляющих поля напряжений по областям 1...4 (рис.2) поперечного сечения вдоль геометрического очага деформации

На рис.8 представлено распределение максимальных растягивающих напряжений в области 4 по длине геометрического очага деформации. Максимальные растягивающие напряжения возникают в продольном и поперечном направлении. При этом опасные растягивающие напряжения, влияющие на сплошность металла, возникают в сечениях соответствующих $l_x/l_d = 1,0 - 0,7$ (сечения в начале очага деформации), где имеют место существенные перепады скоростей течения металла, как в поперечном, так и в вертикальном направлении.

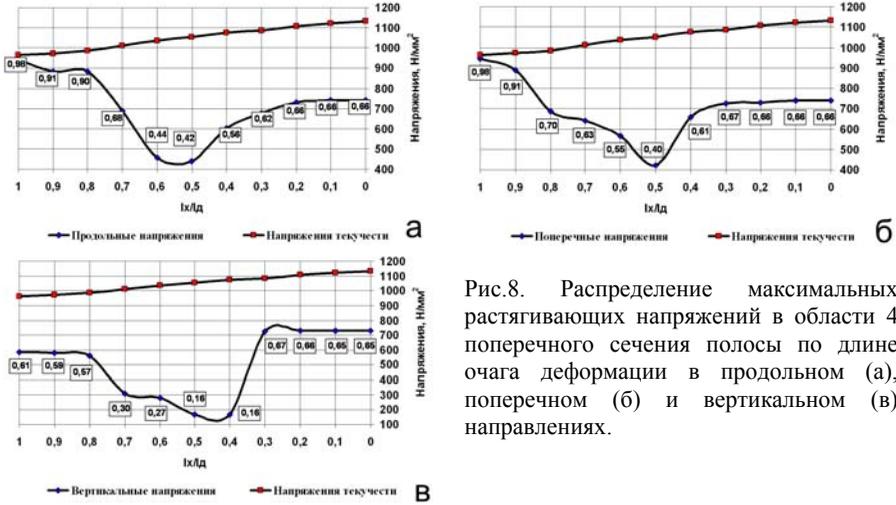


Рис.8. Распределение максимальных растягивающих напряжений в области 4 поперечного сечения полосы по длине очага деформации в продольном (а), поперечном (б) и вертикальном (в) направлениях.

Наиболее значимые технологические параметры, влияющие на изменение растягивающих напряжений в целом по очагу деформации, и, в частности, в опасной зоне (область 4), являются величина обжатия, диаметр роликов и скорость протяжки. Влияние этих параметров на распределение растягивающих напряжений на кромке плющенной ленты представлены на рис.9–11 (в прямоугольных рамках приведены относительные значения по допустимому напряжению текучести).

Увеличение обжатия приводит к повышению интенсивности деформации металла в контактной области, за счет чего металл в этой области в продольном направлении течет быстрее, чем металл в области на границе контактной и боковой внеконтактной зоне. Данное обстоятельство приводит к появлению в области на границе контактной и боковой внеконтактной областей продольных растягивающих напряжений. Величина растягивающих напряжений, приводящих к появлению поверхностных дефектов, определяется регрессионным уравнением $\sigma_x = -56,3309 + 475,61 \cdot d_3/h_1$.

Увеличение диаметра роликов приводит к увеличению длины очага деформации, что, в свою очередь, приводит к увеличению сопротивления продольному течению металла поверхностных слоев полосы. Это приводит к большему проникновению деформации к внутренним слоям полосы и уменьшению перепада скоростей между поверхностью и центром полосы. В результате уменьшается тянущее влияние поверхностных слоев металла на центральные и уменьшаются растягивающие напряжения на кромках.

Сечение на входе в очаг деформации

Сечение на выходе из очага

деформации

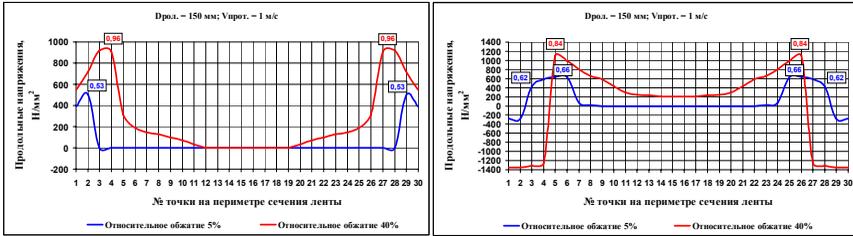


Рис. 9. Влияние относительного обжатия на изменение максимальных продольных растягивающих напряжений σ_x по периметру поперечного сечения плюсовой ленты.

