

# АНАЛИЗ СИЛОВЫХ И СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ КОЛЕС

**Снитко С.А. (ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк)**

*Выполнен анализ силовых и скоростных параметров прокатки железнодорожных колес. На его основе показаны недостатки существующей технологии и определены направления ее развития.*

Актуальной проблемой, стоящей сегодня перед ведущими заводами-производителями штамповано-катаных колес Украины (ОАО «Интерпайп НТЗ») и России (ОАО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ)), является снижение металлоемкости производства, в том числе за счет уменьшения процента брака на прессопрокатной линии. Решение данной проблемы связано с необходимостью выполнения исследований в двух направлениях. Первое направление – это анализ температурно-скоростных, силовых и деформационных режимов штамповки и прокатки колесных заготовок на основе экспериментальной информации, полученной в условиях промышленного производства колес. Второе направление – это теоретические исследования и разработки, направленные в конечном итоге на создание новых методов расчета и проектирования металлосберегающих технологий штамповки и прокатки колес.

Вопросы, касающиеся технологии штамповки колесных заготовок и методов ее проектирования, разработаны на современном научном уровне, причем, как в рамках первого [1, 2 и др.], так и второго из указанных выше направлений исследований [3, 4 и др.]. Ведутся также работы в части совершенствования технологии прокатки колес и методов ее разработки [5–7 и др.]. Вместе с тем, в современной технической литературе недостаточно изучен вопрос изменения скоростных и силовых параметров при прокатке колес по существующим в настоящее время калибровкам и режимам обжарки. В современных публикациях по прокатке колес авторы в своих разработках опираются на устаревшие данные экспериментальных исследований 70-х и более ранних годов прошлого столетия [8, 9]. На сегодняшний день эти данные в целом позволяют получить общие представления о процессе деформации колесной заготовки в очаге деформации колесопрокатного стана (КПС), но лишь на качественном уровне, так как не имеют привязки к конкретным силовым и скоростным параметрам прокатки и фактической калибровке инструмента деформации. Поэтому необходим комплексный анализ современных технологических режимов прокатки колес,

а именно, анализ силовых и скоростных параметров прокатки во взаимосвязи с режимом обжатий колесной заготовки и приращения ее диаметра на различных стадиях процесса. Это позволит, во-первых, получить достоверную информацию о закономерностях протекания современного процесса прокатки колес в количественном выражении, а, во-вторых, определить приоритетные направления развития существующей технологии с целью снижения процента брака колес, имеющего прокатное происхождение. Решению поставленных задач и посвящена настоящая работа.

Экспериментальная информация по силовым и скоростным параметрам процесса прокатки получена в условиях промышленного производства колес  $\varnothing 957$  мм с плоскоконическим диском на прессопрокатной линии ОАО «ВМЗ». По принятой схеме деформации, заготовки массой 485 кг после предварительной осадки гладкими плитами на прессе силой 20 МН транспортировали по рольгангу к прессу силой 50 МН. Поданные на стол пресса силой 50 МН заготовки, имеющие температуру  $1190^{\circ}\text{C}$ , подвергали осадке-разгонке конусной плитой в нижнем технологическом кольце. Подготовленные таким образом заготовки транспортировали по рольгангу к прессу силой 100 МН, где получали отформованные заготовки (рис. 1) с окончательными размерами ступицы с примыкающей к ней частью диска и предварительными для последующей прокатки размерами обода с примыкающей к нему частью диска.

Поступившую с пресса силой 100 МН колесную заготовку, имеющую температуру  $1150^{\circ}\text{C}$ , с помощью загрузочного устройства задавали в стан. При выполнении исследований, в соответствии с технологической инструкцией, на КПС выполняли следующие операции: раскатку колеса по диаметру и выкатку диска; выкатку поверхности катания и внутренней поверхности обода; выкатку гребня; полировку элементов профиля обода. Величина раскатки колес по внутреннему диаметру обода составляла 146–147 мм, а величина суммарного осевого обжатия обода равнялась 28 мм (рис. 1). После прокатки температура ободьев черновых колес повышалась в результате деформационного разогрева на  $\sim 50^{\circ}\text{C}$ .

