

С.А. Снитко /к.т.н./, А.В. Яковченко /д.т.н./, А.Л. Сотников /д.т.н./
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ С НАГРУЗКАМИ И ЗАПАСОМ ПРОЧНОСТИ НАКЛОННЫХ ВАЛКОВ КОЛЕСОПРОКАТНЫХ СТАНОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО И ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПОВ

Для колесопрокатных станков горизонтального и вертикального типов изучена взаимосвязь режимов прокатки с силовыми нагрузками, напряженно-деформированным состоянием и коэффициентом запаса прочности наклонных (эджерных) валков. На этой основе установлено, что рациональным является вариант уменьшения значения раскатки обода по внутреннему диаметру (например, для колес с плоскоконическим диском диаметром 957 мм на 40-50 мм) за счет увеличения диаметра обода штампуемой колесной заготовки и использования схем штамповки, предусматривающих разгонку центральной части заготовки перед ее формовкой в штампах.

Ключевые слова: колесопрокатные станы горизонтального и вертикального типов, режимы прокатки, силовые нагрузки, напряженное состояние и коэффициент запаса прочности наклонных (эджерных) валков.

Постановка проблемы

Современные процессы прокатки железнодорожных колес характеризуются значительными эксплуатационными нагрузками на рабочие органы колесопрокатных станков (КПС). Указанные нагрузки носят знакопеременный характер и отличаются неравномерностью, которая связана с существенной нестационарностью процесса прокатки.

В связи с этим важно установить взаимосвязь режимов прокатки с нагрузками и напряженно-деформированным состоянием (НДС) рабочих органов КПС, а также актуально решить научно-техническую проблему увеличения срока службы валков за счет совершенствования режимов прокатки.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ технической литературы показывает, что на сегодняшний день достаточно глубоко изучены особенности формоизменения металла и его НДС при прокатке железнодорожных колес на КПС горизонтального [1-6 и др.] и вертикального [7-9 и др.] типов. Также для обоих типов КПС созданы научно обоснованные методы автоматизированного проектирования режимов деформации и калибровок [10,11].

Представления об эксплуатационных нагрузках на валки КПС основываются на результатах теоретических исследований, выполненных более 30 лет назад [1,2] и представляющих собой весьма упрощенные аналитические модели расчета сил прокатки, соответствующие уровню

развития теории прокатки середины прошлого века [12,13 и др.].

Результаты исследований эксплуатационных нагрузок и НДС рабочих органов КПС с учетом реальной кинематики процесса прокатки, его стадийности в технической литературе практически отсутствуют.

Попытки оценить нагрузки на наклонные валки КПС с помощью современных систем конечно-элементного моделирования реализованы без учета реальной кинематики процесса [14], что делает невозможным совершенствование режимов прокатки с целью минимизации нагрузок на рабочие органы КПС и, соответственно, повышение срока эксплуатации валков без поломок.

Одним из основных видов инструмента деформации КПС являются наклонные валки. На станах горизонтального типа они служат для реализации осевых и радиальных обжатий обода штампованной колесной заготовки, а также для выкатки диска.

На современных станах вертикального типа наклонные валки, которые чаще называют раскатными (или эджерными), осевые обжатия обода не выполняют. Для этого служит пара неподвижных конических роликов [7].

На КПС горизонтального и вертикального типов оба наклонных валка, как правило, являются приводными (остальные ролики или валки – неподвижные) и совместно с парой нажимных валков на КПС горизонтального типа или одним нажимным валком большего диаметра на КПС вертикального типа образуют очаг пластической

деформации, в котором происходит увеличение диаметра обода колеса. В зависимости от режима прокатки скорость роста диаметра обода прокатываемого колеса может быть различной.

Режим прокатки определяется формой и размерами поступающей на стан отштампованной на формовочном прессе колесной заготовки, а также технологическими параметрами процесса прокатки.

Геометрические параметры колесной заготовки обуславливают суммарные (за весь процесс прокатки) величины осевого и радиального обжатий обода, а также величину раскатки обода по внутреннему диаметру, соответственно при прокатке эти параметры изменить нельзя.

Величины частных (на каждом обороте колеса) обжатий обода и связанная с ними скорость роста внутреннего диаметра обода определяются технологическими режимами прокатки, которые можно изменять по ходу этого процесса.

Технологический режим прокатки колеса на КПС выбирают исходя, прежде всего, из условия получения требуемых геометрических параметров прокатанного колеса: величины внутреннего диаметра обода, размеров гребня и ширины обода.

На современных прессопрокатных линиях колесные заготовки штампуют на формовочном прессе, как правило, с полномерным гребнем. Величины раскатки обода по диаметру и суммарного осевого обжатия обода на КПС вертикального типа могут быть минимальными, необходимыми для качественного оформления всех элементов обода. С помощью такой технологии можно решать задачу снижения цикла прокатки. Однако эта технология является весьма чувствительной к стабильности размеров штампованной колесной заготовки. Кроме того, существуют ограничения, связанные с максимально возможным диаметром штампующей колесной заготовки, который лимитируется силовыми возможностями существующих формовочных прессов.

На прессопрокатных линиях, оборудованных КПС горизонтального типа, гребень колеса получают, как правило, в процессе прокатки. Преимуществом такой технологии является, прежде всего, меньшая чувствительность к стабильности размеров штампующей колесной заготовки. Также, в отличие от линий с КПС вертикального типа, можно назначать большие суммарные осевые обжатия обода (до 30 мм) на стане и снижать максимальный диаметр колесной заготовки (увеличивая ширину ее обода), а, следовательно, – необходимую для штамповки силу.

Во многих случаях получить колесо требуемых размеров можно, реализуя различные ре-

жимы прокатки. Очевидно, что при этом эксплуатационные нагрузки на прокатные валки также будут отличаться.

Важно отметить, что на КПС горизонтального и вертикального типов из всех прокатных валков именно наклонные являются наиболее нагруженными. Во-первых, они приводные и испытывают нагрузки кручения при прокатке. Во-вторых, величина реализуемых наклонными валками суммарных радиальных обжатий значительно больше аналогичных обжатий со стороны нажимных валков. И, в-третьих, в отличие от главных и нажимных валков, обладающих достаточно большой и равномерной толщиной бандажа и испытывающих эксплуатационные нагрузки в одной, вертикальной или горизонтальной, плоскости (в зависимости от типа КПС), наклонные валки, консольно закрепленные на валах, испытывают как горизонтальные, так и вертикальные изгибающие нагрузки знакопеременного характера. При этом технические характеристики КПС вертикального и горизонтального типов позволяют развивать силу в гидrocилиндрах рабочего хода наклонных валков до 1,5-1,8 МН.

В отличие от главных и нажимных валков, наклонные валки для прокатки нового типоразмера колеса почти всегда изготавливаются заново, так как их параметры зависят от размеров обода, диска и их взаимного расположения. Это является положительным моментом с точки зрения запаса усталости вала.

Вместе с тем практически у всех наклонных валков толщина бандажа по их длине изменяется. При этом существенным образом изменить конфигурацию наклонных валков и увеличить их габариты нельзя, так как они обуславливаются, соответственно, конфигурацией прокатываемого колеса и конструктивными параметрами стана (необходимо выдерживать требуемые технологические зазоры между валками при прокатке). Поэтому актуально определить технологические режимы прокатки, которые бы позволили минимизировать нагрузки на наклонные валки в наиболее нагруженных (опасных) сечениях.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является установление взаимосвязи между режимом прокатки колесной заготовки и нагрузками на наклонные валки КПС и на этой основе – определение рациональных режимов, обеспечивающих минимизацию эксплуатационных нагрузок и повышение запаса прочности наклонных валков в местах наиболее вероятной их поломки.

Основной материал исследования

Анализ параметров прокатки железнодорожных колес выполнен на основе результатов конечно-элементного моделирования этого процесса в системе DEFORM-3D с использованием методик и подходов, изложенных в работах [9,15].

Исследования, выполненные в настоящей работе, основываются также на результатах исследования параметров прокатки, полученных в условиях промышленного производства колес [8,9,16].

При моделировании использовали схемы прокатки колесной заготовки (для колес с пло-

скоконическим диском Ø957 мм) по существующим на АО «ВМЗ» (рис. 1а) и ОАО «ЕВРАЗ НТМК» (рис. 1б) технологиям.

