

90 лет  
БНТУ

*The way of forming of variable shape strips with rolling in nondrive waves with rounding by the movable arbor strip is analyzed. The way of rolling with derivation of speeds of deforming instruments is offered.*

Л. А. ИСАЕВИЧ, В. А. КОРОЛЬ, В. С. КАРПИЦКИЙ, М. И. СИДОРЕНКО, Д. М. ИВАНИЦКИЙ, БНТУ

УДК 621.771.011

## АССИМЕТРИЧНАЯ ПРОКАТКА ПОЛОСОВЫХ ЗАГОТОВОК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Существенные затруднения при разработке технологических основ и проектировании прокатного оборудования для получения профильных полосовых заготовок вызывают сложности учета таких факторов процесса формоизменения, как температура и механические свойства материала прокатываемых изделий, состояние поверхности рабочих валков и прокатываемой полосы и др. Стабилизация условий прокатки является одним из основных условий получения качественного проката. Основную трудность представляет формоизменение профиля заданной конфигурации в нестационарных условиях деформации металла. При продольной периодической прокатке конечный профиль изделия формируется, как правило, за один проход, в течение которого в широком диапазоне изменяются обжатие, угол захвата, скорость прокатки и, как следствие, напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации, величина коэффициента контактного трения, опережение и усилие прокатки. Это приводит в процессе деформирования к изменению формы рабочего калибра и отклонению геометрических параметров проката от требуемых.

Известные преимущества схемы формоизменения заготовок переменной толщины прокаткой на профильной оправке в клетки с неприводными валками [1, 2] в изменении схемы напряженно-деформированного состояния металла в процессе деформирования и повышении жесткости конструкции прокатной клетки, тем не менее, не позволяют при больших единичных обжатиях в удовлетворительной степени обеспечить стабильность значений распорного усилия на элементы прокатной клетки и заданную конфигурацию и точностные размеры проката.

Анализ исследований известных способов формообразования полосовых заготовок переменной

толщины показывает, что решение проблемы возможно при использовании новых схем прокатки, обеспечивающих минимальное влияние указанных негативных факторов на стабильность процесса и качество получаемых изделий.

Продольная прокатка периодических профилей, являясь нестационарным процессом, характеризуется изменяющимися по длине проката размерами и формой поперечного сечения, т. е. толщиной и шириной. В связи с переменной величиной обжатия по длине проката меняется давление, действующее на валки. Это вызывает изменение упругой деформации элементов рабочей клетки во времени, что в итоге приводит к отклонению от заданных размеров толщины по длине деформируемого профиля [3].

Известно, что давление металла на валки при прокатке зависит от площади контакта металла с валками и значений, действующих в очаге деформаций и напряжений. Поскольку площадь контакта предопределяется геометрией очага деформации и возрастает по мере увеличения обжатия, то, очевидно, снижение усилия прокатки может быть достигнуто уменьшением контактного давления на валки. Такой путь возможен при условии уменьшения значений гидростатического давления в очаге деформации за счет, например, изменения соотношения между компонентами тензора напряжений или схемы напряженного состояния, перехода от одноименной к разноименной. Реально это осуществляется путем увеличения натяжения по мере роста обжатия. При этом наблюдается значительное снижение давления, причем применение заднего натяжения вызывает более эффективное снижение давления по сравнению с передним.

Проанализируем способ формообразования полос переменной профиля прокаткой в неприводных валках с огибанием полосой подвижной оправки [2].

