

1. Методика конечно-элементного моделирования напряженно деформированного состояния металла при штамповке колёсных заготовок

Актуальным для современной теории колесопрокатного производства является создание методов проектирования технологии деформирования точных по массе (отличие заготовок по массе до 1%) заготовок колес, которые бы обеспечивали высокую точность прогноза формоизменения металла и силовых параметров процессов штамповки и прокатки заготовок. Решение данной проблемы требует изменения постановки соответствующих краевых задач и способов их реализации в соответствии с техническими и технологическими особенностями производства колес на конкретной прессопрокатной линии.

Постановка задачи моделирования. В настоящей работе выполнена постановка задачи моделирования многопереходного процесса деформирования заготовок колес с последующей ее реализацией в системе DEFORM 3D.

Моделирование выполнено для нестационарного теплового режима заготовки, то есть с учетом процессов теплообмена обрабатываемого металла с окружающей средой, как при деформации, так и во время междеформационных пауз, а также с учетом теплового эффекта пластической деформации. Процесс теплообмена при этом описывался зависимостью следующего вида:

$$q = A \alpha (t_s - t_c), \quad (1)$$

где q – тепловой поток;

A – площадь поверхности, на которой происходит теплообмен;

α – коэффициент теплообмена;

t_s, t_c – температура поверхности тела и окружающей среды соответственно.

Была принята постоянная температура окружающей среды и значение коэффициента α . В этом случае для расчета процесса теплопередачи при транспортировке заготовки за счет излучения и вынужденной конвекции применимо граничное условие третьего рода [4], которое и использовали при моделировании.

В данной работе рассмотрена технология изготовления заготовок черновых колес $\varnothing 957$ мм. Данные колеса изготавливают из колесной стали марки 2 (ГОСТ 10791–2011). Используемые при моделировании теплофизические свойства колесной стали были взяты из базы данных DEFORM 3D для высокоуглеродистой стали.

При моделировании для заготовки использовали жесткопластическую модель материала. Для моделирования прессового инструмента и прокатных валков была выбрана жесткая недеформируемая модель материала.

Соответствующие реологические кривые (рис. 1.1) в исследуемом диапазоне температур (1000 – 1260°C), необходимые для реализации процесса моделирования, были построены на основе процентного содержания элементов в стали.

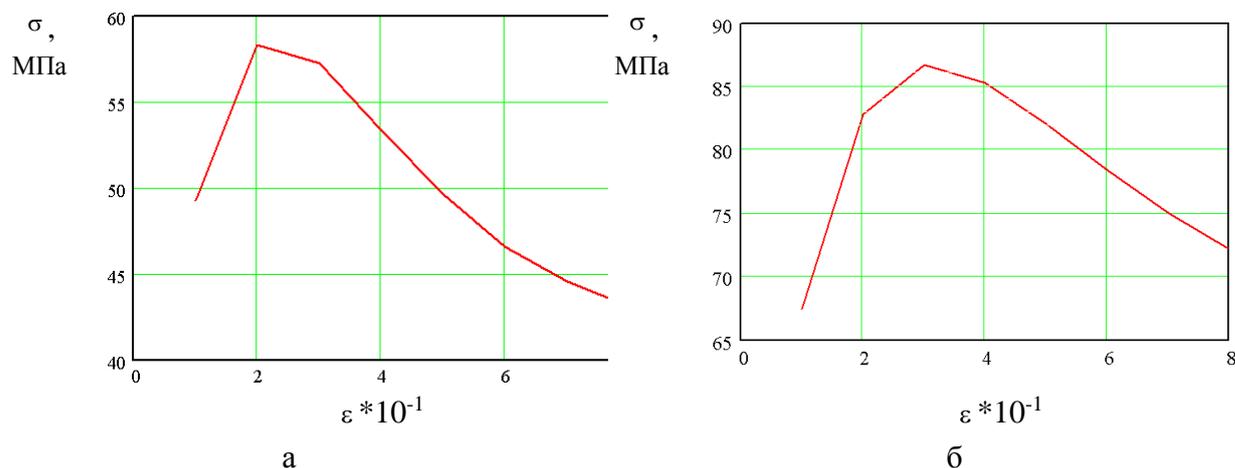


Рис. 1.1 – Кривые течения колесной стали марки 2 при температуре 1200°C: а – при $\dot{\varepsilon} = 0,5\text{c}^{-1}$; б – при $\dot{\varepsilon} = 10\text{c}^{-1}$.