Отличительная особенность реализованной в рамках настоящей работы методики конечно-элементного моделирования состоит в том, что воздействия наклонных валков на прокатываемую заготовку задавали через скорости, величины которых определили из условия обеспечения силового режима, полученного в работе [15]. Это позволило, с одной стороны, получить адекватные результаты моделирования (разработанная в работе [15]. Методика моделирования базируется на экспериментальных данных, полученных

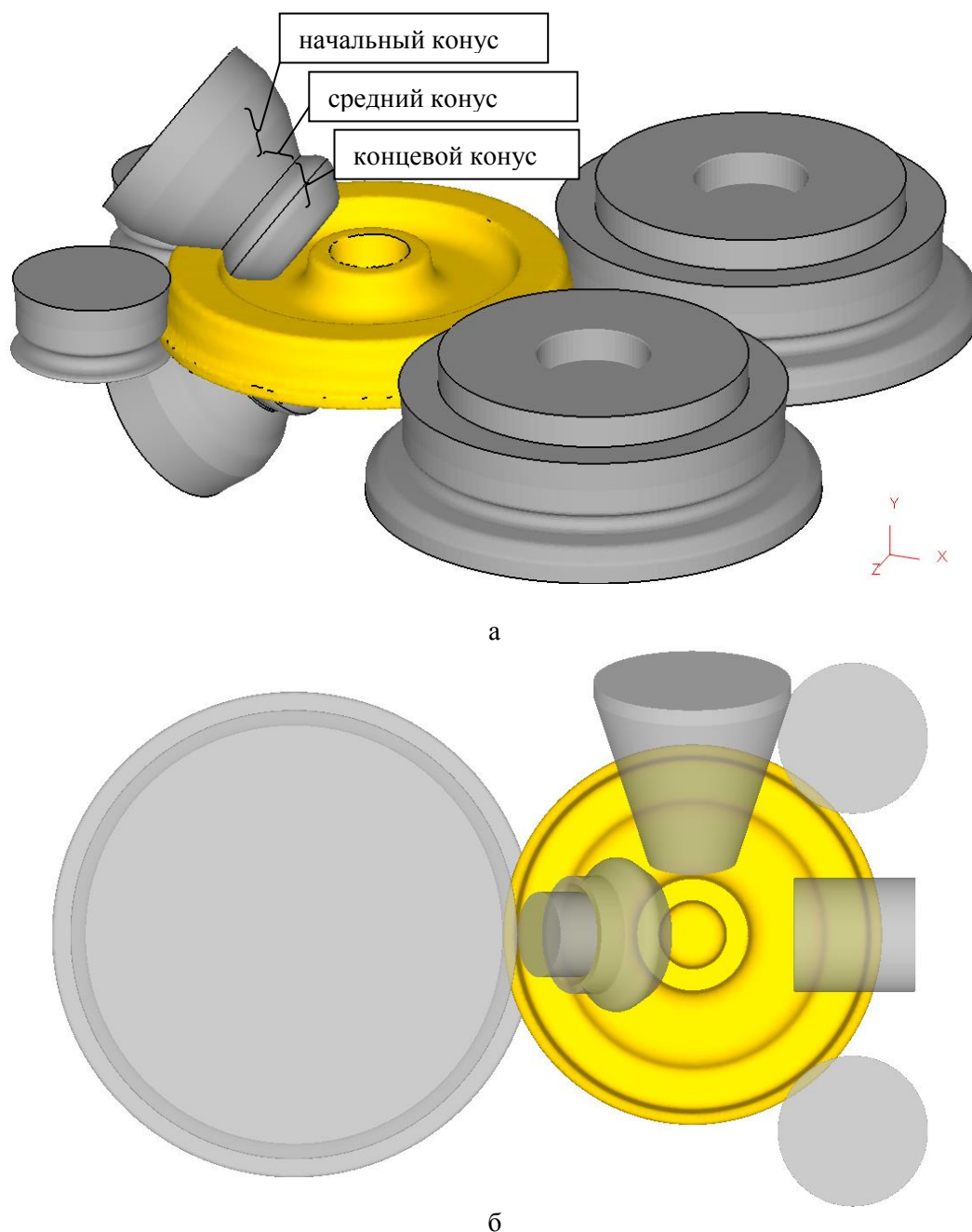


Рис. 1. Схемы прокатки железнодорожного колеса, использованные при моделировании: а – на КПС горизонтального типа; б – на КПС вертикального типа

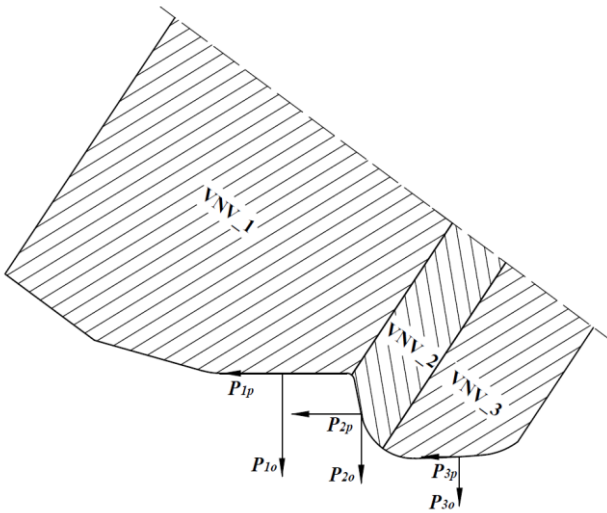


Рис. 2. Схема деления верхнего наклонного вала на части и действующих на них сил:

VNV_1 – начальная часть вала; VNV_2 – средняя часть вала; VNV_3 – конечная часть вала; P_{pn} , P_{on} – радиальная и осевая составляющие силы прокатки, соответственно ($n=1-3$)

в условиях промышленного производства колес, и прошла соответствующую проверку на адекватность). С другой стороны, в качестве результатов моделирования получены силы и моменты прокатки на наклонных валах, которые были необходимы для дальнейшего анализа.

Кроме того, при моделировании прокатки на

КПС горизонтального типа было предусмотрено обжатие диска колесной заготовки на 1 мм. На практике, как правило, указанное обжатие исключают, чтобы не получить дефект «резкий переход по диску». В нашем же случае это позволило оценить величины нагрузок на наклонных валах, которые могут иметь место при обжатии диска колесной заготовки.

При моделировании верхний наклонный валок состоял из 3-х жестких, недеформируемых частей (рис. 2): начальной части вала (VNV_1), включающей начальный конус (который непосредственно контактирует с деформируемым металлом (см. рис. 1)); средней части вала (VNV_2) – средний конус; конечной части вала (VNV_3) – концевой конус.

Нижний наклонный валок не был разделен на части. Для него при моделировании использовали упругий тип объекта. В качестве материала вала выбрали имеющуюся в библиотеке DFORM-3D сталь AISI-H-13 с соответствующими механическими и теплофизическими характеристиками, зависящими от температуры.

Для колесной заготовки использовали пластическую модель материала с соответствующими кривыми течения, рассчитанными для колесной стали марки 2 (ГОСТ 10791-2011) [15]. Используемые при моделировании теплофизические свойства колесной стали взяли из данных DEFORM 3D для высокоуглеродистой стали.

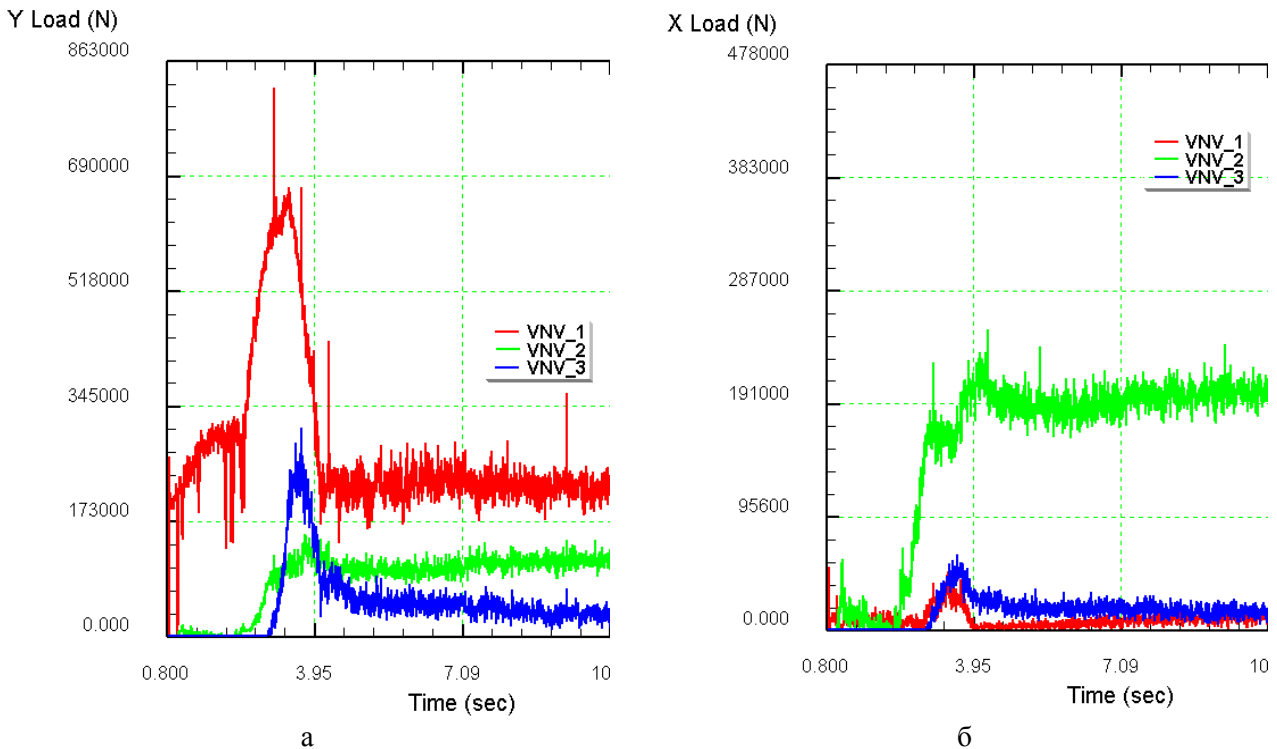


Рис. 3. Составляющие силы прокатки на верхнем наклонном валке КПС горизонтального типа: а – осевая составляющая; б – радиальная составляющая; Y Load (N) – составляющая силы в направлении оси OY, Н; X Load (N) – составляющая силы в направлении оси OX, Н; Time (sec) – время, с

Температуру валков и роликов при прокатке задавали постоянной, равной 300 °С.