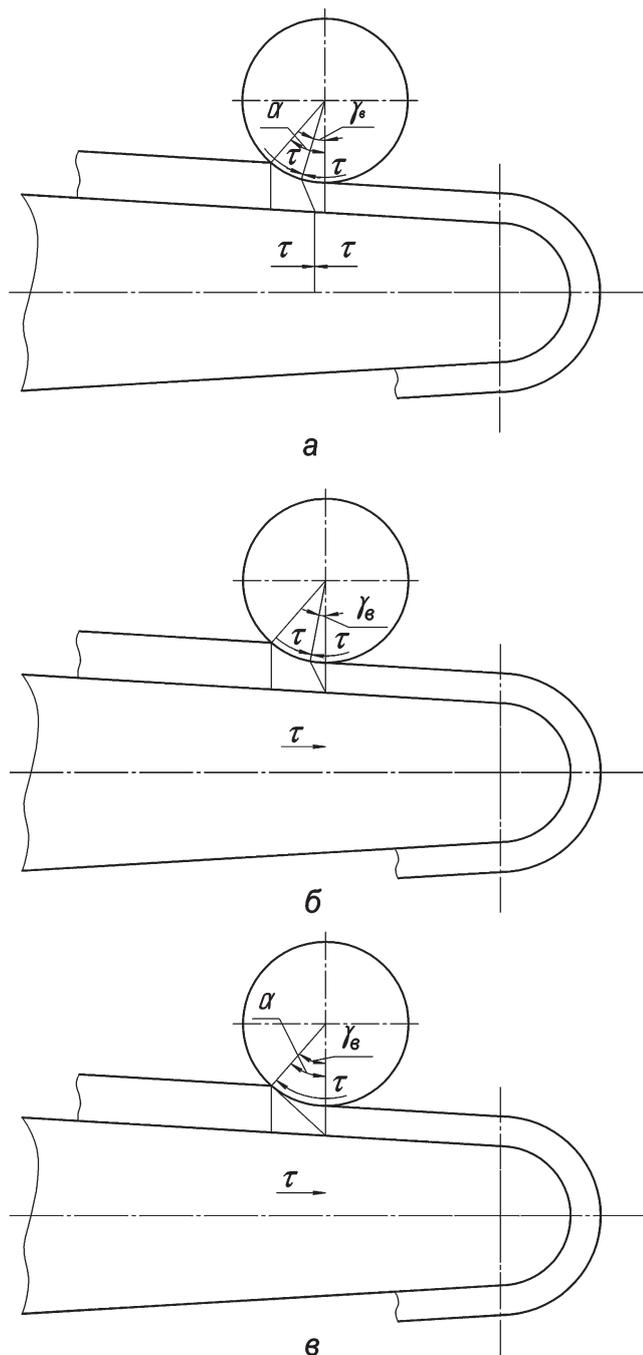


Рис. 1. Стадии процесса прокатки

Данный способ представляет собой прокатку с одним приводным валком бесконечного диаметра (оправка) и вторым – не приводным. Из теории прокатки с одним не приводным валком известно, что при прокатке могут наблюдаться три стадии процесса, отличающиеся друг от друга строением очага деформации и действующими усилиями.

1. Первая стадия (рис. 1, а) возникает при малых степенях деформации и характеризуется наличием зон опережения и отставания на обеих контактных поверхностях металла с инструментом, причем зона опережения на оправке меньше, чем на не приводном валке. На этой стадии полоса

движется быстрее, чем оправка, и поэтому трудно обеспечить получение требуемых размеров по толщине профиля.

2. Вторая стадия возникает по мере роста обжатия уменьшением зоны опережения на оправке до нуля (рис. 1, б), характеризуется наличием на оправке только зоны отставания, а на не приводном валке – отставания и опережения. Как на первой, так и на второй стадии для осуществления процесса прокатки не требуется приложения переднего натяжения.

3. На третьей стадии прокатка возможна только при приложении переднего натяжения, величина которого растет с ростом обжатия, при этом зона отставания на не приводном валке уменьшается и, когда она достигнет нуля (рис. 1, в), третья стадия заканчивается, не приводной валок останавливается и прокатка переходит в режим волочения.

Таким образом, при кажущейся своей простоте процесс прокатки является нестационарным с точки зрения необходимости приложения переднего натяжения и его величины: на первой и второй стадиях оно отсутствует и на третьей постепенно увеличивается с ростом обжатия. Изменяется также и схема напряженного состояния в очаге деформации. На первых двух стадиях – это схема всестороннего сжатия, на третьей – сжатия-растяжения с наличием двух сжимающих и одного (продольного) растягивающего напряжения.

Учитывая, что прокатка проходит в горячем состоянии, наличие растягивающих напряжений приводит к появлению в металле микротрещин, его «разрыхлению» и, как следствие, снижению механических свойств получаемых изделий. Для регулирования свойств необходимо управлять величиной переднего натяжения.

