

**С.А.Воробей, В.Г.Раздобреев, К.Ю.Ключников, А.П.Лохматов,
И.В.Сикачина, Л.П.Барышева**

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ЕГО ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ЛЕНТОЧНОГО ТИПА ПРОКАТКОЙ–ВОЛОЧЕНИЕМ

Целью работы является исследование формирования напряженно-деформированного состояния металла при производстве лент методом прокатки–волочения из заготовок круглого сечения. Деформация осуществлялась по схеме: «обжатие круглой заготовки в гладких роликах → деформация в разгонном калибре → деформация в роликах с гладкой бочкой». Определены рациональные размеры сечения заготовки перед разгонным калибром и рациональные параметры калибровки разгонного калибра с использованием математической модели. Определены области профиля металла и зоны очагов деформаций для каждого этапа деформирования, в которых наиболее высока вероятность возникновения опасных напряжений и нарушений сплошности металла.

процесс «прокатка–волочение», разгонный калибр, деформация, профили ленточного типа, моделирование, напряженно–деформированное состояние

Современное состояние вопроса. Известно, что более 80 % производимой катанки является полупродуктом для производства проволоки круглого сечения волочением в монолитных волоках на волочильных станах или профилей ленточного типа мелких размеров плочением в приводных валках в холодном состоянии на металлургических или метизных предприятиях [1–3]. Профили ленточного типа мелких сечений широко используются в машиностроении, авиастроении, приборостроении и других отраслях промышленности [1]. Они производятся на плющильных, или на лентопрокатных комплексах металлургических или метизных предприятий [2]. При этом процессы деформации металла на указанных комплексах осуществляют с использованием разных схем его напряженно–деформированного состояния. Это обстоятельство, вместе с существующими средствами термической обработки, в значительной мере обуславливает сортамент и технические требования к продукции, производимой данным способом. Так, ленточные профили для производства поршневых колец к двигателям внутреннего сгорания и компрессоров из высокоуглеродистых и пружинных марок сталей шириной до 6,00 мм с катаными кромками за ТУ 3–939–81 производят на плющильных комплексах из проволоочной заготовки круглого сечения.

Холоднокатаная лента из низкоуглеродистой стали по ГОСТ 503 предназначена для гибки, штамповки деталей, изготовления труб, порошковой проволоки, деталей подшипников и других металлических изделий, изготавливается на лентопрокатных комплексах из листовой заготовки. Раз-

мерный 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. Например, 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. По этой причине, например, при производстве порошковой проволоки, когда используется стальная холоднокатаная лента по ГОСТ 503, с неполированной поверхностью I и II группы качества, особо мягкая, нормальной точности, с обрезанными кромками, из стали марок 08кп или 08пс по ГОСТ 1050, ее получают путем продольной резки широких лент (250,00–300,00 мм) на необходимый размер дисковыми ножницами. Такая же ситуация наблюдается и в других переделах, где требуются ленты относительно небольшой ширины. По этой причине со второй половины прошлого столетия предпринимаются попытки использовать для производства стальных лент небольшой ширины другие способы деформирования.

В Украине производство ленточных профилей крайне ограничено. Объемы производства такой продукции при высокой потребности широкого размерного и марочного сортамента относительно невелики. Создание больших специализированных предприятий по производству ленточных профилей в этих условиях экономически не выгодно, ориентация на импорт этих профилей ставит в зависимость от зарубежных поставщиков экономическую и технологическую безопасность машиностроения страны. По этой причине актуальность поиска нетрадиционных технологий производства профилей ленточного типа с заданными свойствами приобретает еще большую актуальность.

В Институте черной металлургии НАН Украины (ИЧМ) на протяжении длительного времени проводятся исследования процесса прокатки–волочения для производства профилей ленточного типа [4,5]. Это позволило разработать и реализовать технологию производства ленты размером 0,70×4,00 мм для поршневых колец двигателей внутреннего сгорания из катанки методом прокатки–волочения [6].

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 [5]. 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 [7]. 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 обеспе-

чение такой системы калибров и технологических режимов обработки, которые не приведут к возникновению опасных растягивающих напряжений из-за неравномерности деформации.