В качестве модели контактного трения принята сдвиговая модель трения:

$$\tau_{mp} = m * k, \quad (2)$$

где τ_{mp} – напряжение трения; m – фактор трения; k – предел текучести материала заготовки на сдвиг.

При моделировании был использован автоматический режим генерации конечно-элементной сетки. При этом достаточно корректно учитывалось условие непроницаемости металла заготовки сквозь стенки инструмента. Использовалась конечно-элементная сетка с четырехузловыми тетраэдрами, которая позволила достаточно корректно описать сложную геометрию заготовки (рис. 1.2).

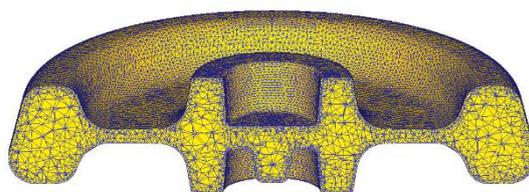


Рис. 1.2 – Конечно-элементная модель заготовки железнодорожного колеса (заготовка после формовочного пресса силой 100 МН).

Основываясь на вышеизложенном, было произведено математическое моделирование процессов осадки, разгонки, формовки в штампах и прокатки заготовок колес $\varnothing 957$ мм по существующей на ОАО «ВМЗ» технологии [1]. Исходные данные для моделирования задавались на основе фактической экспериментальной информации по деформационным, силовым и скоростным параметрам штамповки и прокатки вышеуказанных заготовок черновых колес $\varnothing 957$ мм, полученной в условиях их промышленного производства на прессопрокатной линии ОАО «ВМЗ» [5, 6].

Таким образом, выполнена постановка задачи конечно-элементного моделирования процессов осадки, разгонки и формовки в штампах заготовок колес применительно к условиям прессопрокатных линий ОАО «Интерпайп – НТЗ» и ОАО «ВМЗ».

Разработанные и реализованные в DEFORM 3D математические модели также были использованы для оценки эффективности новых технологических режимов и способов деформирования, а также при создании аналитических зависимостей для оперативного расчета параметров формоизменения металла и сил при штамповке и прокатке заготовок колес.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ КОЛЁСНЫХ ЗАГОТОВОК НА ОСАДОЧНОМ ПРЕССЕ СИЛОЙ 20 МН

Предварительная осадка на прессе силой 20 МН производится с целью уменьшения высоты и увеличения площади поперечного сечения заготовок. Осадку применяют для улучшения структуры и механических свойств металла заготовок, а также для уменьшения неравномерности свойств в осевом и радиальном направлениях.

В процессе осадки удаляется окалина с боковых поверхностей заготовок, а также оставшаяся после гидросбива окалина с торцевых поверхностей. Пресс силой 20 МН – гидравлический вертикальный четырехколонный с архитравом и установленной на фундаменте станиной. Между станиной и архитравом расположена траверса, которая перемещается по колоннам пресса. На станину пресса и опору установлена плита, по направляющим которой перемещается стол пресса. Плита с одной стороны упирается в зуб станины, а с другой подпирается двумя гидроцилиндрами, находящимися под постоянным давлением.

Опускание траверсы осуществляется плунжером рабочего цилиндра, подъем траверсы – двумя подъемными цилиндрами, размещенными в приливах архитрава. К траверсе и столу крепятся осадочные плиты.

После осадки заготовка убирается манипулятором из рабочей зоны пресса силой 20 МН. Для предупреждения разогрева и уменьшения износа обжимные плиты после удаления заготовки охлаждаются водой. Окалина с нижней плиты также удаляется водой.