Заготовка перед прокаткой имела неравномерное температурное поле в диапазоне 963-1231 °С для КПС горизонтального типа и 1022-1247 °С для КПС вертикального типа. Данное распределение температур было получено путем конечно-элементного моделирования многопереходных процессов деформирования заготовок на прессопрокатных линиях АО «ВМЗ» и ОАО «ЕВРАЗ НТМК» (с учетом транспортировки и междеформационных пауз) в соответствии с существующими технологическими режимами.

Изложенный выше подход к моделированию позволил получить, с одной стороны, радиальные (P_p) и осевые (P_o) составляющие сил, а также моментов прокатки, действующие на наклонные валки на различных стадиях (при различных режимах) прокатки колеса (рис. 3), а с другой – исследовать НДС валков при данных режимах.

Анализ полученных при моделировании результатов расчета силовых параметров прокатки показал следующее.

Для КПС горизонтального типа (см. рис. 3) наиболее высокие значения осевой составляющей силы ($P_o=755$ кН), а также момента (M_{np}) на всех трех конусах наклонных валков получены в конце стадии осадки обода по ширине, на которой режим прокатки характеризуется отсутствием роста внутреннего диаметра обода. При этом P_p достигает 224 кН, $M_{np} - 40$ кН·м.

Такой скачок силы обусловлен тем, что обжимаемый в вертикальном направлении металл стремится течь в увеличение толщины обода, при чем растет не только наружный диаметр обода, но и внутренний, т.к. подпор со стороны нажимных валков на данном этапе незначителен.

Указанная выше схема деформирования металла характерна и для работы КПС вертикального типа на начальной стадии прокатки, когда предусматривают обжатие диска на величину до 3 мм. При этом суммарное осевое обжатие обода не превышает 5 мм [8, 9], однако исходная толщина обода подаваемой на КПС колесной заготовки больше, чем на КПС горизонтального типа.

Таким образом, к концу стадии осадки обода по ширине на КПС горизонтального типа и в начальный момент прокатки заготовки на КПС вертикального типа (после первого оборота заготовки – обжатия диска и разгона приводных двигателей) ободья колесных заготовок имеют близкие геометрические параметры (рис. 4). Далее в обоих случаях следует основная стадия прокатки – раскатка обода по диаметру.

Анализ результатов моделирования показал, что на КПС горизонтального типа на стадии раскатки обода по диаметру, когда режим прокатки характеризуется постоянным нарастанием силы в гидроцилиндре рабочего хода салазок нажимных валков, для обжатия обода по ширине на начальных конусах требуется осевая составляющая силы в 2,5-3 раза меньшая, чем для реализации осадки обода по ширине. Причем на протяжении всей стадии раскатки ее значение практически постоянное (см. рис. 3а), объясняемое постоянной величиной уширения обода.

Аналогичная ситуация по характеру изменения осевых сил наблюдается на всех участках наклонного валка. Причем на рассматриваемой стадии прокатки их можно считать постоянными (см. рис. 3а).

Наиболее высокие значения радиальной составляющей силы прокатки получены на среднем конусе наклонного валка. Полученные значения осевых сил с достаточной степенью точности можно считать постоянными на протяжении практически всей стадии раскатки обода по диаметру (см. рис. 3б).

На стадии раскатки обода по диаметру для КПС горизонтального типа величина P_o достигает 271 кН, $P_p - 290$ кН, $M_{np} - 36$ кН·м.

Расчеты также показали, что и для КПС вертикального типа на стадии раскатки обода по диаметру характерными также являются практически постоянные значения осевой и радиальной составляющих сил прокатки, действующих на наклонные (эджерные) валки (рис. 5).

При этом на рассматриваемой основной стадии прокатки силовые параметры достигают максимальных величин: $P_o=729$ кН, $P_p=361$ кН, $M_{np}=21$ кН·м.

Последующие режимы прокатки (после достижения величины внутреннего диаметра колеса ~780 мм), связанные с существенным снижением скорости роста внутреннего диаметра обода, не приводят к повышенным нагрузкам на наклонные валки. Поэтому их анализ в рамках настоящей работы интереса не представляет.

На рис. 6 представлены графики скорости роста внутреннего диаметра колеса при прокатке колесных заготовок для колес с плоскоконическим диском Ø957 мм по существующим на АО «ВМЗ» и ОАО «ЕВРАЗ НТМК» технологиям. Графики построены на основе данных работ [8,16].

Следует отметить, что на практике, при прокатке колеса на КПС вертикального типа между внутренней поверхностью обода и средним конусом наклонного валка предусматривается зазор ~10 мм, а прокатка начинается с обжатия

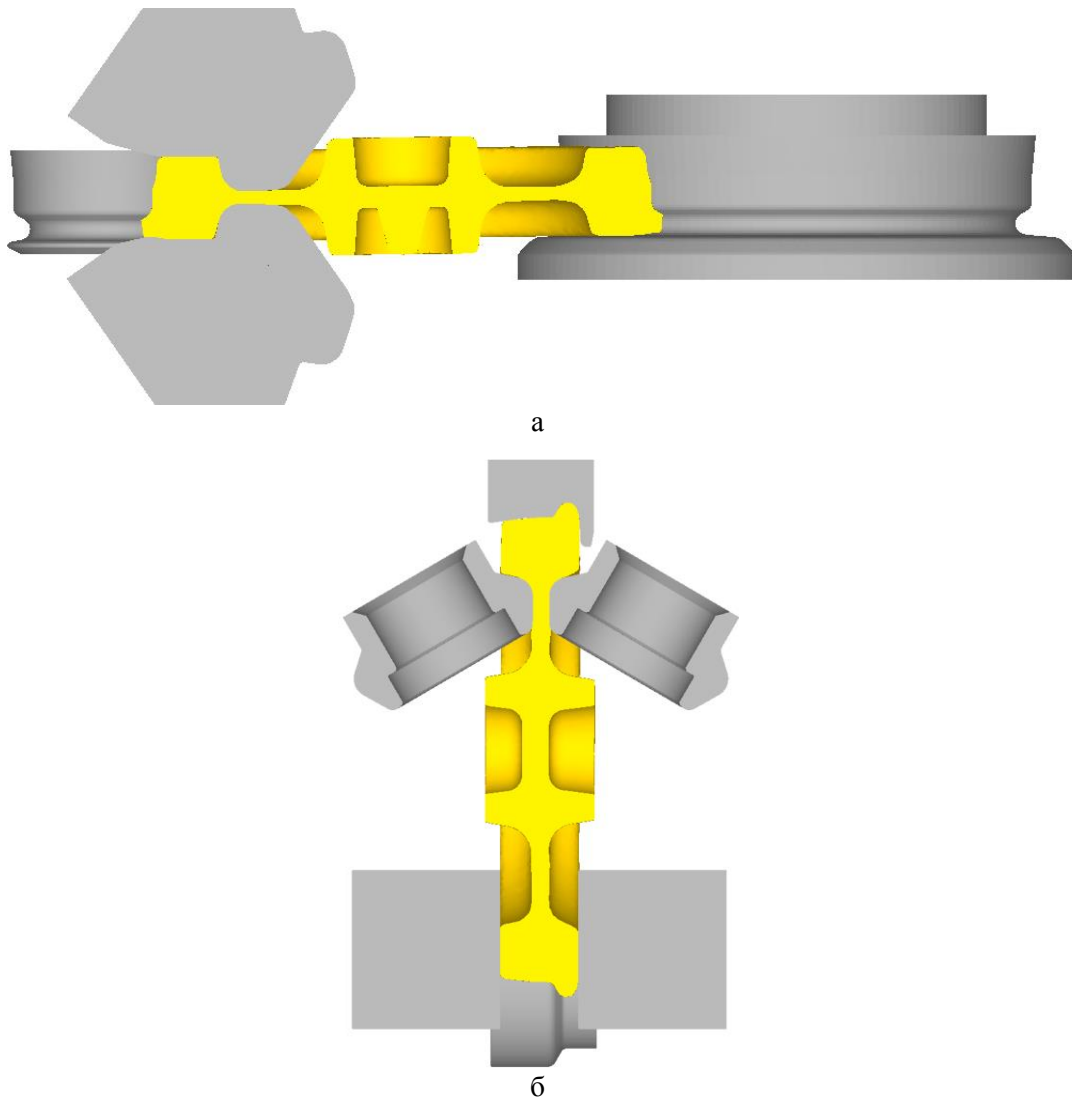


Рис. 4. Результаты моделирования формоизменения обода колесной заготовки при прокатке (начальный этап раскатки обода по диаметру):
a – на КПС горизонтального типа; *б* – на КПС вертикального типа

