

УДК 621.771.23.001.57.001.5

Воробей С. А.
Раздобреев В. Г.
Ключников К. Ю.
Ершов С. В.
Сикачина И. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ-ВОЛОЧЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ЛЕНТОЧНОГО ТИПА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗГОННЫХ КАЛИБРОВ

Профили ленточного типа широко используются в машиностроении, авиастроении, приборостроении и других областях промышленности. В зависимости от технических требований, которые определяются соответствующими стандартами, ленты изготавливают способами прокатки на лентопрокатных комплексах, плющения либо продольным роспуском холоднокатаного полосового проката. Данный вид продукции характеризуется широким размерным и марочным сортаментом. Однако объемы потребления многих видов ленты относительно невелики. Например, холоднокатаная лента из низкоуглеродистой стали по ГОСТ 503, предназначенная для гибки, штамповки деталей, изготовления труб, порошковой проволоки, деталей подшипников и других изделий, производится на лентопрокатных комплексах из листовой заготовки. Размерный сортамент таких лент имеет широкий диапазон как по толщине (0,05–4,00 мм), так и по ширине (4,00–500 мм), однако в отдельных областях использования он существенно уже. Так, для производства порошковой проволоки используется лента толщиной 0,15–1,50 мм и шириной 8,00–40,00 мм. При этом объемы производства таких лент в общем выпуске лентопрокатных производственных комплексов незначительны, что делает их производство экономически невыгодным.

Получение ленты продольным роспуском полосового проката имеет свои ограничения: весьма трудно получить ленту шириной менее 5 мм; для многих видов ленты качество кромки, которое при роспуске хуже, чем при прокатке или плющении, является решающим фактором, определяющим долговечность эксплуатации изделий [1]. Кроме того, допуски на толщину, ширину и плоскостность лент значительно (в полтора-два раза) меньше, чем полосы.

Процесс плющения можно использовать для производства лент практически любой толщины, но шириной не более 30 мм [1]. При этом отношение ширины лент к диаметру исходной заготовки, как правило, не превышает 1,3–2 [2]. Применение же большого диаметра заготовки для производства лент малой толщины требует значительного числа промежуточных термообработок.

В Украине производство ленточных профилей крайне ограничено. Создание больших специализированных предприятий по производству ленточных профилей в нынешних условиях экономически невыгодно, ориентация на импорт этих профилей ставит в зависимость от зарубежных поставщиков экономическую и технологическую безопасность машиностроения страны.

В Институте черной металлургии НАН Украины (ИЧМ) на протяжении длительного времени проводятся исследования процесса прокатки-волочения для производства профилей ленточного типа [3, 4]. Это позволило, в частности, разработать и реализовать технологию производства ленты размером 0,70 × 4,00 мм для поршневых колец двигателей внутреннего сгорания из катанки методом прокатки-волочения [5].

По сравнению с холодной прокаткой и плющением процесс прокатки-волочения в роликовых волоках имеет более высокую технологическую гибкость, не нуждается в больших капитальных затратах для организации производства [4]. По сравнению с обычным волочением, процесс прокатки-волочения имеет следующие преимущества: ниже расход энергии;

выше допустимая деформация за один проход; более высокая однородность свойств продукции [6]. Однако процесс прокатки-волочения, так же, как и процесс плющения применяется для производства узких лент. С целью увеличения ширины лент по отношению к диаметру исходной заготовки можно использовать процесс прокатки-волочения с использованием разгонных калибров. При этом актуальной задачей является обеспечение такой системы калибров и технологических режимов обработки, которые не приведут к возникновению опасных растягивающих напряжений из-за неравномерности деформации.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности применения разработанных ранее методов расчета напряженно-деформированного состояния металла в процессе прокатки-волочения [7, 8] для проектирования технологических схем производства профилей ленточного типа с применением разгонных калибров.