Постановка задачи. В работах [4–6] показано, что для производства профилей ленточного типа высокой точности прокаткой–волочением в качестве исходной заготовки следует применять калиброванную круглую проволоку. Необходимой технологической операцией перед деформацией заготовки в разгонном калибре является обжатие заготовки в гладких роликах, так как задача в разгонный калибр заготовки круглого сечения с большой степенью вероятности может приводить к смещению ее оси по отношению к оси калибра и формированию несимметричного профиля, что не позволяет обеспечить требуемую точность продукции. Кроме того, в работе [8], показано, что форма разгонного калибра и параметры деформации в нем не должны приводить к появлению напряжений, близких к критическим.

Методика исследований. Методика аналитического исследования состояла в последовательном моделировании трех этапов деформации профиля:

- обжатие исходной круглой заготовки в гладких роликах с целью получения плющенной ленты с разным отношением ширины к толщине $b/h < 2$ и $b/h > 2$;
- обжатие плоской заготовки с разным отношением ширины к толщине ($b/h < 2$ и $b/h > 2$) в разгонном калибре;
- обжатие профиля после разгонного калибра в роликах с гладкой бочкой.

Моделировали двухроликовый очаг деформации. При выполнении расчетов в качестве исходных данных принимались следующие параметры: диаметр исходной заготовки–проволоки – 6,0 мм; материал исходной заготовки – сталь марки Св.08А; начальное значение предела текучести – 480 Н/мм²; скорость протяжки – 3,05 м/с. Схемы и режимы деформирования показаны на рис.1. Расчеты выполнены с помощью математической модели, разработанной д.т.н., проф. Ершовым

Параметры моделирования были приняты с учетом возможностей технологического оборудования прокатной лаборатории ИЧМ для экспериментальной проверки результатов моделирования.

Изложение основных результатов исследований. В результате выполненных расчетов для всех этапов деформации было получено трехмерное поле скоростей течения металла, с использованием которого вычислены интенсивность скоростей деформации сдвига в каждой точке полосы, а затем и степени деформации металла в этих же точках.

По полученному деформированному состоянию металла определили напряженное состояние, используя дифференциальное уравнение равновесия и уравнение состояния несжимаемой сплошной среды.

Для анализа напряженного состояния металла геометрический очаг деформации в продольном направлении был разбит на 11 поперечных сечений от $l_x/l_d = 1$ до $l_x/l_d = 0$ (где l_x – расстояние от начала контакта металла с валками до конкретного сечения; l_d – длина геометрического очага деформации).

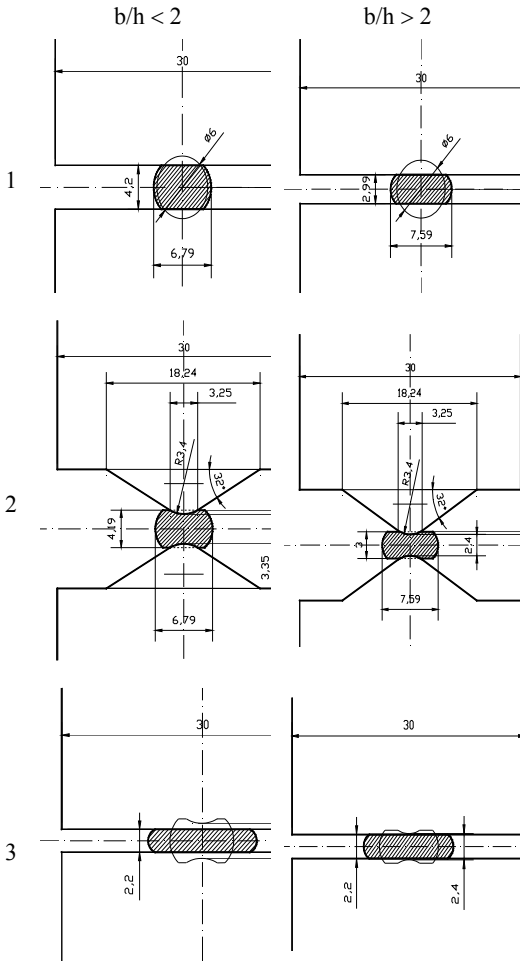


Рис.1. Схемы и параметры деформации при проведении численного эксперимента: 1 – обжатие круглой заготовки в гладких роликах; 2 – деформация в разгонном калибре; 3 – обжатие профиля после разгонного калибра в роликах с гладкой бочкой