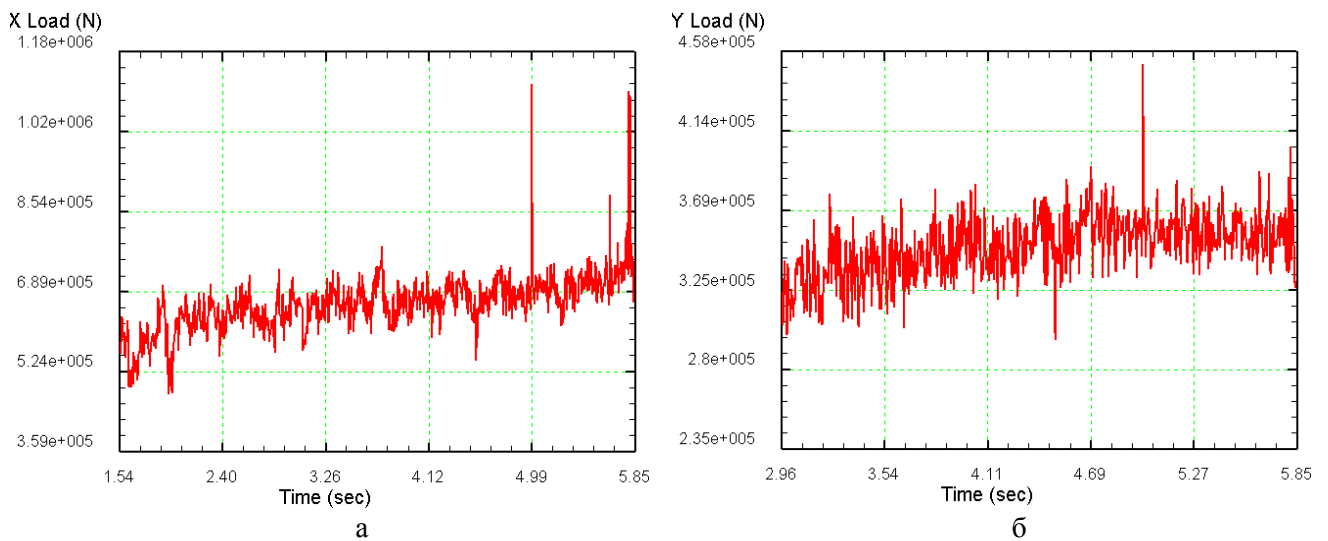


Рис. 5. Составляющие силы прокатки на наклонном (эджерном) валке КПС вертикального типа на стадии раскатки обода по диаметру: *a* – осевая составляющая; *б* – радиальная составляющая; Y Load (N) – составляющая силы в направлении оси OY, Н; X Load (N) – составляющая силы в направлении оси OX, Н; Time (sec) – время, с

металла по диску (без обжата по внутренним поверхностям обода). Поэтому график начинается с $D_{вн}=640$ мм (см. рис. 6), хотя средний по внутренней и наружной сторонам колеса внутренний диаметр обода колесной заготовки равен 674 мм.

Следует также отметить, что график 2 был получен путем аппроксимации графика приращения внутреннего диаметра колеса [16], начиная со стадии раскатки обода по диаметру, единой гладкой функцией ($f=-0,8127t^2+28,803t-97,772$). Полученную функцию затем дифференцировали по времени (t) с целью получения массива данных по скорости роста внутреннего диаметра колеса, необходимого для построения соответствующего графика в координатах $V_{вн} - D_{вн}$ (см. рис. 6). В действительности же функция приращения внутреннего диаметра колеса внутри стадии раскатки обода по диаметру на КПС горизонтального типа более близка к линейной [16], то есть величина $V_{вн}$ равна константе.

Анализ работы [16] показывает, что функция приращения силы в гидроцилиндре рабочего хода салазок нажимных валков внутри вышеуказанной стадии прокатки также близка к линейной. То есть скорость роста (или снижения) радиальной составляющей силы прокатки также равна константе.

Аналогичная тенденция на стадии раскатки обода по диаметру имеет место и при прокатке колес на КПС вертикального типа [8,9].

Таким образом, вид функции $V_{вн}$ (см. рис. 6) определяется видом функции скорости роста радиальной составляющей силы, создаваемой на КПС горизонтального типа парой нажимных валков, а на КПС вертикального типа – нажимным валком. Иными словами, обеспечивая наперед заданную зависимость скорости роста радиальной силы на КПС, можно получать для конкретного типоразмера колеса и, соответственно, калибровки (величины раскатки обода по диаметру) наиболее рациональную функцию скорости роста внутреннего диаметра колеса в процессе его прокатки.

Т.к. скорости вращения приводных наклонных валков после разгона приводных двигателей не изменяются, а скорость вращения колеса к концу процесса снижается (вследствие роста диаметра колеса при прокатке), максимальная разнотолщинность обода за один оборот колеса увеличивается. Соответственно, $V_{вн}$ к концу прокатки неизбежно должна снижаться (см. рис. 6).

В общем случае назначаемая величина $V_{вн}$ на основной стадии прокатки должна обеспечить

на заключительном этапе прокатки приемлемую (минимальную) разнотолщинность обода за один оборот колеса, которую можно будет устранить на последующей, заключительной, стадии полировки обода. Очевидно, что от используемой величины $V_{вн}$ также будет зависеть и цикл прокатки.

Анализ данных работы [9] и графиков, представленных рис. 6, показывает, что цикл прокатки на КПС вертикального типа в среднем на 30-40 % выше, чем на КПС горизонтального типа. Это связано с тем, что при интенсивной раскатке по диаметру (большой величине $V_{вн}$) также интенсивно увеличивается эксцентricность прокатываемого колеса, которую затем будет проблематично устранять по следующим причинам.

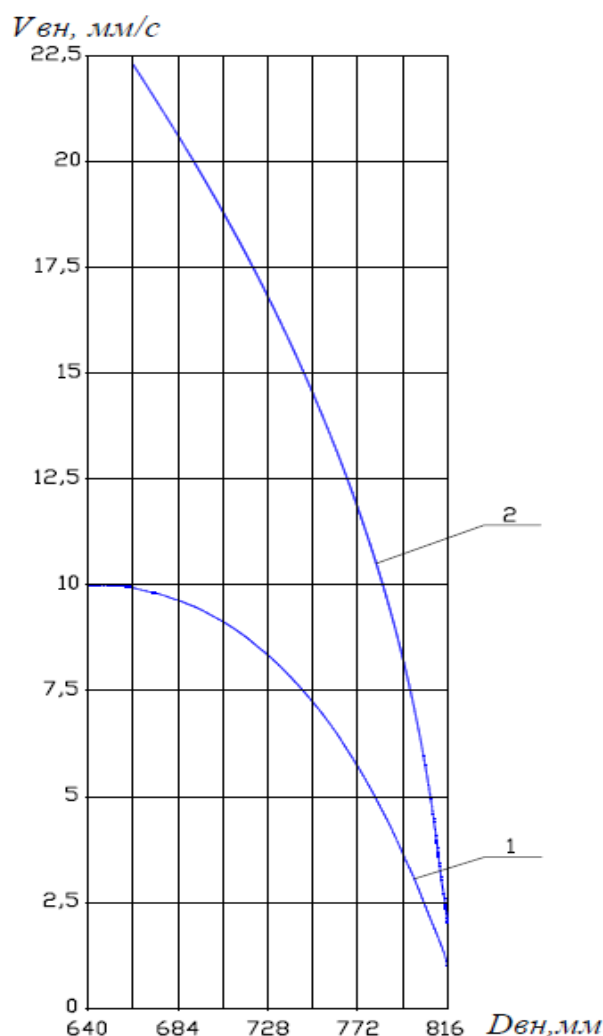


Рис. 6. Графики скорости роста внутреннего диаметра колеса ($V_{вн}$) в зависимости от величины его внутреннего диаметра ($D_{вн}$) при прокатке колесной заготовки для колеса $\varnothing 957$ мм с плоскоконическим диском: 1 – на КПС вертикального типа (технология ОАО «ЕВРАЗ НТМК»); 2 – на КПС горизонтального типа (технология АО «ВМЗ»)

Значительное снижение $V_{вн}$ в конце прокатки (как на КПС горизонтального типа, см. рис. 6, поз. 2) может приводить к пробуксовкам, так как приводные наклонные валки на КПС вертикального типа не выполняют осевое обжатие обода, обеспечивающее дополнительный захват заготовки валками.

По этой же причине, а также по конструктивным особенностям стана на КПС вертикального типа реализовать прокатку в режиме подпора каретки (как на КПС горизонтального типа) невозможно. Вместе с тем использование данного режима, кроме основного его назначения (выкатки гребня при малой величине раскатки обода по внутреннему диаметру), является рациональным на заключительной стадии прокатки с целью стабилизации размеров обода.

Рассмотрим более подробно типовые конструкции наклонных валков, используемых на современных КПС. Они представлены на рис. 7.

У всех наклонных валков имеется так называемое место «по пережиму», где диаметр валка и, соответственно, толщина бандажа наименьшие. Считается, что вероятность поломки валка в этом месте наибольшая.

Следует отметить, что существенным отличием наклонных валков КПС вертикального типа является отсутствие у них начального конуса

валка (на КПС горизонтального типа начальный конус служит для реализации осадки обода по ширине). Следствием этого является существенное уменьшение длины наклонного валка (см. рис. 7) и снижение почти в 2 раза величины плеча и самой изгибающей силы, действующей на наклонный валок при прокатке.

При переточке наклонных валков на КПС вертикального типа (см. рис. 7а) диаметр «по пережиму» ($\varnothing 290$ мм) не изменяется.

При переточке наклонных валков для КПС горизонтального типа (см. рис. 7б) рабочая поверхность смещается вправо в плоскости чертежа, представленного на рис. 7б. При этом уменьшается диаметр валка в «пережиме» с $\varnothing 267-280$ мм до $\varnothing 240-245$ мм.