Результаты моделирования. На первом этапе исследований было выполнено моделирование процесса остывания заготовки на воздухе при ее транспортировке (время транспортировки – 25с) по рольгангу от печи к осадочному прессу силой 20 МН. Распределение температур в заготовке после ее транспортировки и выдержки (время выдержки – 5с) на нижней плите пресса 20МН представлено на рис. 2.1. Средняя температура металла на поверхности заготовки перед осадкой составляет 1260 – 1280°С. Свободную осадку заготовки производят до высоты 118–120 мм. Результаты моделирования процесса осадки заготовки, представлены на рис. 2.2. Полученное значение силы осадки (24,9МН) является для данного пресса максимально возможным. Его достигают при давлении рабочей жидкости 31,4МН/м² [4].

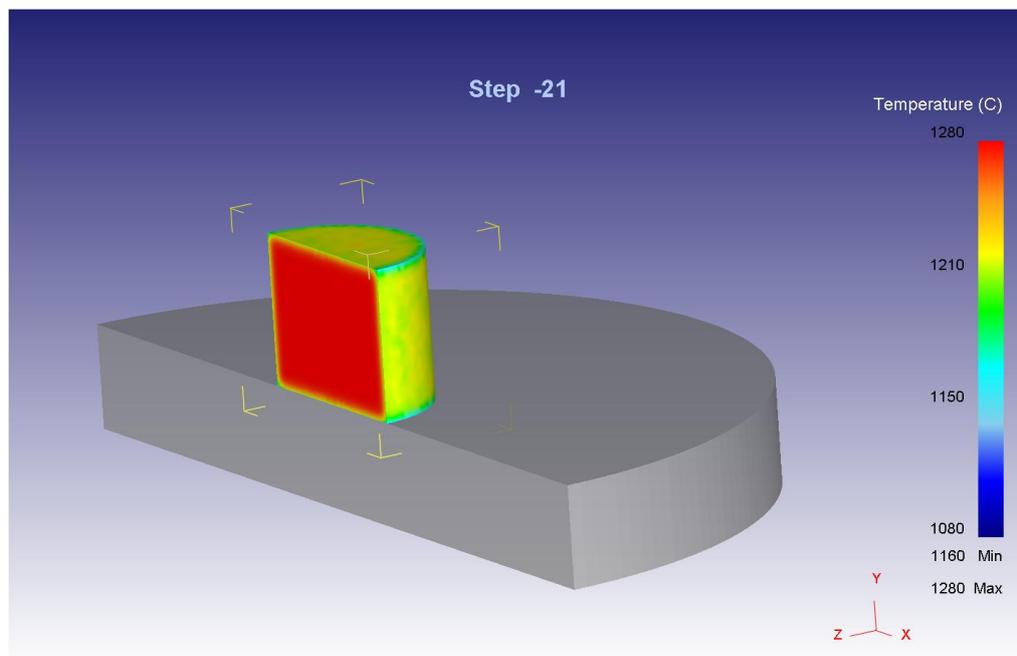


Рис. 2.1 – Заготовка после транспортировки и выдержки на нижней плите

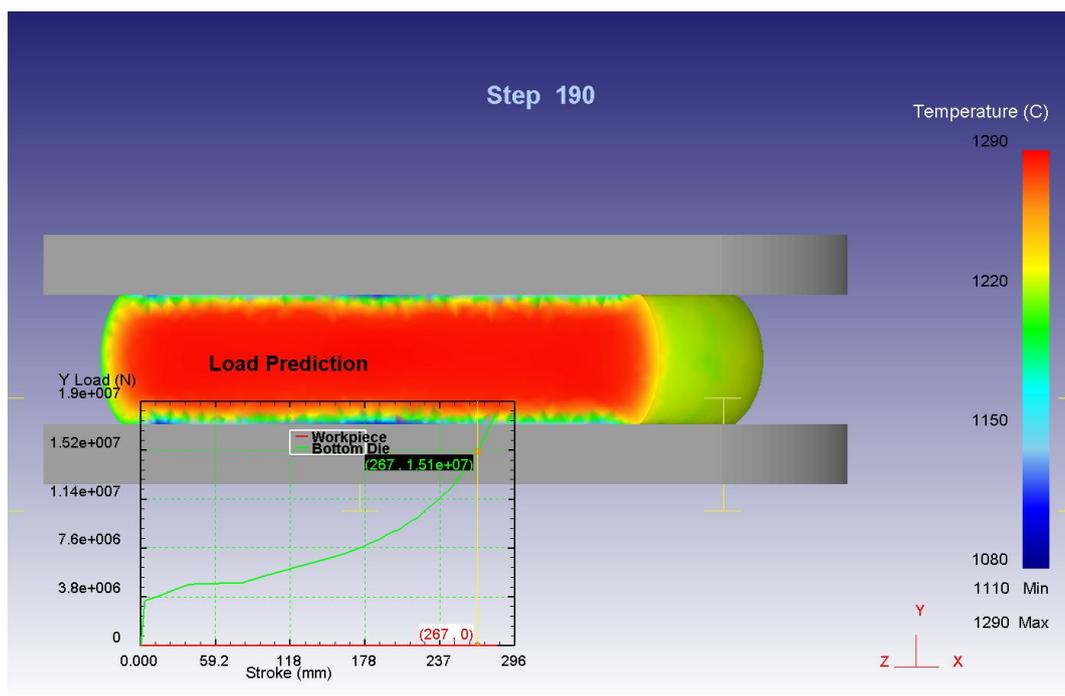


Рис. 2.2 – Заготовка после осадки на прессе силой 20МН

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕНТРОВКИ И РАЗГОНКИ ЗАГОТОВОК НА ЗАГОТОВОЧНОМ ПРЕССЕ СИЛОЙ 50 МН