С другой стороны, при горячей прокатке происходят рекристаллизация и рост зерна. Этот процесс ускоряется при увеличении температуры. Значит, при более высоких температурах снижается сопротивление деформации, т. е. усилие прокатки, но вместе с тем снижается и качество изделий. Поэтому для получения качественных изделий прокатку необходимо производить при более низких температурах нагрева (выше температуры фазовых превращений на 50–70 °С). Для стали 50ХГФА это порядка 850–880 °С вместо применяемых сегодня 930–970 °С. Это позволит резко снизить скорость рекристаллизации и сохранить зерно, измельченное при деформации. При этом необходимо по сравнению с обычной прокаткой снизить давление металла на валки путем регулируемого натяжения и изменения схемы напряженного состояния.

Как следует из приведенного выше, для получения заданных размеров полосы по толщине прокатку ее следует проводить на стадии, соответствующей устойчивому процессу прокатки, т. е. второй стадии. На этой стадии, как было отмечено выше, на оправке существует только одна зона отставания, а на валках – зона отставания и опережения. При этом нейтральный угол  $\gamma_B$  на валках может изменяться от  $\gamma_{BK}$  (критического угла), при этом прокатка возможна без натяжения ( $\sigma_n = 0$ ) и нейтральный угол на оправке  $\gamma_0 = 0$ , до  $\gamma_B = \alpha$  (где  $\alpha$  – угол захвата), при котором  $\sigma_n \leq \sigma_s$  ( $\sigma_s$  – предел текучести нагретого прокатываемого металла). Таким образом, реализуя такую схему прокатки, можно изменять переднее натяжение в пределах  $0 \leq \sigma_n \leq \sigma_s$ .

Изменять соотношение зон отставания и опережения на валках и оправке можно путем изменения трения на контактных поверхностях, переднего натяжения и другими способами. В предлагаемом способе прокатки наиболее простым является прокатка с различными скоростями движения контактных поверхностей валков и оправки, т. е. с рассогласованием скоростей движения инструментов.

Проведем анализ прокатки с рассогласованием скоростей движения деформирующих инструментов (оправка и валки), используя результаты исследований [4]. Оправку, перемещающуюся со скоростью  $v_0$ , будем считать ведущей, а неприводной валок, которому сообщим принудительно вращение с окружной скоростью  $v_B$ , – ведомым. В зависимости от степени рассогласования скорости перемещения оправки и окружной скорости валка  $K_v = v_0/v_B$  возможны несколько вариантов схем прокатки, отличающихся строением очага деформации. При симметричном процессе, когда  $K_v = 1$ , моменты прокатки на оправке и валке, равнодействующие контактных сил, их составляющие, углы наклона равны. Равны также критические углы захвата на оправке и валке ( $\gamma_0 = \gamma_B$ ). При данном условии очаг деформации состоит из двух зон: зоны отставания и зоны опережения, в которых силы трения на противоположных контактных поверхностях направлены одинаково.

Нарушение симметричности процесса путем изменения скорости перемещения оправки и окружной скорости валка, когда  $1 < K_v < K_K$ , приводит к появлению в очаге деформации зоны сдвига, в которой силы трения на оправке и валке направлены в противоположные стороны.

По мере увеличения степени рассогласования скоростей движения деформирующих инструментов зона опережения на оправке будет уменьшать-

ся. На валке, наоборот, она увеличивается и займет большую часть дуги захвата ( $\gamma_0 = \gamma_B$ ). Когда зона опережения на оправке исчезнет ( $\gamma_0 = 0$ ), а ( $\gamma_0 = \gamma_K$ ), наступает критическое рассогласование скорости перемещения оправки и окружной скорости валков ( $K_v = K_K$ ) и прокатка возможна без переднего натяжения, так как в данном случае скорость перемещения оправки будет равной скорости выхода полосы из зоны прокатки.

Отработку технологических режимов в условиях производства предложенного способа прокатки с рассогласованием скоростей движения инструментов (оправки и валков) производили на промышленном стане МА-076, предназначенном для изготовления профильных полосовых заготовок малолистовых рессор автомобильного прицепа «Зубренок» Минского автомобильного завода.