На КПС горизонтального типа при переточке валков уменьшается сумма длин горизонтальных проекций («сумма конусов») среднего и концевых конусов, которая в новом, непереточенном, валке составляет обычно 100-135 мм (см. рис. 7б). При малой «сумме конусов» имеет место локализация эксплуатационных нагрузок на торце вала, имеющего в этом месте наименьший диаметр ($\varnothing 120-140$ мм, см. рис. 7б). При длительной эксплуатации прокатных валов это приводит к постепенному уменьшению поперечных размеров вала в этом месте и образованию зазора между

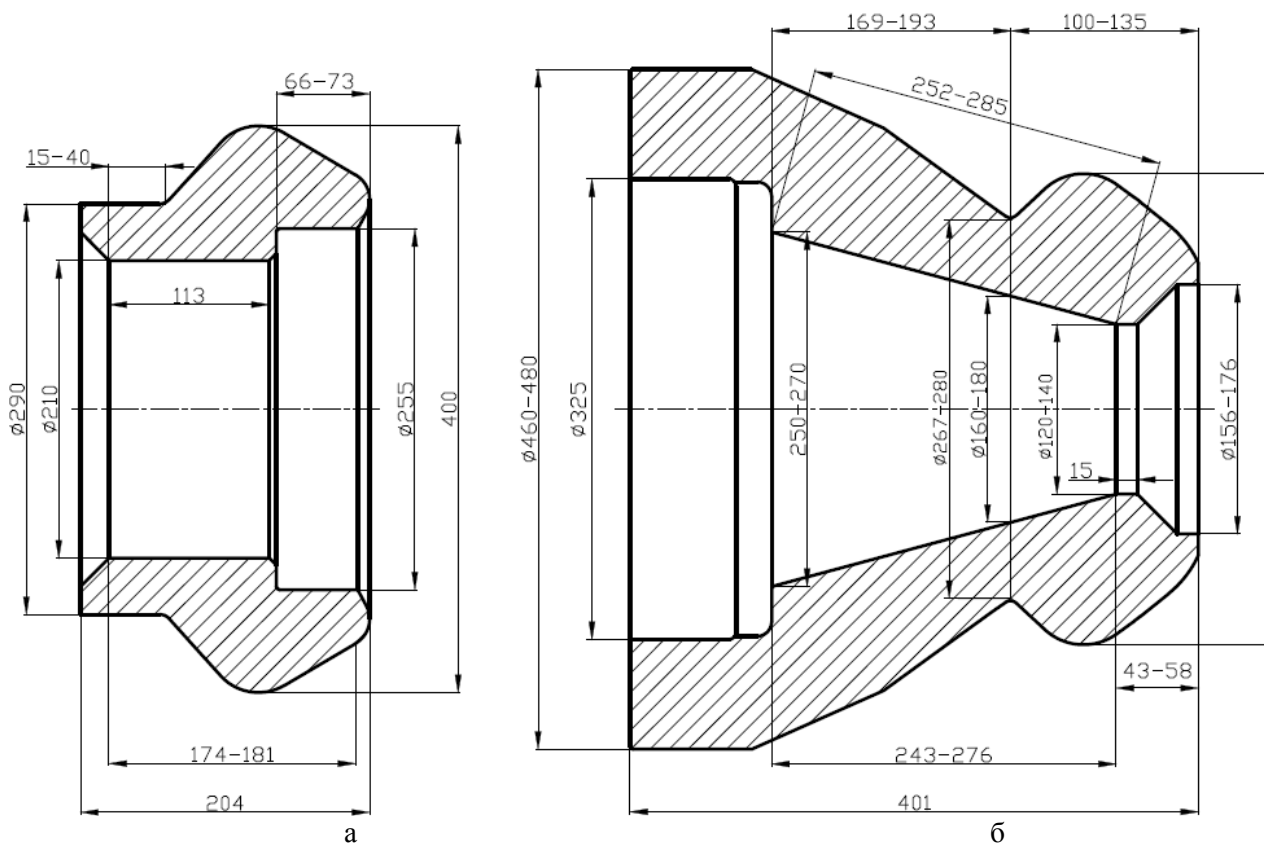


Рис. 7. Типовые конструкции наклонных валков КПС:
а – вертикального типа; б – горизонтального типа

валом и валком, что повышает изгибающие нагрузки в опасном сечении вала и, соответственно, негативным образом отражается на запасе прочности.

Преимуществом конструкции наклонного вала на КПС вертикального типа является то, что (см. рис. 7а) его контактная (посадочная) поверхность с валом имеет цилиндрическую форму. Несмотря на то, что длина пятна контакта (113 мм) значительно меньше аналогичной длины в наклонном валке для КПС горизонтального типа (252-285 мм, см. рис. 7б), диаметр вала (и, соответственно, вала) одинаковый по всей указанной выше длине (Ø210 мм, см. рис. 7а).

У наклонного вала для КПС горизонтального типа поверхность его контакта с валом имеет форму усеченного конуса (см. рис. 7б). При этом начальный диаметр (Ø250-270 мм) значительно больше, чем у наклонного вала для КПС вертикального типа. Вместе тем в опасном сечении наклонного вала (в месте «по пережиму») диаметр существенно меньше (Ø160-180 мм). При максимальной переточке вала его диаметр по внутренней поверхности, соответствующий месту «по пережиму», становится меньше на величину ~20 мм (то есть Ø140-160 мм).

В отличие от КПС горизонтального типа, на КПС вертикального типа практически всегда выполняют обжатие по диску металла, который резервируют в диске в виде его утолщения от ступицы к ободу при штамповке колесной заготовки на формовочном прессе [8]. Данное утолщение диска необходимо, прежде всего, для обеспечения надежного захвата колесной заготовки, придания ей, а также нажимному валку и коническим роликам заданного числа оборотов на начальной стадии прокатки. Кроме того, наклонные валки на современных КПС вертикального типа могут поворачиваться на определенный угол в процессе прокатки [7], обеспечивая при необходимости получение различной толщины диска в прокатанном колесе. Следовательно, для указанного выше режима прокатки колеса на КПС вертикального типа характерны повышенные (в сравнении с прокаткой колеса на КПС горизонтального типа) изгибающие нагрузки на концевые конусы наклонных валков. В то же время, как видно из рис. 7а, концевые конусы наклонных валков на КПС вертикального типа находятся практически за пределами посадочного места вала на валу. Кроме того, толщина стенки вала в зоне концевого конуса меньше, чем в наклонном валке для КПС горизонтального типа (см. рис. 7б), и более интенсивно снижается по направлению к переднему торцу вала.

На основании вышеизложенного можно за-

ключить, что для наклонного (эджерного) вала КПС вертикального типа наиболее вероятным местоположением опасного сечения является зона перехода внутренней поверхности вала с Ø210 мм в Ø255 мм.

Расчет напряженного состояния наклонных валков выполнили с учетом их посадки на валы, которая исключает любые перемещения по внутренней поверхности, имеющей длину 113 мм для вала КПС вертикального типа и 252 мм – для вала КПС горизонтального типа (см. рис. 7).

Как показали результаты расчета (рис. 8), для наклонного вала (после последней переточки) КПС горизонтального типа на стадии осадки обода по ширине (на которой, как было установлено выше, имеют место максимальные значения осевой силы и момента прокатки) имеет место прогиб вала, максимальная величина которого наблюдается в зоне начального конуса и достигает 0,0368 мм (см. рис. 8а). При этом максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу (σ_3) наблюдаются в зоне начального конуса наклонного вала (см. рис. 8б) и достигают 497 МПа.

Для производства наклонных валков КПС горизонтального типа часто применяют сталь 60ХН, имеющую предел прочности (σ_b) 680-720 МПа. Таким образом, коэффициент запаса статической прочности ($n_c = \frac{\sigma_b}{\sigma_3}$) в указанной

выше зоне вала находится в пределах 1,37-1,45, что существенно ниже 5-кратного запаса, принимаемого обычно при расчетах валков.

Напряженное состояние наклонного вала при максимальных, указанных выше, эксплуатационных нагрузках характеризуется неравномерностью (см. рис. 8в), которая выражается в локализации зоны концентрации повышенных напряжений в месте «по пережиму», где на данном этапе прокатки отсутствует контакт вала с заготовкой. В этой зоне, показанной на рис. 8в желтым цветом, величина средних главных напряжений достигает 20 МПа. Несмотря на то, что данная зона – зона концентрации растягивающих напряжений, величина последних незначительна.

На стадии раскатки обода по диаметру местоположение максимального прогиба вала смещается в зону сопряжения среднего и концевого конусов и достигает 0,036 мм (см. рис. 8г).

При этом максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу по-прежнему наблюдаются в зоне начального конуса наклонного вала (см. рис. 8д) и достигают 532 МПа.