Методика проведения исследований состояла в следующем. В лабораторных условиях прокатного отдела ИЧМ был осуществлен экспериментальный процесс прокатки-волочения с применением разгонного калибра с последующим плющением полученного профиля на ленту разной толщины с применением роликов с гладкой бочкой. Затем выполняли расчеты напряженно-деформированного состояния металла для условий проведения эксперимента. Расчетные геометрические параметры металла и его механические свойства (предел текучести) сравнивали с экспериментальными. Кроме того, расчетное распределение векторов скоростей течения металла в поперечных сечениях геометрического очага деформации при протяжке заготовки в разгонном калибре сравнивали с характером изменения формы зерен феррита.

В качестве исходной заготовки для разгонного калибра использовали ленту размером $3,8 \times 6,0$ мм, полученную волочением проволоки диаметром 5,9 мм в монолитной волоке на диаметр 5,3 мм и последующим плющением в роликах с гладкой бочкой. Марка стали Св08А. Содержание химических элементов в стали: углерод 0,07 %, марганец 0,41 %, кремний 0,028 %, сера 0,029 %, фосфор 0,018 %. Средние значения механических свойств исходной проволоки диаметром 5,9 мм: $\sigma_B = 534$ Н/мм²; $\sigma_{0,2} = 490$ Н/мм²; $\delta_5 = 18,0$ %. Микроструктура исходной заготовки – ферритно-перлитная. Среднее значение предела текучести заготовки перед разгонным калибром – 540 Н/мм².

На рис. 1 показан вид профиля поперечного сечения металла после протяжки в калибре.

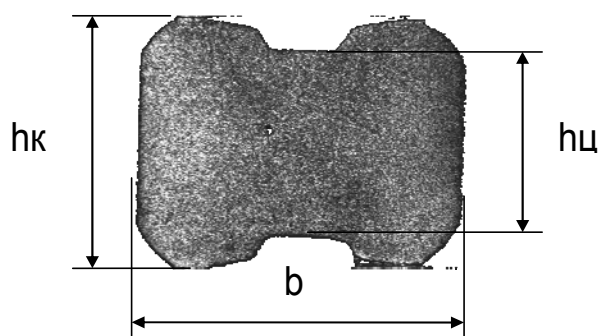


Рис. 1. Вид профиля поперечного сечения металла после протяжки в калибре

Применяли два режима деформации в разгонном калибре. Размеры профиля после протяжки в калибре ($h_k \times h_c \times b$) составили соответственно $3,97 \times 3,40 \times 4,96$ мм и $3,89 \times 3,04 \times 4,90$ мм, где h_k – максимальная толщина профиля в прикромочной зоне, h_c – толщина профиля в центральной зоне по ширине, b – ширина профиля. Профиль сечением $3,89 \times 3,04 \times 4,90$ мм был подвергнут волочению в роликах с гладкой бочкой на ленты следующих размеров ($h \times b$), мм: $3,48 \times 5,12$; $3,08 \times 5,34$; $2,70 \times 5,65$; $2,28 \times 6,00$; $2,00 \times 6,20$; $1,84 \times 5,98$.

Промежуточные отжиги не производили. После каждого этапа деформации проводили исследования микроструктуры и механических свойств металла.

Для условий проведенного эксперимента выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния металла. Расчеты включали следующие основные этапы:

- формирование исходных данных для расчета (геометрические параметры исходной заготовки, размеры и конфигурация калибра, параметры деформации, зависимости деформационного упрочнения материала);
- математическая интерпретация контура заготовки и калибра;
- построение сетки конечных элементов;
- определение граничных условий для каждого элемента заготовки путем решения задачи о непроницаемости;
- решение деформационной задачи;
- определение граничных условий для следующего шага решения;
- загрузка результатов расчета в трехмерный графический анализатор;
- анализ числовой и графической информации.

Трехмерный вид заготовки и секторов роликов, участвующих в процессе деформации металла, представлены на рис. 2.