Рассогласование скоростей движения деформирующих инструментов можно осуществлять различными способами. Одним из наиболее простых методов прокатки с регулируемым натяжением полосы является прокатка с изменяющимся во времени тормозным моментом на неприводном валке. Практически это можно осуществить при помощи электро- и гидрогенератора, связанного через редуктор с неприводным валком. Принимая во внимание, что существующее прокатное оборудование для прокатки заготовок переменного профиля имеет гидравлический привод, логичнее в данном случае использовать гидрогенератор, обеспечивающий тормозной момент на неприводных валках.

К преимуществам гидромеханического регулирования тормозного момента на приводном валке следует отнести возможность, простоту и точность настройки оборудования, что весьма важно, поскольку на детальные теоретические исследования процесса существует целый ряд факторов, которые можно учесть только экспериментальным путем. Основными среди них являются неравномерность охлаждения заготовки в процессе прокатки, а также стойкость деформирующего инструмента. С увеличением тормозного момента до теоретических величин возрастает качество готового проката, однако возможно снижение долговечности прокатных валков. Именно здесь и требуется найти то оптимальное соотношение этих параметров, которое позволяет получать заготовки высокого качества при максимально низкой себестоимости, что можно определить только экспериментальным путем.

Основной недостаток способа прокатки с регулируемым тормозным моментом на холостом валке – повышенный расход энергии за счет превра-

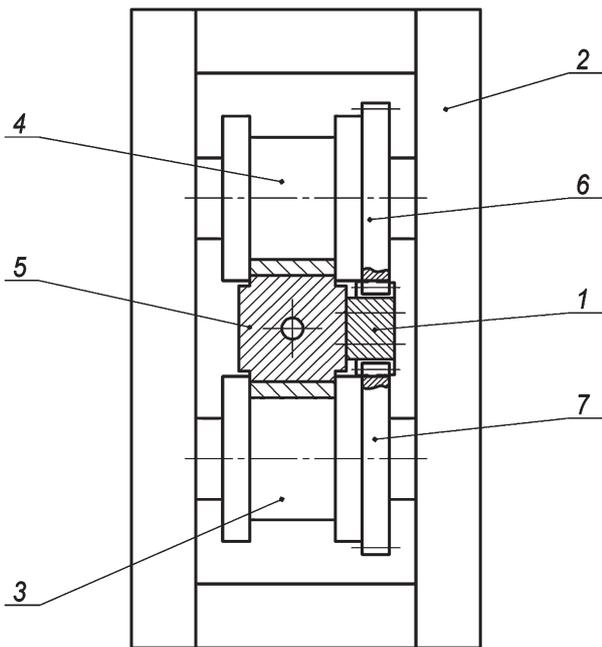


Рис. 2. Схема рабочей клетки с механизмом рассогласования окружных скоростей относительного перемещения деформирующего инструмента

щения энергии торможения в реактивную. Поэтому перспективным способом является прокатка с принудительным рассогласованием скоростей.

Схема рабочей клетки стана с механизмом принудительного рассогласования относительных перемещений деформирующего инструмента приведена на рис. 2. Валки 3 и 4 установлены в клетке 2 в подшипниках скольжения, запрессованных в подушки, представляющие собой эксцентриковые втулки, обеспечивающие возможность регулирования величины рабочего зазора. Центрирование оправки 5 вместе с деформируемой заготовкой производится за счет реборд, выполненных на валках. Механизм рассогласования скоростей относительного перемещения оправки 5 и вращения валков 3 и 4 состоит из ведущей двухсторонней зубчатой рейки 1, жестко закрепленной на боковой поверхности оправки, и пары ведомых зубчатых колес 6 и 7, установленных на прокатных валках 3 и 4 и находящихся в постоянном зацеплении с зубчатой рейкой 1.

Параметры процесса прокатки следующие:

- температура нагрева заготовки под прокатку составляет 900–950 °С;
- число проходов – 1;
- наибольшее отклонение размеров от заданного профиля по толщине по всей длине заготовки не превышает  $\pm 0,1$  мм;
- продолжительность цикла обжатия заготовки в валках – 10 с;
- продолжительность цикла обработки (загиб-прокатка-разгибка) – 30 с.

На промышленном стане МА-076 производили прокатку заготовки с параметрами: исходная толщина  $h_0 = 10$  мм; ширина  $b = 45$  мм; толщина концевой участка прокатанной полосы переменного профиля  $h_1 = 6$  мм; материал заготовки – сталь 50ХГФА.