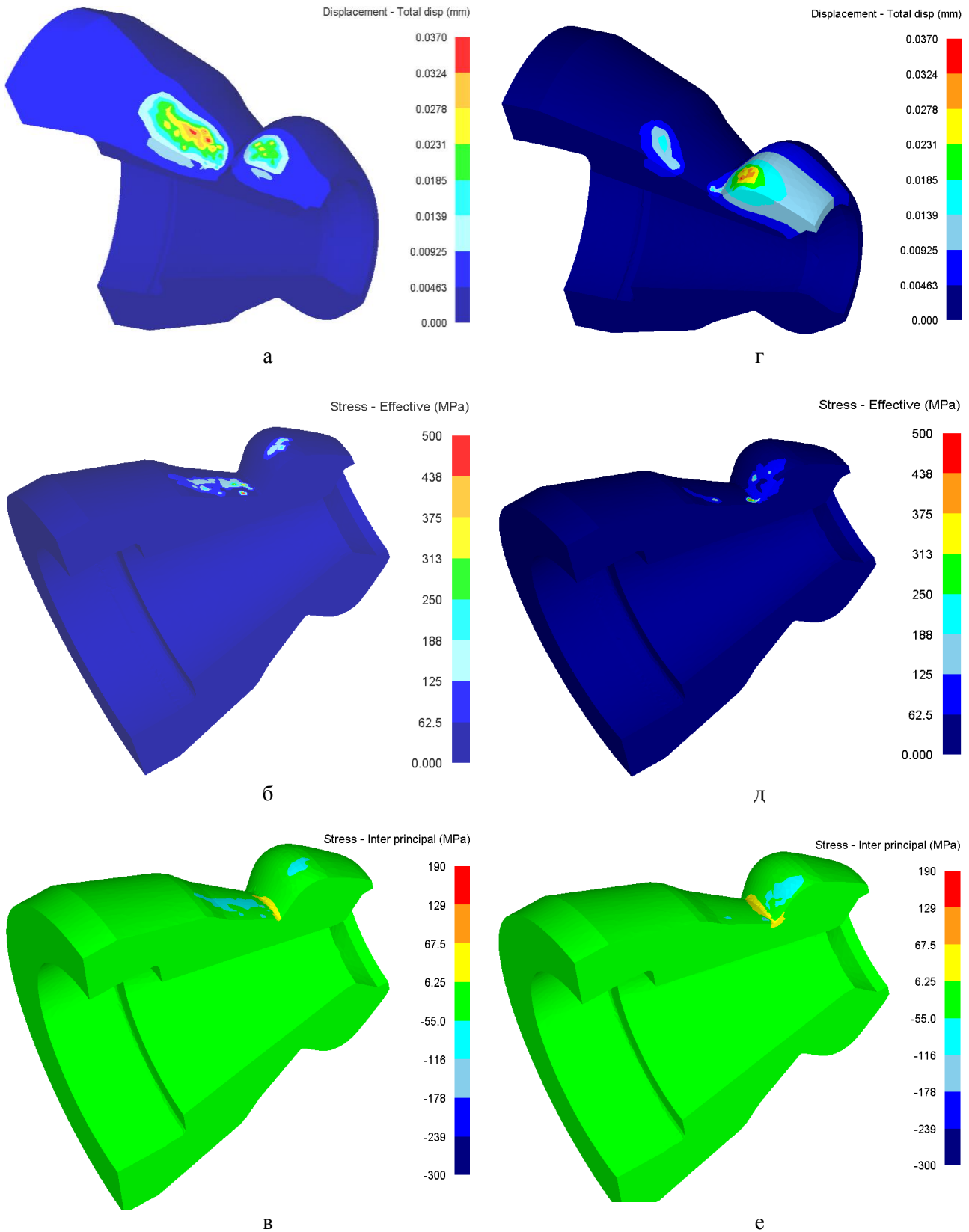


Рис. 8. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния наклонного вала КПС горизонтального типа на стадии осадки обода по ширине (слева) и раскатки обода по диаметру (справа):
a, c – величина прогиба; *б, д* – распределение эквивалентных напряжений по Мизесу;
в, е – распределение средних главных напряжений;
 Total disp (mm) – суммарное перемещение, мм;
 Stress-Effective (MPa) – эквивалентное напряжение, МПа;
 Stress-Inter principal (MPa) – среднее главное напряжение, МПа

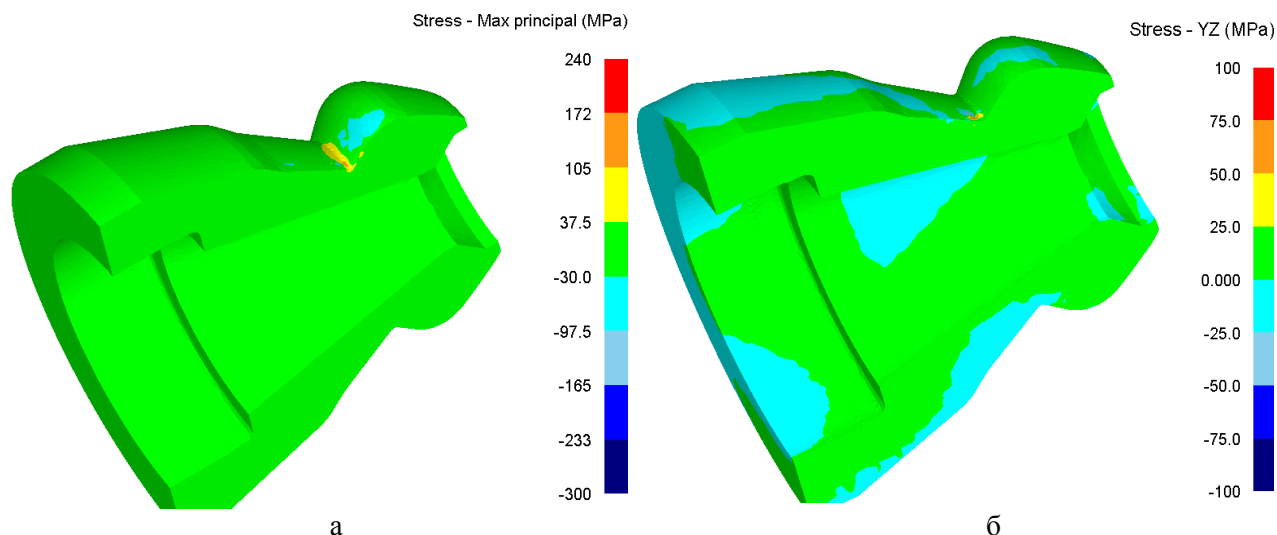


Рис. 9. Распределение напряжений в наклонном валке КПС горизонтального типа на стадии раскатки обода по диаметру:

а – максимальных главных; *б* – касательных;

Stress-Max principal (MPa) – максимальное главное напряжение, МПа;

Stress-YZ (MPa) – касательное напряжение, МПа

Напряженное состояние наклонного валка на данной стадии прокатки также неравномерно. Зона концентрации повышенных растягивающих напряжений также находится в месте «по пережиму» (см. рис. 8е). В этой зоне, показанной на рис. 8д желтым цветом, величина средних главных напряжений достигает 37 МПа. Хотя их величина и незначительно выше, чем на стадии осадки обода по ширине, но эта зона сосредоточена уже не только на поверхности (см. рис. 8е), а уходит вглубь валка на величину ~5 мм.

Таким образом, с позиций усталостной (циклической) прочности наиболее опасным местом наклонного валка на КПС горизонтального типа является его сечение, расположенное в месте «по пережиму». Расчетные величины действующих в этой зоне максимальных напряжений (рис. 9) равны:

главных напряжений –

$$\sigma_{max}=146 \text{ МПа}, \sigma_{min}=-0,14 \text{ МПа};$$

касательных напряжений (кручения) –

$$\tau_{max}=62 \text{ МПа}, \tau_{min}=-0,11 \text{ МПа}.$$

Как показали результаты моделирования для наклонного (эджерного) валка КПС вертикального типа (рис. 10), имеет место прогиб торцевой части конусового конца, максимальная величина которого в валке после последней переточки может достигать 0,56 мм. Прогиб приводит к локализации напряжений, которые рассмотрены ниже.

На внутренней поверхности эджерного валка Ø210 мм рядом с фаской, расположенной ближе к переднему торцу валка (см. рис. 10б), показана зона желтого цвета, в которой расчетная величина действующих эквивалентных напряжений по Мизесу (σ_3) достигает 1700 МПа. Указанная локализация эксплуатационных напряжений приведет к постепенному уменьшению размеров поперечного сечения вала в этом месте, образованию зазора между ним и валком и, соответственно, повышению изгибающих нагрузок в эджерном валке, что негативным образом отразится на запасе его прочности и выносливости.

Рассмотренная зона с позиций статической прочности является наиболее опасным местом эджерного валка. На практике эти валки изготавливают из стали 3Х3МЗФ (либо 5ХНМ) с пределом прочности $\sigma_6=1600$ МПа. Коэффициент запаса статической прочности ($n_c = \frac{\sigma_6}{\sigma_3}$) в указанной выше зоне валка находится в пределах 0,93-0,98, что существенно ниже 5-кратного запаса, принимаемого обычно при расчетах валков.

Напряженное состояние эджерных валков при максимальных, указанных выше, эксплуатационных нагрузках характеризуется существенной неравномерностью (см. рис. 10в). Для рабочих (контактных) поверхностей валков характерно наличие напряжений сжатия (до 200 МПа).