В каждой области поперечного сечения полосы на протяжении всего геометрического очага деформации определялись максимальные значения составляющих поля напряжений (σ_x , σ_y , σ_z), а также предела текучести σ_T . После предварительного анализа распределения напряжений в поперечных сечениях геометрического очага деформации для всех трех этапов деформации определяли области максимальных растягивающих напряжений. В качестве показателя напряженного состояния использовали отношение максимального растягивающего напряжения к пределу текучести (σ_{\max}/σ_T). Если данное отношение больше единицы, то это говорит о том, что в данной области или точке может произойти разрушение металла (возникнуть трещины, разрывы) [9,10]. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния для каждого этапа деформации приведены ниже.

Предварительный анализ напряженного состояния металла в процес-

се прокатки–волочения по длине геометрического очага деформации при обжатии круглой заготовки в гладких роликах показал, что максимальные растягивающие напряжения во всех трех направлениях (σ_x , σ_y , σ_z) находятся на границе области контакта металла с роликами и боковой внеконтактной области поперечного сечения профиля (рис.2).

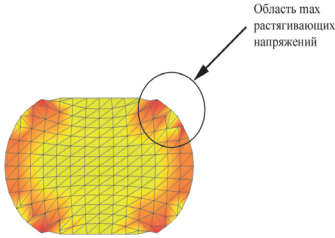


Рис.2. Область максимальных растягивающих напряжений в поперечном сечении профиля, возникающих в процессе обжатия круглой заготовки в гладких роликах

Анализ изменения отношения максимальных растягивающих напряжений к пределу текучести (σ_{\max}/σ_T) при обжатии круглой заготовки в гладких роликах с отношением ширины к толщине меньше 2 (рис.3) показал следующее. Максимальные значения показателя σ_{\max}/σ_T для всех составляющих поля напряжений (σ_x , σ_y , σ_z) наблюдаются в поперечных сечениях в начале ($l_x/l_d = 1,0-0,9$) и вблизи выхода ($l_x/l_d = 0,2-0$) из геометрического очага деформации.

Анализ изменения показателя σ_{\max}/σ_T при обжатии круглой заготовки в гладких роликах для профилей с отношением ширины к толщине больше 2 показал, что наибольшие значения σ_{\max}/σ_T наблюдаются в поперечных сечениях в начале ($l_x/l_d = 1,0-0,8$) и на участке от середины до выхода ($l_x/l_d = 0,4-0$) из геометрического очага деформации (рис.3).

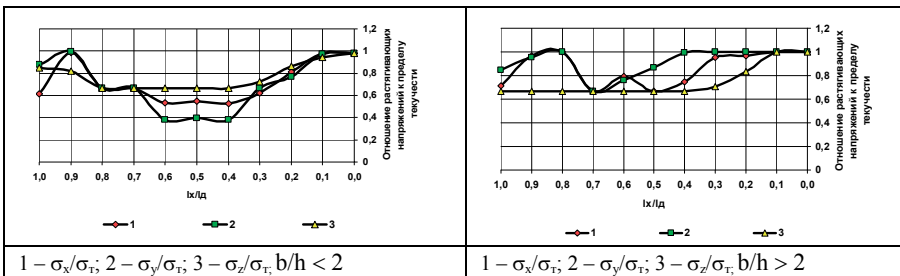


Рис.3. Изменение отношения максимальных растягивающих напряжений к пределу текучести (σ_x/σ_T , σ_y/σ_T и σ_z/σ_T) по длине геометрического очага деформации при обжатии круглой заготовки в гладких роликах

Предварительный анализ напряженного состояния металла при деформации плоской заготовки в разгонном калибре показал, что максимальные растягивающие напряжения во всех трех направлениях (σ_x , σ_y , σ_z) наблюдаются в боковой внеконтактной области (область 1, рис.4) и на границе области контакта металла с роликом и боковой внеконтактной области (область 2, рис.4).