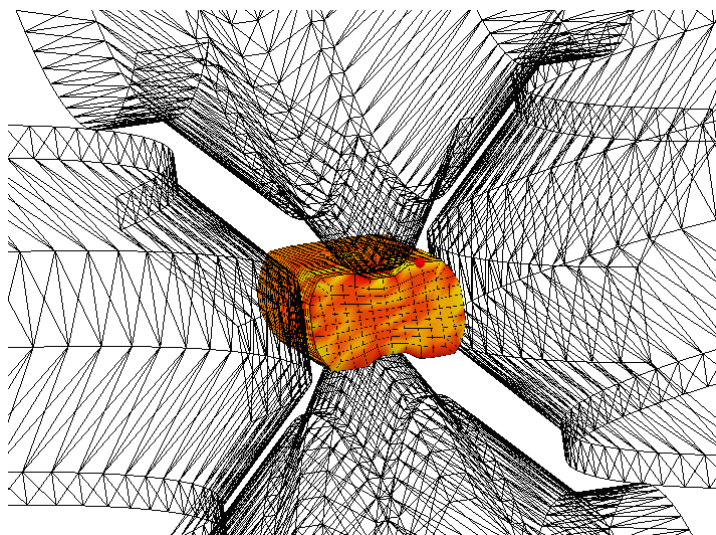


Рис. 2. Трехмерное изображение заготовки и секторов роликов, участвующих в процессе деформации металла в разгонном калибре

В результате расчетов определяли следующие параметры процесса деформации в разгонном калибре: трехмерное поле скоростей, которое при известном времени деформирования было преобразовано в трехмерное изображение деформированной заготовки; интенсивность скоростей деформации сдвига в каждой точке полосы, степень деформации металла, а также напряженное состояние металла в каждой точке полосы.

Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 представлено распределение векторов скоростей течения металла в трех поперечных сечениях: на входе ($l_x/l_d = 0$), в середине ($l_x/l_d = 0,5$) и на выходе ($l_x/l_d = 1$) из геометрического очага деформации, где l_d – длина очага деформации.

На рис. 4 показано расчетное распределение степени деформации и напряжения текучести металла при деформации в разгонном калибре. Рассчитанные геометрические размеры металла сравнивали с экспериментальными данными. Максимальное отклонение наблюдается на участках, соответствующих приращению высоты профиля в зазорах между вертикальными и горизонтальными роликами разгонного калибра – до 1 % (величина h_K на рис. 1). Расчетное среднее значение предела текучести стали после деформации в разгонном калибре 731 Н/мм^2 , экспериментальное – 740 Н/мм^2 , т. е. погрешность составила 1,2 %.

Расчетные направления течения металла в очаге деформации подтверждается формой и ориентацией зерен феррита (рис. 5).

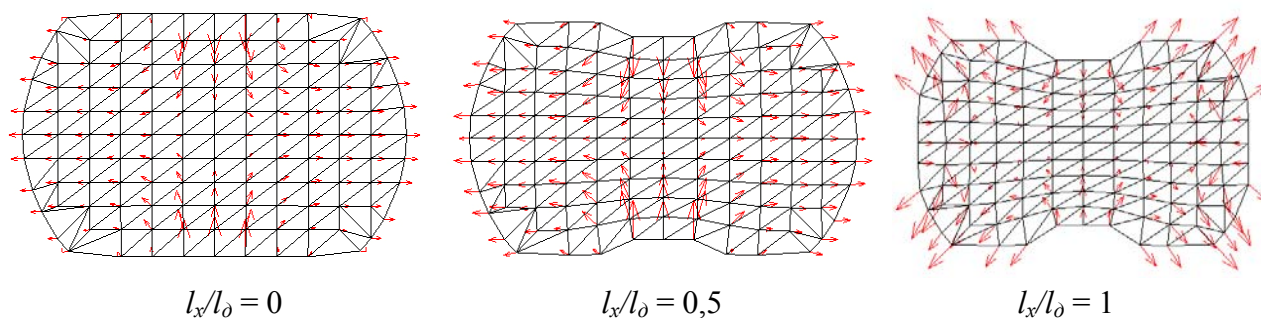


Рис. 3. Распределение векторов скоростей течения металла в поперечных сечениях геометрического очага деформации при протяжке заготовки – ленты в разгонном калибре