Со стороны внутренней поверхности валка также характерно наличие напряжений сжатия. Причем их максимальная величина (по абсолютному значению) достигает 400 МПа и имеет

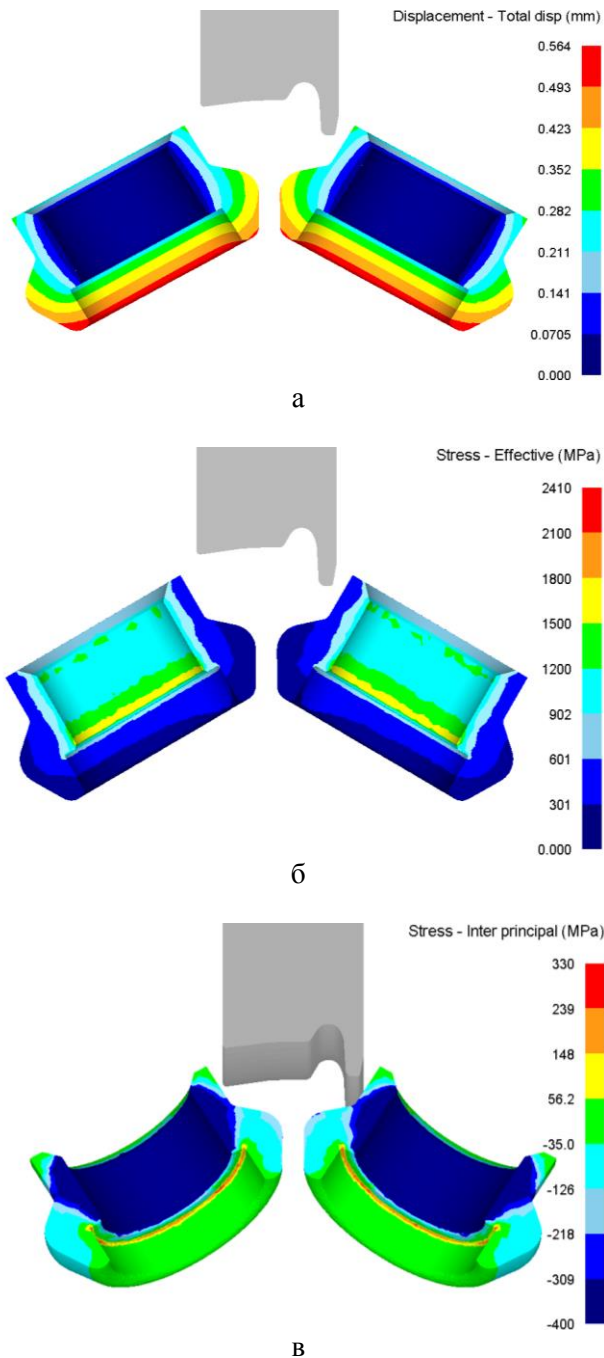


Рис. 10. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния наклонного вала КПС вертикального типа на стадии раскатки обода по диаметру: *a* – величина прогиба; *б* – распределение эквивалентных напряжений по Мизесу; *в* – распределение средних главных напряжений; Total disp (mm) – суммарное перемещение, мм; Stress-Effective (MPa) – эквивалентное напряжение, МПа; Stress-Inter principal (MPa) – среднее главное напряжение, МПа

место на посадочной поверхности вала на валу (см. рис. 10в). Минимальные величины напряжений (до 16 МПа) наблюдаются на внутренней поверхности вала, расположенной в зоне концевой конуса.

Анализ НДС эджерных валков на основной стадии прокатки показал, что в сечении вала, соответствующем переходу его внутренней поверхности с Ø210 мм в Ø255 мм (см. рис. 7а), имеет место зона повышенной концентрации напряжений, показанная на рис. 11 в красном цвете. Действующие в этой зоне средние главные напряжения – растягивающие. Их величина достигает 320 МПа.

Таким образом, с позиций усталостной (циклической) прочности наиболее опасным местом эджерного вала является его сечение, расположенное на внутренней поверхности вала в зоне перехода Ø210 мм в Ø255 мм. Расчетные величины действующих в этой зоне максимальных напряжений (см. рис. 11) равны:

главных напряжений –

$$\sigma_{max} = 1210 \text{ МПа}, \sigma_{min} = 915 \text{ МПа};$$

касательных напряжений (кручения) –

$$\tau_{max} = -216 \text{ МПа}, \tau_{min} = -431 \text{ МПа}.$$

Таким образом, конечно-элементное моделирование дает расширенное представление о НДС инструмента деформации при действии эксплуатационных нагрузок. Такой подход позволяет учесть неравномерность НДС и концентрацию напряжений в характерных зонах вала и, соответственно, получить более достоверную информацию о коэффициентах запаса прочности вала в опасных сечениях.

Для оценки усталостной прочности (выносливости) валков в определенных выше опасных сечениях использовали методику расчета, приведенную в работе [17].

При совместном действии кручения и изгиба коэффициент запаса усталостной (циклической) прочности вала (n_u) определяли по следующей формуле [17]:

$$n_u = \frac{R_\sigma \cdot R_\tau}{\sqrt{R_\sigma^2 + R_\tau^2}}, \quad (1)$$

где R_σ и R_τ – частные коэффициенты запаса усталостной прочности, соответственно, по нормальным напряжениям при изгибе и касательным при кручении.

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\left(\frac{K_\sigma}{\beta_{nov} \cdot \varepsilon_\sigma} \sigma_a + \psi_\sigma \cdot \sigma_m \right)}, \quad (2)$$

$$R_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\left(\frac{K_{\tau}}{\beta_{нов} \cdot \epsilon_{\tau}} \tau_a + \psi_{\tau} \cdot \tau_m \right)}, \quad (3)$$

где σ_a и τ_a – амплитуда цикла напряжений при изгибе и кручении, МПа; σ_m и τ_m – средние напряжения цикла при изгибе и кручении, МПа; ϵ_{σ} и ϵ_{τ} – масштабные факторы при изгибе и кручении, учитывающие влияние размеров сечения валков; K_{σ} и K_{τ} – эффективные коэффициенты концентрации напряжений при изгибе и кручении; ψ_{σ} и ψ_{τ} – коэффициенты, характеризующие чувствительность материала к асимметрии цикла напряжений; $\beta_{нов}$ – коэффициент качества обработки поверхности; σ_1 и τ_1 – пределы выносливости, соответственно, при изгибе и кручении с симметричным циклом напряжений для гладких образцов.

Значения ψ_{σ} и ψ_{τ} в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [17], принимали для легированных сталей соответственно 0,22 и 0,13.

Величины σ_1 и τ_1 определяли из следующих соотношений [17]:

$$\sigma_1 = 0,5\sigma_s, \tau_1 = 0,6\sigma_1, \quad (4)$$

Значение коэффициента $\beta_{нов}$ при расчетах составляло 0,9.

Значения масштабных факторов и эффективных коэффициентов концентрации напряжений в соответствии с рекомендациями работы [17] были равны:

для валка КПС горизонтального типа – $\epsilon_{\sigma}=0,55, \epsilon_{\tau}=0,51, K_{\sigma}=2,25, K_{\tau}=2,3;$

для валка КПС вертикального типа – $\epsilon_{\sigma}=0,55, \epsilon_{\tau}=0,51, K_{\sigma}=2,5, K_{\tau}=2,6.$

Величины амплитуд цикла и средних напряжений цикла были определены на основе вышеприведенных результатов конечно-элементного моделирования по следующим формулам:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (5)$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2}, \tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2}.$$

Рассчитанные по формулам (1)-(3) коэффициенты запаса усталостной прочности равны:

для валка КПС горизонтального типа –

$$R_{\sigma} = 1,01; R_{\tau} = 1,32; n_y = 0,8;$$

для валка КПС вертикального типа –

$$R_{\sigma} = 0,82; R_{\tau} = 0,85; n_y = 0,6.$$

Таким образом, при максимальной переточке наклонных (эджерных) валков и максимальных эксплуатационных нагрузках коэффициенты запаса усталостной прочности валков получены ниже допустимых значений (1,3-2,5 [17]). Вместе с тем на практике могут иметь место перегрузки, связанные с пониженной температурой заготовок, разогревом поверхности валков, образованием зазора между валом и валком и биением заготовки в стане (например, при ее асимметричности), которые приведут к поломке валков.

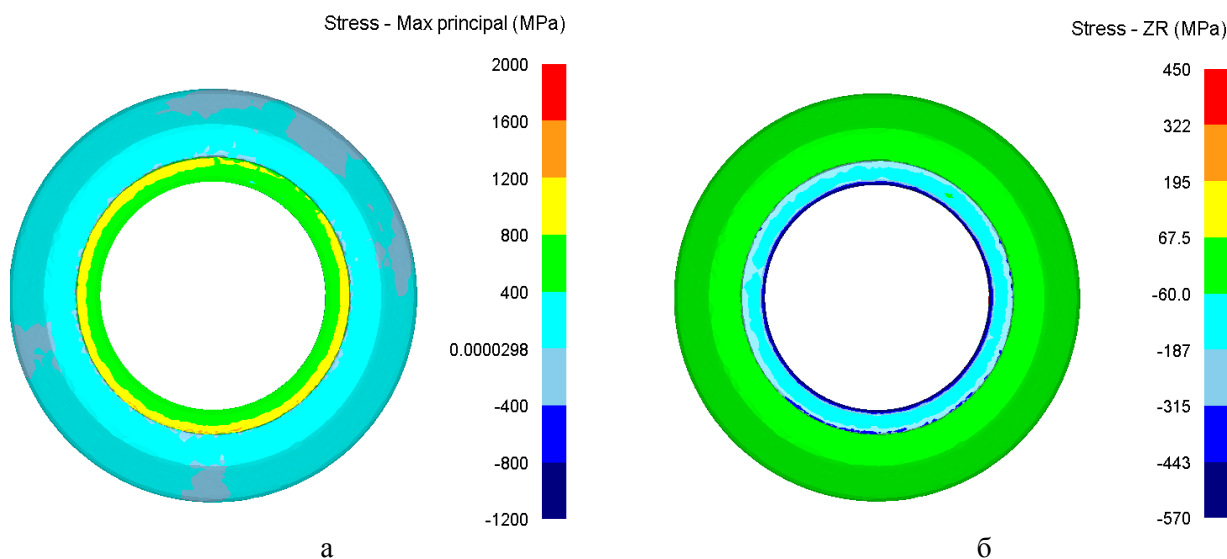


Рис. 11. Распределение напряжений в эджерном валке КПС вертикального типа на стадии раскатки обода по диаметру: а – максимальных главных; б – касательных; Stress - Max principal (MPa) – максимальное главное напряжение, МПа; Stress - ZR (MPa) – касательное напряжение, МПа

Выводы

На основе результатов конечно-элементного моделирования процесса прокатки железнодорожных колес, а также анализа данных, полученных в условиях промышленного производства колес с плоскоконическим диском Ø957 мм на КПС горизонтального и вертикального типов, исследована взаимосвязь режимов прокатки с силовыми нагрузками, напряженным состоянием и коэффициентами запаса прочности наклонных (эджерных) валков.