В процессе выполнения технологических операций, связанных с прокаткой колес, производили замеры давлений жидкости в гидросистеме КПС. Выполняли три параллельных замера давлений жидкости. В качестве измерительных приборов использовали: манометры избыточного давления МТП–160 – для замеров давлений в гидроцилиндре рабочего хода верхнего наклонного вала и гидроцилиндре прямого хода салазок нажимных валков; манометр избыточного давления МП 4–У – для замеров давления в гидроцилиндре прямого хода каретки коренных валков. Диапазон показаний манометров – (0–40) МПа, цена деления – 5 МПа, класс точности – 1,5.

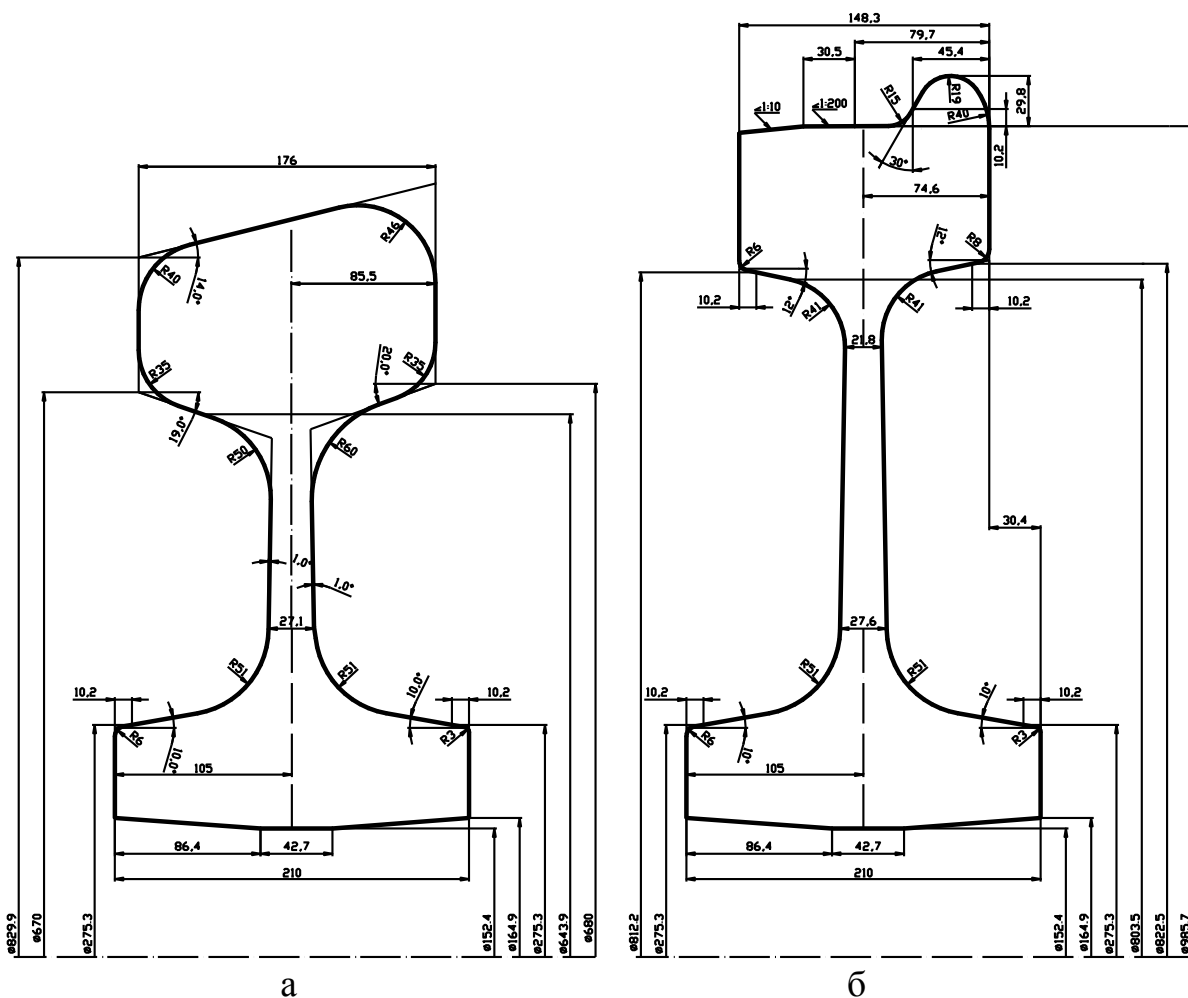


Рис. 1 – Колесная заготовка (а) и прокатываемое из него черновое колесо (б) (существующая калибровка по металлу)

Фиксирование показаний манометров выполняли путем видеосъемки\* цифровой камерой Canon Power Shot A 570IS с последующей передачей информации в компьютер. Обработку результатов видеосъемок, включающую построение массивов данных по давлениям в зависимости от времени, осуществляли на компьютере с шагом по времени  $\Delta t=0,033$  с. Расчет соответствующих значений сил  $P$  выполняли по формуле

$$P = \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4} p, \quad (1)$$

где  $d_{\text{п}}$  – диаметр плунжера гидроцилиндра рабочего хода, м ( $d_{\text{п}}=0,4$  м для верхнего наклонного вала;  $d_{\text{п}}=0,36$  м для салазок нажимных валков;  $d_{\text{п}}=0,25$  м для каретки коренных валков);

$p$  – давление жидкости в гидросистеме КПС, МН/м<sup>2</sup>.

\* Видеосъемка выполнена профессором кафедры «Обработка металлов давлением» ДонНТУ, д.т.н. Яковченко А.В.

Полученные значения сил (усредненные по 3-м параллельным замерам давлений) при прокатке черновых колес представлены в виде графических зависимостей от времени деформации и показаны на рис. 2.