По рольгангу заготовка подается к кантователю, установленному перед прессом силой 50 МН, и кантуется на 180°. Для более полного удаления вторичной окалины торцевые поверхности заготовки перед кантователем и после него подвергаются очистке металлическими щетками, после чего заготовка по рольгангу подается к прессу силой 50 МН.

Операции деформации на прессе силой 50 МН производятся с целью регламентированного распределения металла между периферийной и центральной частями заготовки.

Пресс силой 50 МН – гидравлический вертикальный четырехколонный состоит из неподвижных поперечин – станины и архитрава, соединенных между собой колоннами.

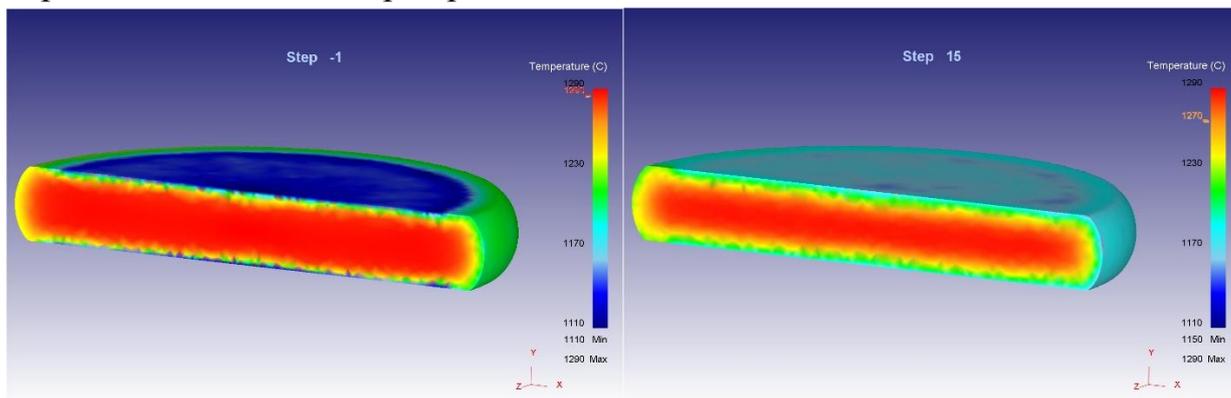
В нижней части станины установлен выталкиватель с гидравлическим приводом. Пресс снабжен центрователем технологического кольца, состоящим из подъемного механизма с гидравлическим приводом и обоймой. Нижний плитодержатель своим хвостовиком устанавливается в расточку квадратной плиты, перемещающейся с помощью четырех регулировочных клиньев. Нижняя и верхняя осадочные плиты устанавливаются в плитодержателях.