На рис.5 представлено изменение отношения максимальных растягивающих напряжений к пределу текучести всех составляющих поля напряжений (σ_x/σ_T , σ_y/σ_T и σ_z/σ_T) по длине геометрического очага деформации при обжатии плоской заготовки с разным отношением ширины к толщине профиля ($b/h < 2$, $b/h > 2$) в разгонном калибре.

Анализ изменения показателя σ_{\max}/σ_T при обжатии плоской заготовки с отношением $b/h < 2$ в разгонном калибре (рис.5) показал следующее: в области 1 профиля (рис.4) максимальные значения показателя σ_{\max}/σ_T для всех составляющих поля напряжений наблюдаются в поперечном сечении на входе ($l_x/l_d = 1,0$) и в поперечных сечениях на выходе ($l_x/l_d = 0,1-0$) из геометрического очага деформации. В области 2 профиля при обжатии плоской заготовки с отношением $b/h < 2$ в разгонном калибре максимальные значения показателя σ_{\max}/σ_T наблюдаются в поперечных сечениях в середине ($l_x/l_d = 0,7-0,5$) и на выходе ($l_x/l_d = 0,1-0$) из геометрического очага деформации.

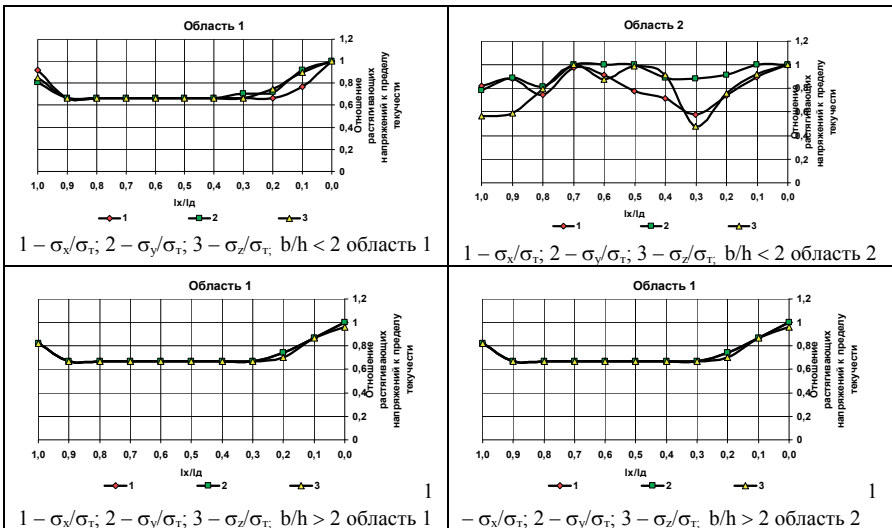


Рис.5. Изменение отношения максимальных растягивающих напряжений к пределу текучести (σ_x/σ_T , σ_y/σ_T и σ_z/σ_T) по длине геометрического очага деформации при деформации в разгонном калибре плоской заготовки с разным отношением ширины профиля к его толщине (b/h)

Анализ изменения отношения максимальных растягивающих напряжений к пределу текучести (σ_{\max}/σ_T) при обжатии плоской заготовки с отношением $b/h > 2$ в разгонном калибре (рис.5) показал следующее:

в области 1 профиля максимальные значения показателя σ_{\max}/σ_T наблюдаются в поперечном сечении на входе ($l_x/l_d = 1,0$) и в поперечных сечениях на выходе ($l_x/l_d = 0,1-0$) из геометрического очага деформации. В области 2 профиля при обжатии плоской заготовки с отношением $b/h > 2$ в разгонном калибре максимальные значения показателя σ_{\max}/σ_T наблюдаются в поперечных сечениях в середине ($l_x/l_d = 0,7-0,5$) и на выходе ($l_x/l_d = 0,1-0$) из геометрического очага деформации.

Предварительный анализ напряженного состояния металла при деформировании заготовки после разгонного калибра в роликах с гладкой бочкой показал, что максимальные растягивающие напряжения во всех направлениях ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) находятся на границе контактной и боковой внеконтактной областей (область 1, рис.6), а также в области контакта в разгонном калибре средней части металла с роликами (область 2, рис.6).