Рис. 2 – Графики сил при прокатке колес  $\varnothing 957$  мм

Расчет приращения внутреннего диаметра колеса при прокатке выполняли на основе данных о перемещении каретки коренных валков и перемещении салазок нажимных валков. Указанные данные при прокатке каждого колеса фиксируются с помощью специально предусмотренных датчиков [10] и автоматически выводятся на дисплей в виде графических зависимостей в режиме реального времени. Кроме того, на данном дисплее также в автоматическом режиме строится график приращения внутреннего диаметра прокатываемого колеса. Настройка системы автоматики ведется по приращению внутреннего диаметра прокатываемого колеса. Система ведет отсчет от нуля и до требуемой величины раскатки колеса по внутреннему диаметру. Указанные графики, построенные с использованием усредненных по 3-м параллельным замерам значениям соответствующих параметров, представлены на рис. 3.

На основе полученной экспериментальной информации и существующей калибровки по металлу, выполнен анализ параметров процесса прокатки колес в зависимости от времени его протекания.

На первом этапе ( $0 \leq t \leq 2,5$ с), когда колесная заготовка подана с приемного рольганга в межвалковое пространство и уложена на нижний наклонный валок и опору станины, в магистраль масла низкого давления последовательно включают: гидроцилиндр прямого хода каретки коренных валков; гидроцилиндр рабочего хода верхнего наклонного вала. После того, как каретка коренных валков подана вперед до упоров и верхний наклонный валок вошел в контакт с заготовкой ( $0 \leq t \leq 1,867$ с), включают электродвигатели главных приводов и осуществляют разгон двигателей до