На прессе силой 50 МН в верхний плитодержатель устанавливается конусная плита. Заготовку после ее предварительной осадки на прессе силой 20 МН укладывают на стол пресса силой 50 МН и центруют технологическим кольцом. Осадку и разгонку заготовок выполняют за одну операцию. Причем, если разгонка осуществляется не на всю высоту клина, то дополнительной осадки заготовки не происходит. Преимущество такой технологии связано с исключением операции разгонки заготовок пуансоном и соответственно с уменьшением цикла на прессе силой 50 МН. Для ее реализации необходимы точные по массе заготовки с разновесом не более ± 5 кг. Это связано с тем, что в процессе предварительной осадки исходных заготовок на прессе силой 20 МН требуется получить достаточно стабильный диаметр, обеспечивающий, как указано выше, их центровку технологическим кольцом пресса силой 50 МН.

В технологическом кольце заготовка должна обжиматься осесимметрично с получением равномерного отпечатка по всей боковой поверхности заготовки.

После деформации окалина с заготовки удаляется воздухом, а с инструмента – водой во время его охлаждения.

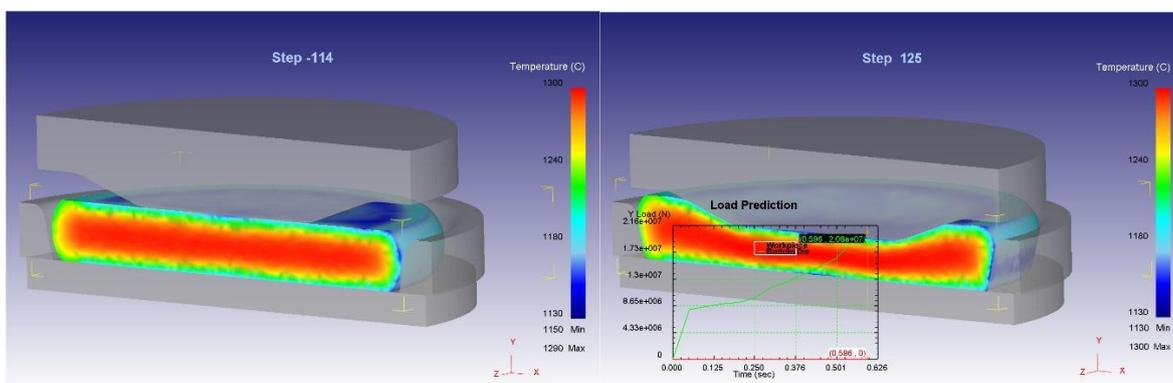
Результаты моделирования. После свободной осадки заготовка подается на пресс 50 МН (время транспортировки – 10 с) для разгонки в технологическом кольце. Перед прессом 50 МН заготовку кантуют на 180° для выравнивания температуры с верхней и нижней сторон заготовки. На рисунке 3.1 а,б представлено распределение температуры в заготовке до и после ее транспортировки к прессу 50 МН и выдержке заготовки (время выдержки – 5с) на нижней обжимной плите прессы. Средняя температура металла на поверхности заготовки перед разгонкой составляет 1250 – 1270°С.



а

б

Рис. 3.1– Заготовка до (а) и после транспортировки и выдержки на нижней плите (б)



а

б

Рис. 3.2 – Заготовка до (а) и после разгонки (б) на прессе силой 50МН.