Сечение на входе в очаг деформации



Сечение на выходе из очага деформации

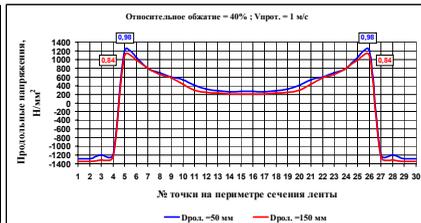


Рис. 10. Влияние диаметра роликов на изменение максимальных продольных растягивающих напряжений σ_x по периметру поперечного сечения плюсовой ленты.

Сечение на входе в очаг деформации



Сечение на выходе из очага деформации



Рис. 11. Влияние скорости волочения на изменение максимальных продольных растягивающих напряжений σ_x по периметру поперечного сечения плюсовой ленты.

Для определения предельных соотношений диаметра заготовки к диаметру ролика (d_3/D_p), при котором не возникают максимальные растягивающие напряжения, получено регрессионное уравнение $\sigma_x = -75,426 + 3010,528 \cdot d_3/D_p$. Увеличение скорости протяжки приводит к

увеличению напряжения текучести поверхностных слоев металла. Упрочнение поверхностного слоя становится причиной затрудненной его деформации, и, в частности, в продольном направлении не только из-за повышения усилия, необходимого для вытягивания этого слоя, но в результате увеличения контактных напряжений ($\sigma_{\tau} = \psi \tau_s$). В результате происходит усиление проработки центральных участков ленты. Это уменьшает неравномерность деформации и приводит к снижению величины растягивающих напряжений. Для определения значения скорости протяжки, при которой не возникают максимальные растягивающие напряжения, получено регрессионное уравнение $\sigma_x = 960,7639 - 15,7139 \cdot v_{\text{прот}}$.

С учетом этих условий были разработаны три схемы калибровки переходов при плющении стальной ленты сечением 0,7 x 4,0 мм в соответствии с требованиями ТУ 3-939-77 – со восторонним обжатием, с постоянной шириной и с контролируемым уширением [3]. Опытно-промышленное опробование разработанных схем показало, что наиболее работоспособной по обеспечению формы профиля является технологическая схема плющения лент прокаткой-волочением с использованием принципа постоянной ширины (рис.12.)

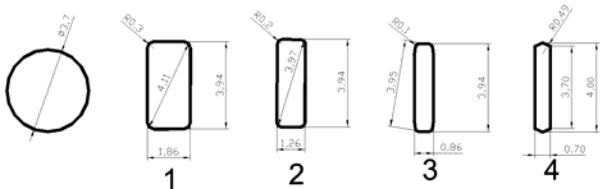


Рис. 12. Схема калибровки переходов для прокатки-волочения с постоянной шириной.

Закключение.

В результате выполнения настоящего исследования впервые получены зависимости изменения напряженно-деформированного состояния металла, в том числе величины растягивающих напряжений в очаге деформации, от его параметров при плющении прокаткой-волочением (волочении в роликовых волоках) ленточного профиля из круглой заготовки. Показано, что наибольшее влияние на изменение напряженно-деформированного состояния металла в процессе плющения прокаткой-волочением круглой заготовки оказывают три фактора – степень обжатия (увеличение обжатия приводит к увеличению растягивающих напряжений на кромке), отношение диаметра заготовки к диаметру роликов (увеличение диаметра роликов приводит к уменьшению растягивающих напряжений на кромке) и скорость протяжки (увеличение скорости протяжки приводит к уменьшению растягивающих напряжений на кромке).