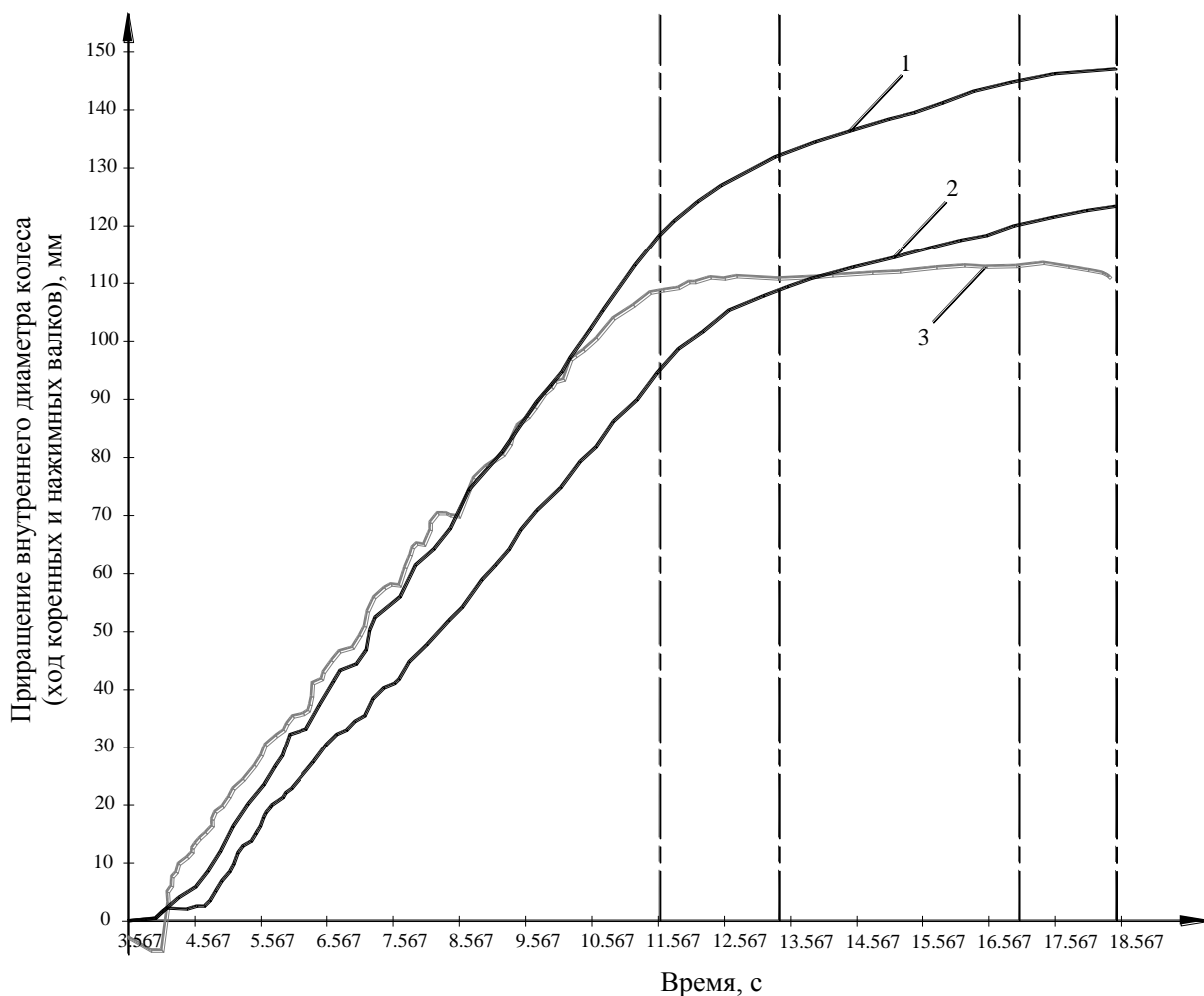


Рис. 3 – Графики роста внутреннего диаметра колеса и движения валков при прокатке колес: 1 – приращение внутреннего диаметра колеса; 2 – ход каретки коренных валков; 3 – ход салазок нажимных валков.