После укладки заготовки на обжимную плиту выполняют центровку технологического кольца по оси прессы и выполняют опускание траверсы прессы до вхождения в контакт конусной плиты с заготовкой. Результаты моделирования процесса до и после разгонки заготовки на прессе силой 50 МН представлены на рис. 3.2 а,б.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ФОРМОВКИ ЗАГОТОВКИ НА ФОРМОВОЧНОМ ПРЕССЕ СИЛОЙ 100 МН

С пресса силой 50 МН заготовка убирающим переключателем перемещается на отводящий рольганг и транспортируется к формовочному прессу силой 100 МН. При этом она подвергается очистки от окалины металлическими щётками.

Деформация заготовки на прессе силой 100 МН производится с целью получения отформованной заготовки с окончательными размерами ступицы и прилегающей к ней части диска, а также подготовки обода и прилегающей к нему части диска для последующей прокатки на колесопркатном стане.

Величина деформации заготовки на прессе обеспечивается системой автоматического управления траверсой пресса. Заданную величину толщины диска контролируют по метке на дисковом указателе хода траверсы. Также должны быть обеспечены чёткое оформление торцевых поверхностей ступицы и равномерный отпечаток формовочного кольца по всей окружности наружной поверхности обода.

После подъёма траверсы осуществляется удаление отформованной заготовки из верхнего и нижнего штампов выталкивателями и удержание её в поднятом состоянии до момента захвата заготовки клещами переключателя.

Результаты моделирования. После операции разгонки заготовка подается (время транспортировки – 20 с) на формовочный пресс силой 100 МН. На рис. 4.1а представлено распределение температуры в заготовке после ее транспортировки к прессу 100 МН и выдержки на нижнем штампе (время выдержки – 8,5 с). Результаты моделирования процесса формовки заготовки на прессе силой 100 МН представлены на рис. 4.1б.

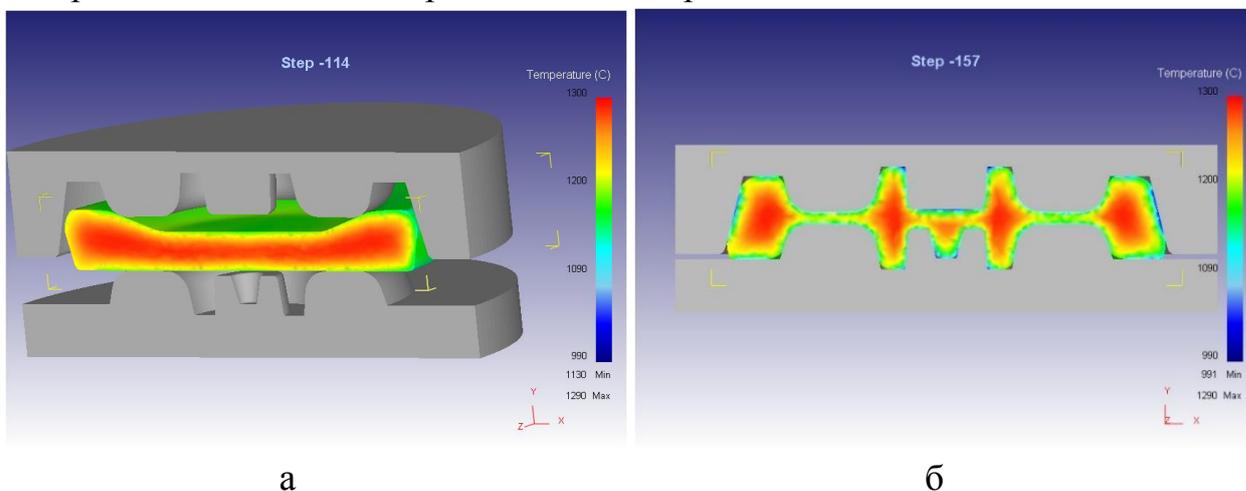


Рис. 4.1 – Заготовка после транспортировки, выдержки на нижнем штампе (а) и формовки на прессе силой 100МН (б).