Диаметр валков прокатного стана 120 мм.

Коэффициент контактного трения  $\mu = 0,35$ . С учетом параметров исходной и прокатанной заготовки максимальная степень деформации  $\varepsilon = h_0/h_1 = 1,67$ . Тогда величина коэффициента критического рассогласования скоростей относительного перемещения деформирующего инструмента (рабочих валков и оправки) для указанных параметров заготовки, прокатного стана и условий контактного трения и, согласно предложенной методике [4], будет равна  $K_k = 1,26$ .

Прокатку заготовок производили за один проход без рассогласования ( $K_v = 1,0$  – обычная прокатка) и с критическим рассогласованием скоростей относительного перемещения инструмента  $K_k = 1,26$ .

Согласно технологии прокатки, температура нагрева заготовок составляла 900 °С, нагрев осуществляли ТВЧ. В процессе прокатки по давлению масла в главном цилиндре прокатного стана определяли действующее на оправку усилие. Здесь же следует отметить, что прокатный стан конструктивно оформлен таким образом, что привод валков при прокатке с рассогласованием скоростей движения рабочего инструмента и привод деформирующей оправки осуществляются от главного цилиндра и трудно разделить мощности, затрачиваемые на привод валков, деформацию металла и натяжение полосы. Поэтому при различных режимах прокатки фиксировали суммарную мощность, затрачиваемую на осуществление процесса прокатки. Так как нам необходимо было сравнивать эти затраты при различных способах прокатки, мы ограничивались регистрацией максимального давления масла в главном гидроцилиндре. Максимальное давление возникало при всех способах прокатки в конце процесса, когда прокатывались участки толщиной 6 мм, т. е. когда степень деформации была максимальной.

Так, при обычной прокатке ( $K_v = 1,0$ ) давление масла в гидроцилиндре было равным 2,6 МПа, а при прокатке с критическим рассогласованием скоростей вращения валков и перемещения оправки ( $K_k = 1,26$ ) давление масла составило 1,58 МПа, т. е. снизилось более чем в 1,5 раза. Следовательно, наибольшее по величине переднее натяжение возникает при обычной прокатке, о чем свидетельствует значительное увеличение давления масла

в цилиндре и практически отсутствует при прокатке с  $K_k = 1,26$ . При прокатке по последнему режиму давление масла в основном расходуется на деформацию металла и привод валков. Проверка точности геометрических размеров показала, что наибольшее отклонение размеров от заданного профиля по толщине полосовых заготовок параболического профиля, изготовленных по предложенной технологии, составило не более  $\pm 0,1$  мм.

После сборки и осадки готовых рессор производили их испытание на усталостную прочность по методике усталостных испытаний Минского автомобильного завода. Результаты испытаний показали, что усталостная прочность изменяется от  $163 \cdot 10^3$  циклов нагружения при прокатке по существующей технологии ( $K_v = 1,0$ ) до  $205 \cdot 10^3$  при

прокатке с рассогласованием скоростей движения инструментов ( $K_k = 1,26$ ), т. е. увеличилась на 25%.

### Выводы

1. Проанализирован способ формообразования полос переменного профиля прокаткой в не приводных валках с огибанием полосой подвижной оправки.

2. Предложен способ прокатки с рассогласованием скоростей движения деформирующих инструментов (валки, оправка).

3. Предложены, исследованы и отработаны в промышленных условиях температурные и деформационные режимы прокатки заготовок без рассогласования и с критическим рассогласованием скоростей относительного перемещения инструмента.

### Литература

1. Пат. Республики Беларусь В21Н7/00. Способ изготовления заготовок изделий с переменным по длине профилем и устройство для его осуществления / А. В. Степаненко, В. А. Король, Г. А. Исаевич.
2. Прокатка полос переменного профиля / А. В. Степаненко, В. А. Король, Л. А. Смирнова. Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2001.
3. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. М.: Металлургия, 1980.
4. К а р п и ц к и й Ю. В. Разработка нового способа и технологии получения изделий и полуфабрикатов продольной периодической прокаткой: Дис. ... канд. техн. наук. Мн., 2000.