заданной скорости (число оборотов наклонных валков достигает ~200 об/мин). При  $t=2,5$ с гидроцилиндр рабочего хода верхнего наклонного валка включают в магистраль масла высокого давления (см. рис. 2). При этом сила, развиваемая гидроцилиндром прямого хода каретки, постепенно достигает рабочего уровня ~270–290 кН.

На начальном этапе деформации колесной заготовки реализуют осевое обжатие обода до соприкосновения наклонных валков с отштампованной поверхностью диска. Затем к заготовке на низком давлении подводят нажимные валки ( $2,5 \text{ с} \leq t \leq 3,567 \text{ с}$ ). После того, как нажимные валки вошли в контакт с заготовкой, согласно применяемой технологии, осуществляют «выбор» зазора между внутренней поверхностью обода и поверхностью наклонных валков. При  $t=3,567 \text{ с}$  (см. рис. 2, 3) начинается медленный рост внутреннего диаметра колеса. На этом этапе ( $3,567 \text{ с} \leq t \leq 4,167 \text{ с}$ ) величина раскатки колеса по внутреннему диаметру равна ~2,2 мм, а средняя скорость роста внутреннего диаметра колеса  $V \approx 3,7 \text{ мм/с}$ . Затем гидроцилиндр прямого хода салазок включают в магистраль масла высокого давления.

Таким образом, к моменту времени  $t \approx 4,2$  с реализована большая часть суммарного осевого обжатия, заложенного при разработке калибровки по металлу. Оставшееся обжатие, прежде чем верхний наклонный валок достигнет своего крайнего нижнего положения, составляет  $\sim 3$  мм. Оно необходимо для получения уклона в прокатанной части диска колеса. Следовательно, дальнейшая осевая деформация обода верхним и нижним наклонными валками происходит преимущественно за счет обжатия металла, идущего в уширение при радиальных обжатиях обода коренными и, главным образом, нажимными валками (см. рис. 2). Другими словами, заложенное в калибровке достаточно большое суммарное осевое обжатие (28 мм) реализуют еще в самом начале интенсивной раскатки колеса по диаметру. То есть, его назначают лишь для обеспечения захвата металла приводными наклонными валками при разгоне двигателей и в начальный момент раскатки. Поэтому на данном этапе, когда нажимные валки только вошли в контакт с заготовкой и зазор между внутренней поверхностью обода и наклонными валками еще полностью не «выбран», обжимаемый наклонными валками металл большей частью течет в увеличение толщины обода колесной заготовки. При этом не исключена возможность контакта торца обода с нижним наклонным валком за пределами зоны противозакатного бурта. В этом случае на ободе будет образовываться углубление, которое, в свою очередь, может послужить причиной образования заката под гребнем с внутренней стороны колеса.

Кроме того, на этапе, когда к заготовке подводят нажимные валки и начинают «выбор» зазора между внутренней поверхностью обода и наклонными валками, периодически будут возникать следующие неблагоприятные ситуации, которые могут привести к браку колес по невыполнению размеров диска. Первая ситуация будет иметь место, когда в указанный момент времени наклонные валки еще не коснулись поверхности диска, а зазор уже «выбран» и началась стадия интенсивного роста внутреннего диаметра колеса. Это приведет к тому, что в месте стыковки прокатанной части диска с отштампованной его частью будет наблюдаться резкий перепад толщины диска за счет получения более толстой прокатанной части диска. Другая ситуация может иметь место, когда наклонные валки уже начали обжимать металл в зоне диска, а стадия интенсивного роста внутреннего диаметра прокатываемого колеса еще не началась. В этом случае может быть получен такой вид брака, как «резкий переход диска», связанный с резким уменьшением его толщины в месте стыковки отштампованной и прокатанной частями диска. Это также может привести к невыполнению уклона в месте сопряжения диска с ободом колеса.