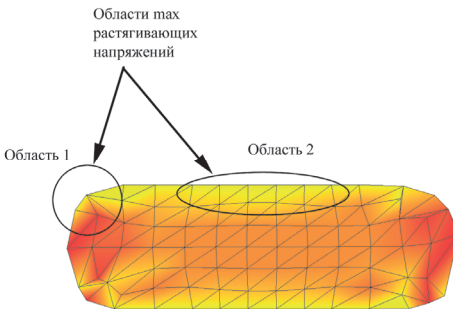


Рис.6. Области максимальных растягивающих напряжений в поперечном сечении профиля, возникающих при деформации профиля после разгонного калибра в роликах с гладкой бочкой

к пределу текучести (σ_{\max}/σ_T) при деформировании в роликах с гладкой бочкой заготовки, полученной после разгонного калибра из плоской заготовки с отношением $b/h < 2$, показал следующее: в области 1 профиля (рис.6) максимальные значения показателя σ_{\max}/σ_T наблюдаются в поперечных сечениях на входе ($l_x/l_d = 1,0-0,8$) и на выходе ($l_x/l_d = 0,3-0$) из геометрического очага деформации, области 2 – в поперечных сечениях в начале ($l_x/l_d = 1,0-0,9$) геометрического очага деформации.

Анализ изменения отношения максимальных растягивающих напряжений к пределу текучести (σ_{\max}/σ_T) при деформировании в роликах с гладкой бочкой заготовки, полученной после разгонного калибра из пло-

На рис.7 представлено изменение отношения максимальных растягивающих напряжений к пределу текучести всех составляющих поля напряжений ($\sigma_x/\sigma_T, \sigma_y/\sigma_T$ и σ_z/σ_T) по длине геометрического очага деформации при деформировании заготовки после разгонного калибра в роликах с гладкой бочкой.

Анализ изменения отношения максимальных растягивающих напряже-

ской заготовки с отношением $b/h > 2$, показал следующее: в области 1 профиля максимальные значения показателя σ_{\max}/σ_T наблюдаются в поперечных сечениях в начале ($l_x/l_d = 1,0-0,9$) геометрического очага деформации, области 2 – в поперечных сечениях также в начале ($l_x/l_d = 1,0-0,7$) геометрического очага деформации.

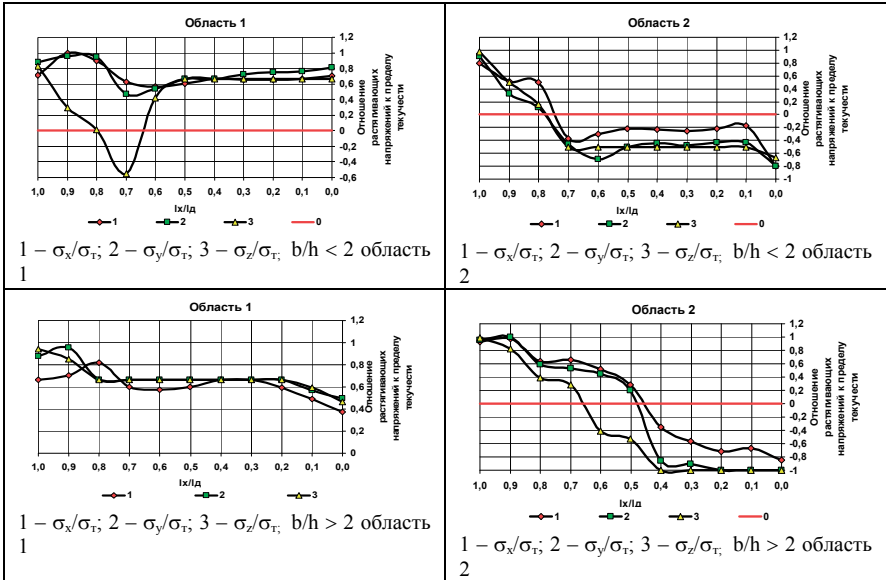


Рис.7. Изменение отношения максимальных растягивающих напряжений к пределу текучести (σ_x/σ_T , σ_y/σ_T и σ_z/σ_T) по длине геометрического очага деформации при деформации профиля после разгонного калибра в роликах с гладкой бочкой. Отношение b/h плоской заготовки меньше 2 и больше 2

Проведенный анализ результатов выполненных расчетных экспериментов показал следующее: при обжатии круглой заготовки в гладких роликах значения максимальных растягивающих напряжений наблюдаются при ее деформации для случая получения профиля с отношением ширины к толщине больше двух. Причем, максимальные растягивающие напряжения в этом случае возникают на большем протяжении геометрического очага деформации (см. рис.3).