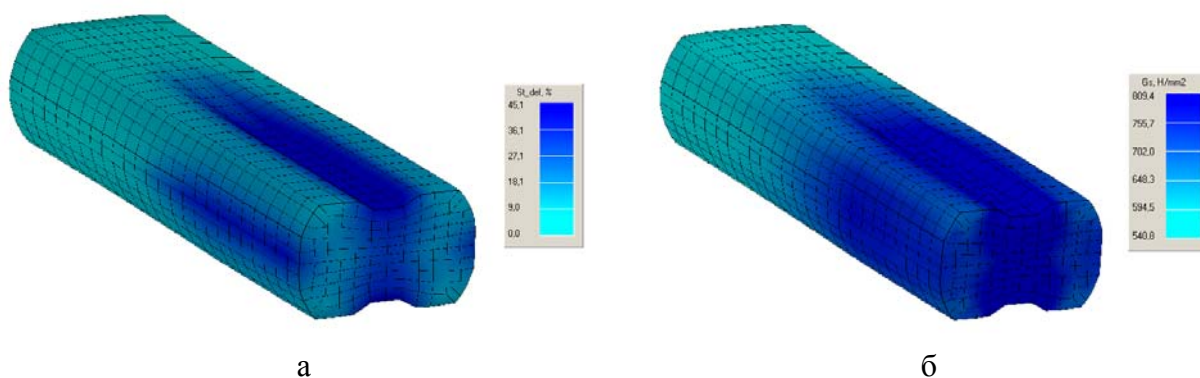


Рис. 4. Распределение степени деформации (а) и напряжения текучести (б) по очагу деформации

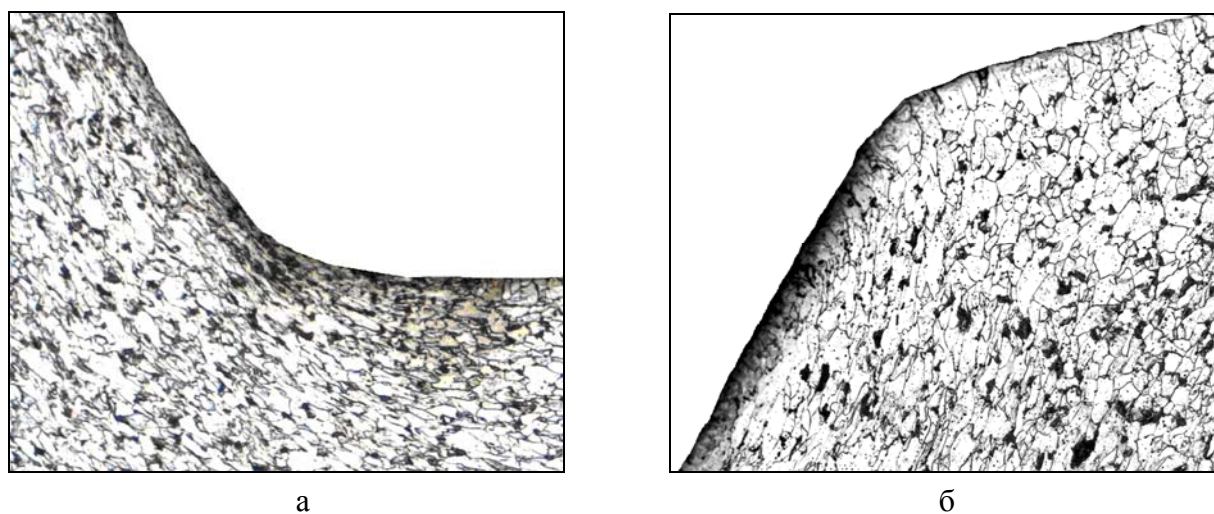


Рис. 5. Микроструктура стали после деформации в разгонном калибре: а – участок, продеформированный гребнем ролика; б – переходной участок от гребня ролика к зазору между горизонтальным и вертикальным роликом, $\times 250$

Анализ геометрических размеров лент, полученных волочением в роликовых волоках после разгонного калибра и без калибра, показал следующее. Применение даже одного разгонного калибра позволяет существенно (в 1,5–2 раза) повысить уширение металла при степени деформации по толщине в процессе плющения 40–50 %. При степени деформации менее 30 % уширение лент при волочении после разгонного калибра и без его применения отличается незначительно.