Следующий, самый продолжительный этап прокатки колесной заготовки начинается при  $t \geq 4,167$  с (см. рис. 2, 3). Он связан с ростом давления нажимных валков на прокатываемое колесо (увеличение радиальных обжатий обода). На этом этапе ( $4,167 \text{ с} \leq t \leq 11,6 \text{ с}$ ) скорость роста внутреннего

диаметра колеса увеличивается и в среднем составляет  $V \approx 15,6$  мм/с, величина раскатки колеса по внутреннему диаметру равна  $\sim 116$  мм. При этом сила, развиваемая гидроцилиндром прямого хода салазок, увеличивается с 560 кН до 1140 кН с последующим постепенным снижением до  $\sim 936$  кН, а силы, развиваемые гидроцилиндрами рабочего хода верхнего наклонного валка и прямого хода каретки, поддерживаются постоянными на уровне  $\sim 2073$  кН и  $\sim 275$  кН соответственно (см. рис. 2). На рассматриваемом этапе прокатки колесную заготовку интенсивно раскатывают по диаметру, выполняя при этом обжатия обода по ширине и внутренней поверхности и выкатку диска наклонными валками, а также формирование гребня и поверхности катания колеса нажимными валками. В процессе радиальной деформации металла обода также участвуют и коренные валки, которые не только поддерживают заготовку во время ее вращения, но и формируют поверхность катания колеса. При росте диаметра прокатываемого колеса, согласно технологии, каретка коренных валков перемещается назад.

Начиная с  $t \geq 11,6$ с прекращают поступление жидкости в гидроцилиндр прямого хода салазок и прокатку колесной заготовки ведут за счет гидравлической «пружины». При этом наблюдается плавное снижение силы, развиваемой гидроцилиндром прямого хода салазок, с 1140 кН до (при  $t=11,6$ с) до 936 кН (при  $t=13,4$ с). Скорость роста внутреннего диаметра колеса также снижается и в среднем составляет  $V \approx 7,6$  мм/с, а величина раскатки колеса по внутреннему диаметру на рассматриваемом этапе равна  $\sim 13,7$  мм (см. рис. 3).

Следующий этап прокатки колесной заготовки ( $13,4 \leq t \leq 17,033$ с) связан с выкаткой гребня колеса путем реализации «подпора» каретки коренных валков. В режиме «подпора» сила, развиваемая гидроцилиндром прямого хода каретки, повышается с 275 кН до 368 кН, а сила, развиваемая гидроцилиндром прямого хода салазок, продолжает постепенно снижаться с 936 кН до 916 кН (см. рис. 2), что, в свою очередь, влечет за собой снижение величины хода салазок (см. рис. 3). При постоянных значениях указанных сил колесо прокатывают в течении  $\sim 1,3$  с, а затем уровни сил плавно снижаются до 814 кН в гидроцилиндре прямого хода салазок нажимных валков и до  $\sim 319$  кН в гидроцилиндре прямого хода каретки коренных валков. Давление в гидроцилиндре рабочего хода верхнего наклонного валка при прокатке в режиме «подпора» каретки выдерживается постоянным на уровне 2136 кН (см. рис. 2). Скорость роста внутреннего диаметра колеса на рассматриваемом этапе снижается и в среднем составляет  $V \approx 3,6$  мм/с, а величина раскатки колеса по внутреннему диаметру  $\sim 12,9$  мм (см. рис. 3).

Таким образом, в процессе реализации «подпора» каретки коренных валков, обеспечивающего ограничение возможности перемещения каретки назад, имеет место интенсивное течение обжимаемого металла в зону гре-

бенья за счет ограничения роста диаметра прокатываемого колеса (см. рис. 3).

Следует также отметить, что, как видно из рис. 2, силу, развиваемую гидроцилиндром рабочего хода верхнего наклонного вала (когда он уже подключен к магистрали масла высокого давления), в процессе прокатки повышают в три последовательных этапа, чем обеспечивают формирование требуемого уклона прокатанной части диска колеса.