При деформации плоской заготовки с разным отношением ширины к толщине в разгонном калибре распределение максимальных растягивающих напряжений практически идентичны. Однако в области 2 профиля поперечного сечения при обжатии плоской заготовки с отношением $b/h > 2$ максимальные растягивающие напряжения наблюдаются на большем протяжении геометрического очага деформации (рис.5).

При последующей деформации в роликах с гладкой бочкой заготовки, полученной после разгонного калибра, наибольшие максимальные растягивающие напряжения наблюдаются для случая использования плоской заготовки с отношением $b/h < 2$ (рис.7). Данный факт объясняется тем, что относительная степень деформации в разгонном калибре для заготовки с отношением $b/h < 2$ составила 33,4 %, а для заготовки с отношением $b/h > 2$ – 8,1 %. Это обусловлено тем, что в расчетах задано условие получения одинаковой высоты профиля после разгонного калибра для заготовок с разным соотношением ширины к толщине (см. рис.1).

По результатам вычислительных экспериментов определяли основные геометрические размеры профилей после каждого этапа деформации.

На рис.8 представлено изменение ширины профиля после каждого этапа деформирования. Из представленного графика видно, что наибольшая ширина профиля при проведении численного эксперимента получается для случая деформирования плоской заготовки с отношением $b/h > 2$ и составляет 7,44 мм. Для случая деформирования плоской заготовки с отношением $b/h < 2$ конечная ширина профиля после проведения численного эксперимента составляет 7,24 мм.

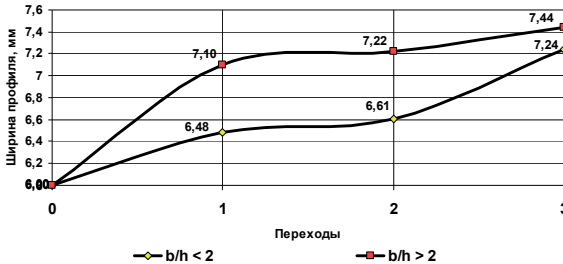


Рис.8. Изменение ширины профиля после каждого этапа деформирования: 1 – обжатие круглой заготовки в гладких роликах; 2 – деформация в разгонном калибре; 3 – деформация в роликах с гладкой бочкой

0,13 мм, а для заготовки с отношением $b/h > 2$ – 0,12 мм. Однако уширение при последующей деформации в роликах с гладкой бочкой заготовки, полученной в разгонном калибре из плоской заготовки с отношением $b/h < 2$, примерно в 2,5 раза выше, чем при использовании ленты с отношением $b/h > 2$.

Для разработки надежного метода проектирования калибровок переходов исследуемого процесса необходимо установить закономерности влияния на показатель σ_{\max}/σ_T следующих параметров:

- диаметра круглой заготовки, степени ее деформации при обжатии в гладких роликах и исходного предела текучести стали;
- высоты, угла и радиуса закругления гребня разгонного калибра, толщины и ширины плоской заготовки, задаваемой в разгонный калибр, степени деформации;

Анализ формы изменения при деформации в разгонном калибре показал, что уширение металла, получаемое при использовании плоских заготовок с разным отношением ширины к толщине, получается практически одинаковым. Для плоской заготовки с отношением $b/h < 2$ уширение составляет

- степени деформации при обжатии ее заготовки в роликах с гладкой бочкой после разгонного калибра.

Выводы.

На основании расчетно–аналитических исследований установлено, что при обжатии круглой заготовки в гладких роликах значения максимальных растягивающих напряжений наблюдаются при ее деформации для случая получения профиля с отношением ширины к толщине больше двух. При этом максимальные растягивающие напряжения, в этом случае, возникают на большем протяжении геометрического очага деформации.