Невысокое значение силы формовки объясняется тем, что при моделировании величина разгонки заготовки на прессе 50 МН обеспечила с одной стороны выполнение ступицы (см. рис. 4б), а с другой – исключение перетекания металла из центральной полости формовочных штампов в периферийную. Естественно, что на практике так точно подобрать величину разгонки не удастся, в том числе по причине разновеса заготовок. Поэтому в реальных условиях промышленного производства сила формовки с учетом потерь может достигать 90 МН по причине преждевременного заполнения центральной полости штампов в зоне ступицы и изменения направления течения металла в зоне диска на одностороннее. За счет этого избегают получения неисправимого вида брака, «невыполнение ступицы», при допустимой на прессе силе штамповки.

Из рис. 4б видно, что периферийная полость штампов, формирующая верхний торец обода под прокатку, заполняется металлом не полностью и неравномерно. Такая картина формоизменения металла хорошо согласуется, причем не только качественно, но и количественно, с экспериментально установленными закономерностями формоизменения металла в формовочных штампах авторами работ [8 – 10].

ВЫВОДЫ

Таким образом, выполнена постановка и реализация задачи конечно-элементного моделирования процессов осадки, разгонки и формовки заготовок колес применительно к условиям прессопрокатных линий ПАО «ВМЗ». Полученные в системе DEFORM 3D результаты моделирования в целом правильно отражают основные закономерности анализируемых процессов, установленные в условиях промышленного производства колес.

Разработанные и реализованные в DEFORM 3D математические модели также были использованы для оценки эффективности новых технологических режимов и способов деформирования, а также при создании аналитических зависимостей для оперативного расчета параметров формоизменения металла и сил при штамповке и прокатке заготовок колес.

На прессе силой 50 МН осадка и разгонка заготовки выполняется одновременно за один ход траверсы прессы. Но предварительно центрует технологическое кольцо вместе с поданной на стол заготовкой. Для реализации этого процесса необходимы точные по массе заготовки с разновесом не более ± 5 кг. Это связано с тем, что в процессе предварительной осадки исходных заготовок на прессе силой 20 МН требуется получить достаточно стабильный диаметр, обеспечивающий их центровку технологическим кольцом прессы силой 50 МН.

Полученные при моделировании значения сил штамповки, температур заготовок и параметров их формоизменения хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в условиях промышленного производства колес $\varnothing 957$ мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Яковченко, А.В. Проектирование профилей и калибровок железнодорожных колес : монография / А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, Р.А. Голышков. - Донецк: ДонНТУ, 2008. – 491с.
2. Яковченко А.В., Снитко С.А., Ивлева Н.И. Пути совершенствования компьютерных программ проектирования калибровок инструмента деформации для производства штампованно-катаных железнодорожных колес // *Металл и литье Украины*. - 2003. - № 6. - С. 30-35.
3. Компьютерное проектирование калибров и построение чертежей наклонных, нажимных и главных валков колесопрокатных станков / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, Собхи Хасан, Н.И. Ивлева // *Металл и литье Украины*. - 2005. - № 1-2. - С. 26-30.
4. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.: ил.
5. Яковченко А.В. Экспериментальные исследования силовых параметров и совершенствование процессов штамповки колесных заготовок / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, Собхи Хасан // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр.* – Краматорськ, 2006. – С. 302 – 306.
6. Снитко С.А. Анализ силовых и скоростных параметров прокатки колес / С.А. Снитко // *Наукові праці ДонНТУ. Металургія: Зб. наук. пр.* – Донецьк, 2008. – Вип. 10 (141). – С. 163 – 172.
7. Производство железнодорожных колес / Г.А. Бибик, А.М. Иоффе, А.В. Праздников и др. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.: ил.
8. Прогнозирование и способ устранения образования зажимов при формовке колесных заготовок / Б.Г. Каплунов, В.Н. Крашевич, М.И. Староселецкий, А.В. Белущенко // *Изв. вузов Черная металлургия*. – 1991. – № 1. – С. 55–56.
9. Шифрин М.Ю. Резервы производительности и выхода годного при прокатке колес / М.Ю. Шифрин. – М.: Металлургия, 1989. – 144 с.: ил.
10. Шифрин М.Ю. Рациональный режим осадки обода колесной заготовки / М.Ю. Шифрин // *Сталь*. – 1993. – № 5. – С. 52–54.