Следующий и заключительный этап прокатки колесной заготовки на КПС – это «полировка» обода. В процессе «полировки» ( $17,033\text{с} \leq t \leq 18,5\text{с}$ ) реализуют небольшие постоянно снижающиеся обжатия, за счет чего достигается повышение точности и стабильности размеров элементов профиля обода по периметру колеса. Величина раскатки колеса по внутреннему диаметру обода на этом этапе составляет не более 2 мм (см. рис. 3). Средняя скорость роста внутреннего диаметра колеса равна  $V \approx 1,4$  мм/с. На этом этапе прокатки вначале осуществляют слив жидкости из гидроцилиндра прямого хода салазок нажимных валков, в котором наблюдается стремительное (за 0,334 с) падение давления, а, следовательно, развиваемой силы с 814 кН до 0 (см. рис. 2). За счет этого при «полировке» обода исключена возможность превышения требуемой величины раскатки колеса по внутреннему диаметру, так как нажимные валки практически не имеют прямого хода (см. рис. 3). Затем, с задержкой  $\sim 1$  с, осуществляют слив рабочей жидкости из гидроцилиндра прямого хода каретки коренных валков и гидроцилиндра рабочего хода верхнего наклонного вала.

При  $t=18,5\text{с}$  процесс прокатки завершается – приводные двигатели выключают и валки разводят в исходное положение.

Таким образом, в свете вышеизложенного, перспективным для условий производства колес на ОАО «ВМЗ» (а также и на ОАО «Интерпайп НТЗ», где применяемая технология прокатки колес, учитывая идентичность прессопрокатного оборудования линий, в целом аналогична) может являться вариант технологии прокатки колес, обеспечивающий одновременное начало двух процессов: интенсивного роста диаметра прокатываемого колеса и обжатия металла в зоне диска наклонными валками. Этого можно добиться, например, за счет стационарного положения верхнего наклонного вала на начальном этапе прокатки и закладыванием в калибровку по металлу величины суммарного осевого обжатия обода, необходимой лишь для выкатки уклона по диску (обжатие  $\sim 3$  мм) и для осуществления разгона приводных двигателей наклонных валков до заданного числа оборотов (обжатие  $\sim 5$  мм). При таком варианте ведения технологии прокатки в процессе разгона приводных двигателей (раскрутки колесной заготовки) вместе с приводными наклонными валками (которые подведены к заготовке на низком давлении) можно использовать приводной коренной валок. Затем, по мере достижения приводными двигателями наклонных валков требуемого числа оборотов, к заготовке подводят нажимные валки



и отключают привод коренного валка. Далее гидроцилиндр прямого хода салазок включают в магистраль масла высокого давления. Одновременно в магистраль масла высокого давления включают гидроцилиндр рабочего хода верхнего наклонного валка.

Здесь следует отметить, что, как видно из рис. 2, повышение уровня давления в гидроцилиндре рабочего хода верхнего наклонного валка происходит в среднем за  $\sim 1,5$  с. В течении этого времени будет происходить «выбор» зазора, но наклонные валки не будут обжимать диск, так как сила, развиваемая гидроцилиндром рабочего хода верхнего наклонного валка еще не достаточно велика. Следовательно, через  $\sim 1,5$  с ( $\sim 2$  оборотов заготовки) зазор будет «выбран», сила, развиваемая гидроцилиндром рабочего хода верхнего наклонного валка, выйдет на рабочий уровень значений  $\sim 2073$  кН, а возросшая к этому времени до величины  $\sim 710$  кН сила, развиваемая гидроцилиндром прямого хода салазок нажимных валков, обеспечит скорость роста внутреннего диаметра прокатываемого колеса на уровне 15 мм/с. При этом наклонные валки будут обжимать металл, пошедший в уширение от радиального обжатия заготовки нажимными валками.