Показано, что при деформации плоской заготовки с разным отношением ширины к толщине в разгонном калибре распределение максимальных растягивающих напряжений практически идентичны. Однако в области 2 профиля поперечного сечения при обжатии плоской заготовки с отношением $b/h > 2$ максимальные растягивающие напряжения наблюдаются на большем протяжении геометрического очага деформации.

Установлено, что при последующей деформации в роликах с гладкой бочкой заготовки, полученной после разгонного калибра, наибольшие максимальные растягивающие напряжения наблюдаются для случая использования плоской заготовки с отношением $b/h < 2$. Это объясняется тем, что относительная степень деформации в разгонном калибре для заготовки с отношением $b/h < 2$ составляет 33,4 %, а для заготовки с отношением $b/h > 2$ – 8,1 %. Обусловлено это тем, что в расчетах задано условие получения одинаковой высоты профиля после разгонного калибра для заготовок с разным соотношением ширины к толщине.

Определены основные геометрические размеры профилей после каждого этапа деформации.

Установлено, что наибольшая ширина профиля при проведении численного эксперимента получается для случая деформирования плоской заготовки с отношением $b/h > 2$ и составляет 7,44 мм. Для случая деформирования плоской заготовки с отношением $b/h < 2$ конечная ширина профиля после проведения численного эксперимента составила 7,24 мм.

Показано, что уширение металла, получаемое при использовании плоских заготовок с разным отношением ширины к толщине, получается практически одинаковым. Для плоской заготовки с отношением $b/h < 2$ уширение составляет 0,13 мм, а для заготовки с отношением $b/h > 2$ – 0,12 мм. Однако уширение при последующей деформации в роликах с гладкой бочкой заготовки, полученной в разгонном калибре из плоской заготовки с отношением $b/h < 2$, примерно в 2,5 раза выше, чем при использовании ленты с отношением $b/h > 2$.

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., Нижник П.П., Пуртов Ю.А.* Производство плющенной ленты. – М.: *Металлургия*, 1985. –120с.
3. *Гулько В.И., Войцеховский В.А., Григорьев А.К.* Производство профилей и проволоки в роликовых волоках. – Ижевск: «Удмуртия», 1989. –132с.
4. *Жучков С.М.* 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.
5. Жучков С.М. 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.
 6. Жучков С.М. Комплексная технология производства высокоточных профилей для изготовления высокостойких поршневых колец двигателей внутреннего сгорания / С.М.Жучков, Ю.Н.Голованов, Е.В.Барышев и др. // Збірник наукових праць «Металургійна наука – підприємствам Придніпров'я», другий випуск. – Дніпропетровськ: «Системні технології». – 2005. – С.30–37.
 7. 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.
 8. Воробей С.А. Исследование возможности применения математической модели напряженно–деформированного состояния металла в процессе прокатки–волочения профилей ленточного типа при использовании разгонных калибров / С.А.Воробей, В.Г.Раздобреев, К.Ю.Ключников, С.В.Ершов, И.В.Сикачина // Сборник научных трудов «Обработка материалов давлением». – 2010. – №4. – С.52–56.
 9. 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 // Збірник наукових праць «Вісник Донбаської Державної Машинобудівної Академії». – 2007. – С.41–45.
 10. 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.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук И.Ю.Приходько*

***С.О.Воробей, В.Г.Раздобреев, К.Ю.Ключников, О.П.Лохматов, И.В.Сикачина,
Л.П.Баршинева***

Особливості течії та напруженого стану металу під час його деформування в процесі отримання профілів стрічкового типу прокаткою–волоченням

Метою роботи є дослідження формування напружено–деформованого стану металу при виробництві стрічок методом прокатки–волочення із заготовок круглого перетину. Деформація здійснювалася по схемі: «обтиснення круглої заготовки на гладких роликах → деформування в розгінному калібрі → деформування в роликах з гладкою бочкою». З використанням математичної моделі визначено раціональні розміри перетину заготовки перед розгінними калібрами та раціональні розміри розгінного калібру. Визначено області профілю металу та зони осередку деформації для кожного з етапів деформування, де є найбільш висока імовірність виникнення небезпечних напружень та порушень суцільності металу.