На основе анализа данных, полученных в условиях промышленного производства колес, установлено, что вид функции скорости роста внутреннего диаметра колеса ($V_{вн}$) аналогичен виду функции скорости роста радиальной силы, создаваемой нажимными валками. Причем на основной стадии прокатки (раскатка обода по диаметру) функция приращения внутреннего диаметра обода близка к линейной, а, соответственно, $V_{вн} = const$. При этом расчетным путем показано, что если $V_{вн} = const$, то осевая и радиальная составляющие силы прокатки на наклонных валках также сохраняют постоянные значения. Это позволяет однозначно определить взаимосвязь режима прокатки с силовыми нагрузками на валках, а также упрощает процесс автоматизации процесса прокатки.

Установлено, что наиболее неблагоприятная схема нагружения и, соответственно, напряженного состояния валков имеет место на основной стадии прокатки, которая характеризуется наиболее высокими значениями $V_{вн}$. При этом, чем выше $V_{вн}$, тем выше радиальная составляющая силы прокатки на средних конусах наклонных (эджерных) валков и, как следствие, больше величины прогибов наклонных валков и ниже запас их прочности и выносливости.

Как показали расчеты, при максимальной переточке наклонных (эджерных) валков и максимальных эксплуатационных нагрузках коэффициенты запаса статической и усталостной прочности валков получены значительно ниже допустимых значений. Поэтому при работе на переточенных валках, для предупреждения их поломки, на основной, наиболее продолжительной, стадии прокатки скорость роста внутреннего диаметра обода колеса целесообразно назначать не более 4-5 мм/с – для КПС вертикального типа и не более 10-11 мм/с – для КПС горизонтального типа.

В ряде случаев снизить нагрузки на эджерные валки КПС вертикального типа можно путем изменения их геометрических параметров, например, за счет уменьшения длины конической части валка.

Также установлено, что режим прокатки, характеризующийся значительной раскаткой по внутреннему диаметру обода (более 100 мм), является нежелательным, так как это приведет либо к увеличению цикла прокатки, либо к повышенному значению $V_{вн}$ на основной стадии прокатки, а, следовательно, – повышению эксплуатационных нагрузок на наклонные валки как на КПС горизонтального типа, так и на КПС вертикального типа.

Длительная раскатка по диаметру, с одной стороны, рациональна, так как приводит к меньшей неравномерности деформации обода в течение одного оборота колеса, а с другой – нежелательна, так как приводит к увеличению цикла прокатки, что имеет место на КПС вертикального типа. Поэтому рациональным для КПС горизонтального и вертикального типов является вариант уменьшения величины раскатки обода по внутреннему диаметру (например, для колес с плоскоконическим диском Ø957 мм на величину 40-50 мм) за счет увеличения диаметра обода штампуемой колесной заготовки и использования схем штамповки, предусматривающих разгонку центральной части заготовки перед ее формовкой в штампах. В этом случае сила штамповки на формовочном прессе не превысит допустимую величину, а цикл прокатки на КПС не увеличится.

Список литературы

1. Шифрин, М.Ю. Резервы производительности и выхода годного при прокатке колес. – М.: Металлургия, 1989. – 144 с.
2. Производство железнодорожных колес / Г.А. Бибик, А.М. Иоффе, А.В. Праздников и др. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
3. О деформированном состоянии металла обода колеса при прокатке на колесопрокатном стане / И.Г. Узлов, Ю.В. Андреев, Г.А. Блажнов и др. // Производство железнодорожных рельсов и колес: Отрасл. сб. научн. тр. – Харьков: УкрНИИМЕТ, 1976. – С. 85-88.
4. Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния обода железнодорожного колеса в процессе его осадки / Г.Н. Башилов, Б.М. Беккер, Ю.Д. Макаров, Б.Н. Поляков // Повышение качества железнодорожных рельсов и колес: Отрасл. сб. научн. тр. – Харьков: УкрНИИМЕТ, 1987. – С. 37-42.
5. Снитко, С.А. Влияние режима осевого обжатия на разнотолщинность обода колесной заготовки на начальной стадии ее прокатки / С.А. Снитко, А.В. Яковченко // Металлург. –

2017. – № 5. – С. 46-51.
6. Xiao-hui, Shen. Experiment and Simulation of Metal Flow in Multi-stage Forming Process of Railway Wheel / Shen Xiao-hui, Chen Wei, Yan Jun [et al.] // Int. J. of Iron and Steel Research. – 2015. – Vol. 22, Iss. 1. – P. 21-29.
 7. Копперс, У. Производство железнодорожных колес на высоком техническом уровне / У. Копперс, М. Кунц, М. Линденблатт // Черные металлы. – 2006. – № 3. – С. 75-79.
 8. Новый способ и рациональные режимы прокатки колес / А.В. Кушнарев [и др.] // Сталь. – 2010. – № 3. – С. 58-62.
 9. Xiaohui, Shen. Analysis of railway wheel rolling process based on three-dimensional simulation / Shen Xiaohui, Yan Jun, An Tao [et al.] // The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 72, Iss. 1. – P. 179-191.
 10. Яковченко, А.В. Проектирование профилей и калибровок железнодорожных колес / А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, Р.А. Голышков // Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2008. – 491 с.
 11. Снитко, С.А. Теоретические основы автоматизированного проектирования сборочных чертежей валков колесопрокатных стансов вертикального типа / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – № 3(37). – С. 45-50.
 12. Прокатка на блюминге / И.Я. Тарновский, Е.В. Пальмов, В.А. Тягунов и др. – Москва: Metallurgizdat, 1963. – 390 с.
 13. Целиков, А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.И. Гришков. – Москва: Metallurgiya, 1970. – 360 с.
 14. Журавлев, Э.Ю. Конечно-элементный анализ наклонного вала колесопрокатного стана / Э.Ю. Журавлев, О.М. Огородникова // Вестник машиностроения. – 2008. – № 9. – С. 3-6.
 15. Snitko, S. Features Finite-Element Modeling of the Deformation Exact Mass / S. Snitko, A. Duzhurzhi // J. of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2012. – Vol. 9. No. 9.– P. 1505-1510.
 16. Снитко, С.А. Анализ силовых и скоростных параметров прокатки колес // Зб. наук. пр. ДонНТУ. Сер. Metallurgiya. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – Вип. 10 (141). – С. 163–172.
 17. Фастыковский, А.Р. Конструкции и расчеты оборудования прокатных клетей сортовых и листовых стансов: учеб. пособие; Сибирский гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2008. – 316 с.

S.A. Snitko /Cand.Sci. (Eng.)/, A.V. Yakovchenko /Dr.Sci. (Eng.)/, A.L. Sotnikov /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE RELATIONSHIP OF ROLLING MODES WITH LOADS AND SAFETY MARGIN OF EDGING ROLLS IN HORIZONTAL AND VERTICAL WHEEL-ROLLING MILLS

Background. The processes of railway wheels rolling are characterized by significant operational loads on the working bodies of wheel-rolling mills. These loads are alternating and uneven, which is associated with a significant unsteadiness of the rolling process. This determines the importance of establishing the relationship of rolling modes with loads and the stress-strain state of the rolls and the urgency of solving scientific and technical problems of increasing the service life of work rolls of wheel-rolling mills by improving modes of rolling.

Materials and/or methods. The objective of this paper is to minimize operational loads and increase the safety margin of edging rolls in wheel-rolling mills of horizontal and vertical types due to the implementation of rational modes of rolling of wheel billets, obtained on molding presses.

Results. The results obtained of finite-element modeling of stress-strain state of the edging rolls in wheel-rolling mills of the horizontal type under rim compression by width and the results of modeling the stress-strain state of the edging rolls in horizontal and vertical wheel-rolling mills at the stage of rim rolling by diameter. The unevenness of the stress-strain state and the concentration of stresses in specific areas of the roll considered and, therefore, more reliable information about the safety factor of the roll in dangerous cross sections obtained.

Conclusion. For wheel-rolling mills of horizontal and vertical types, the relationship of rolling modes with power loads, the stress state and the safety factor of edging rolls studied. Established that rational is the option of reducing the value of rolling the rim by inner diameter (e.g., for wheels with flat conical disk Ø957 mm – by 40-50 mm) due to the increase of the diameter of the wheel rim billet and the use of stamping schemes providing a spreading of the central part of the billet before forming in dies.

Keywords: horizontal and vertical wheel-rolling mills, modes of rolling, power loads, stress-strain state and safety margin of edging rolls.

Сведения об авторах

С.А. Снитко

SPIN-код: 8463-3786

Author ID: 844696

Телефон: +380 (50) 473-14-52

Эл. почта: snitko_sa@mail.ru

А.Л. Сотников

SPIN-код: 5203-7480

Author ID: 623331

Телефон: +380 (66) 029-44-30

Эл. почта: 0713019870@mail.ru

А.В. Яковченко

SPIN-код: 1314-1795

Author ID: 850425

Телефон: +380 (50) 995-10-47

Эл. почта: mond1991@mail.ru

Статья поступила 23.11.2017 г.

© С.А. Снитко, А.В. Яковченко, А.Л. Сотников, 2017

Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