Погрешность расчета ширины лент при волочении в роликовых волоках не превышает 1,8 %.

Результаты измерения размеров лент, полученных плющением, показывают, что диапазон колебаний толщины составляет 0,02–0,05 мм, ширины – 0,03–0,06 мм. Эти величины соответствуют требованиям ГОСТ 503 (не более 0,12–0,20 мм по толщине и не более 0,3 мм по ширине для исследованных размеров ленты). Точность толщины и ширины лент, полученных с применением и без применения разгонного калибра, отличается незначительно.

ВЫВОДЫ

Показана возможность применения разработанной математической модели напряженно-деформированного состояния металла, использующей метод конечных элементов, для расчета параметров процесса производства ленты из круглой заготовки методом прокатки-волочения с разгонными калибрами. Результаты работы используются для определения рациональных схем деформации и калибровок при разработке технологических схем производства лент различного размерного сортамента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капланов В. И. Производство плющенных лент: состояние, проблемы, перспективы / В. И. Капланов, В. П. Чумаков, М. Г. Коренко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 2. – С. 108–110.
2. Владимиров Ю. В. Производство плющенной ленты / Ю. В. Владимиров, П. П. Нижник, Ю. А. Пуртов. – М. : *Металлургия*, 1985. – 120 с.
3. Задачи исследования процесса получения высокоточных профилей методом волочения в роликовых волоках / С. М. Жучков, А. П. Лохматов, К. Ю. Ключников, И. В. Сикачина // *Бюллетень ОАО «Черметинформация»*. *Черная металлургия*. – 2006. – № 3. – С. 34–36.
4. Разработка основных подходов к проектированию параметров процесса плющения стальных лент широкого размерного сортамента методом «прокатка-волочение» / С. М. Жучков, К. Ю. Ключников, А. П. Лохматов и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. ИЧМ*. – Днепропетровск : *Визион*, 2009. – Вып. 19. – С. 182–193.
5. Комплексная технология производства высокоточных профилей для изготовления высокостойких поршневых колец двигателей внутреннего сгорания / С. М. Жучков, Ю. Н. Голованов, Е. В. Барышев и др. // *Металургійна наука – підприємствам Придніпров'я : збірник наукових праць*. – Дніпропетровськ : «Системні технології», 2005. – Вып. 2. – С. 30–37.
6. Кузнецов Н. А. Влияние волочения в роликовой волоке на механические свойства проволоки из высокоуглеродистой стали / Н. А. Кузнецов // *ОАО «Черметинформация». Новости черной металлургии за рубежом*. – 2006. – № 6. – С. 55–60.
7. Ключников К. Ю. Анализ основных положений математического моделирования процесса плющения круглой заготовки / К. Ю. Ключников, С. В. Ершов, А. П. Лохматов // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. ИЧМ – Днепропетровск : Визион*, 2005. – Вып. 11. – С. 118–130.
8. Жучков С. М. Разработка метода исследования напряженно-деформированного состояния металла при волочении ленточных профилей в роликовых волоках / С. М. Жучков, А. П. Лохматов, К. Ю. Ключников // *Вісник ДДМА : збірник наукових праць*. – 2007. – № 1 (7). – С. 46–51.

Воробей С. А. – д-р техн. наук, и. о. зав. отделом ИЧМ НАН Украины;

Раздобреев В. Г. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;

Ключников К. Ю. – мл. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;

Ершов С. В. – д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;

Сикачина И. В. – вед. инженер ИЧМ НАН Украины.

ИЧМ НАН Украины – Институт черной металлургии Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: office.isi@nas.gov.ua