Таким образом, выполнен анализ силовых, скоростных и деформационных режимов прокатки колес по существующей в колесопрокатном цехе ОАО «ВМЗ» технологии. Показано, что прокатка колес, являясь существенно нестационарным процессом, включает пять характерных стадий. Установлено, что в рамках каждой из указанных стадий прокатки среднюю скорость роста внутреннего диаметра колеса можно считать величиной постоянной. Также установлено, что в существующих условиях промышленного производства колес весьма затруднительно точно фиксировать момент времени, когда необходимо начинать интенсивную раскатку колеса по диаметру (подачу высокого давления в гидроцилиндр прямого хода салазок нажимных валков), так как существующая система автоматики не регистрирует перемещение верхнего наклонного валка. Данные особенности ведения технологии прокатки, предусматривающие большую величину суммарных осевых обжатий, реализуемых на начальном этапе раскатки, могут приводить к браку на прокате, в первую очередь по невыполнению размеров диска. Поэтому, перспективным направлением совершенствования технологии прокатки колес является получение колесной заготовки с меньшей шириной обода, и, соответственно, прокатка с гораздо меньшим суммарным осевым обжатием. При этом диаметр колесной заготовки также необходимо будет увеличить для предотвращения контакта торцов наклонных валков со ступицей. Лимитирующим фактором при назначении максимального внутреннего диаметра колесной заготовки будет являться допустимая сила штамповки на формовочном прессе. Реализация предлагаемых мероприятий позволит снизить процент отбраковки

колес, а также уменьшить цикл на КПС за счет уменьшения величины раскатки колес по диаметру.

#### Литература

1. Яковченко А.В., Снитко С.А., Собхи Хасан. Экспериментальные исследования силовых параметров и совершенствование процессов штамповки колесных заготовок // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2006. – С. 302 – 306.

2. Снитко С.А., Яковченко А.В., Ивлева Н.И. Метод совершенствования калибровок, освоенных в условиях промышленного производства штампованно-катаных колес // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2007. – С. 211 – 216.

3. Яковченко А.В., Снитко С.А., Собхи Хасан. Новые технологические схемы и калибровки для производства колес из точных и уменьшенных по массе заготовок // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ, 2005. – С. 100–107.

4. Снитко С.А., Яковченко А.В., Ивлева Н.И. Математическая модель процесса штамповки колесных заготовок // Наукові праці ДонНТУ. Металургія: Зб. наук. пр. – Донецьк, 2007. – Вип. 9 (122). – С. 156 – 165.

5. Яковченко А.В., Луговой А.В., Ивлева Н.И. Разработка нового способа прокатки черновых колес // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2004. – С. 504–507.

6. Пат. 2073577 Россия, МПК6 В21 Н 1/04. Способ прокатки изделий типа колес. А.А. Коньшев, Б.Ф. Антипов, С.А. Королев и др. (Россия) – № 94041509/08; Заявл. 16.11.1994; Оpubл. 20.02.1997. – 6 с.: ил.

7. Яковченко А.В., Луговой А.В., Ивлева Н.И. Экспериментально-теоретический метод компьютерного проектирования калибровок для прокатки железнодорожных колес // Металл и литье Украины. – 2004. – № 1–2. – С. 59–63.

8. Шифрин М.Ю. Резервы производительности и выхода годного при прокатке колес. – М.: Металлургия, 1989. – 144 с.

9. Производство железнодорожных колес / Г.А. Бибики, А.М. Иоффе, А.В. Праздников и др. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.

10. Пат. 2082081 Россия, МПК6 G01B7/12, В21С51/00. Измеритель внутреннего диаметра обода железнодорожного колеса при прокатке. Ю.Г. Гончаров, Ю.В. Чернихов, М.М. Дмитриев, Ю.И. Кузякин. (Россия) – № 5067467/28; Заявл. 07.08.1992; Оpubл. 20.06.1997. – 8 с.: ил.

**Snitko S. Analysis of wheels' rolling's power and speed parameters.**

*The analysis of power and speed parameters of railway wheels' rolling is executed. On its basis the demerits of existent technology are shown and directions of its development are determined.*