Установлены характер распределения растягивающих напряжений на кромках ленты, а также влияние основных технологических параметров на их изменение при плющении прокаткой–волочением исходной круглой заготовки в роликовых волоках. Области, в которых возникают максимальные растягивающие напряжения, приводящие к появлению поверхностных дефектов, по длине очага деформации, являются области в интервале $l_x/l_d = 1,0 - 0,7$, а в поперечном сечении ленты – области на границе контактной и боковой внеконтактной областей.

Получены эмпирические зависимости для выбора предельных значений технологических параметров, при которых растягивающие напряжения металла в области на границе контактной и боковой внеконтактной областей поперечного сечения ленты не достигают критических значений: относительной деформации; отношения диаметра заготовки к диаметру роликов; скорости протяжки.

На основании результатов аналитических исследований разработаны основные подходы к проектированию технологических схем процесса плющения прокаткой–волочением профилей ленточного типа широкого размерного сортамента: параметры деформации должны обеспечивать минимальный перепад скоростей течения металла по областям поперечного сечения очага деформации. При проектировании новых технологических схем производства профилей ленточного типа плющением прокаткой–волочением в условиях прокатной лаборатории основные технологические параметры не должны превышать допустимых значений, определяемых по полученным регрессионным уравнениям. В то же время разработанные средства математического моделирования процесса позволяют спроектировать технологические схемы производства профилей ленточного типа для любых других условий.

1. *ТУ 3–939–81*. Лента стальная плющенная для поршневых колец. Группа В34. Зарегистрированы ВИФС 24.09.81. – 2224451. – Введены с 01.10.81.
2. *Калибрование фасонных профилей.* / В.Н.Аргунов, М.З.Ерманюк, А.И.Петров, М.В.Харитонович. –М.: Металлургия, 1989. – 208с.
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 плющенной ленты. – М.: Металлургия, 1985. –120с.
5. *Вариационные принципы механики в теории обработки металлов давлением.* И.Я.Тарновский, А.А.Поздеев, В.Л.Колмогоров и др. – М.: Металлургиздат, 1963. – 54 с.
6. *Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Тарновский В.И.* Вариационные методы в теории обработки давлением // Прочность и пластичность. – М.: Наука, 1971. – С.175–178.
7. *Еришов С.В.* Теоретическое и экспериментальное исследование

- деформированного состояния при прокатке профилей с ребрами жесткости. Дис. канд. техн. наук: 05.03.05. – Днепропетровск, 1998. – 262 с.
8. *Ершов С.В.* О моделировании процесса прокатки с использованием методов конечных элементов. // *Металлы.* – 2004.– №4. – С. 36–40.
 9. *Ершов С.В.* Метод построения математических моделей процессов продольной прокатки с использованием конечных элементов и точным выполнением условия несжимаемости. // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 2005. – № 11. –С.18 – 21.
 10. *Ершов С.В.* Построение моделей течения металла при прокатке профилей с использованием МКЭ, локальной системы координат элементов и вариационного уравнения Лагранжа. // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 2006. – № 1. – С.31 – 35.
 11. *Илюкович Б.М., Ершов С.В., Штода М.Н.* Математическая модель процесса прокатки углового профиля в черновом калибре // «Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні». Тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ. – 2003. – С.184–188.
 12. *Целиков А.И., Гришков А.И.* Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 358с.
 13. *Злотников М.И.* Производство плющеной ленты. – М.: Металлургиздат, 1951. – 114с.

*Статья рекомендована к печати:
 Ответственный редактор
 раздела «Прокатное производство»
 канд.техн.наук И.Ю.Приходько
 рецензент канд.техн.наук Л.Г.Тубольцев*

С.М.Жучков, К.Ю.Ключніков, О.П.Лохматов, І.В.Сікачина, Ю.С.Галенко, Ю.М.Беклемешев, Л.П.Барішева

Розробка основних підходів до проектування параметрів процесу плющення сталевих стрічок широкого розмірного сортаменту методом «прокатка–волочиння»

Метою роботи є розробка основних підходів до проектування технологічних схем процесу плющення–волочиння профілів стрічкового типу широкого розмірного сортаменту. Розроблено засоби математичного моделювання процесу плющення, що дало змогу спроектувати технологічні схеми виробництва профілів стрічкового типу. Розрахунково–аналітичні дослідження виконано методом моделювання за допомогою кінцево–елементної моделі.