

Нугман Е.З.

**РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ
ВАЛКОВ ПРИ ПРОКАТКЕ В НОВОМ СТАНЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ПРОГРАММЫ MSC.VISUALNASTRAN 4D**

E.Z. Nugman

**CALCULATION OF THE EQUIVALENT STRESS AND STRAIN
ROLLS FOR ROLLING IN A NEW PROGRAM APPLICATION BECOME
MSC.VISUALNASTRAN 4D**

УДК: 669.35.074.669.539.5

В данной статье рассматривается методика расчета суммарного перемещения, деформированного и напряженного состояния, а также распределение запасов прочности валков при прокатке в клетях нового стана.

Мақалада жаңа орнақтың қапастарында илемдеу кезіндегі деформацияланған және кернеулік күйдегі, жиынтық орынауыстыруды есептеу әдістемесі, сонымен қатар білдектердің беріктік қорының таралуы қарастырылған.

The method of calculation of the total moving is examined in this article, deformed and tense state, and similarly distributing of margins of safety of rollers at rolling in the cages of new figure.

Несмотря на увеличение объема производства синтетических материалов, сталь, и в первую очередь, стальной прокат продолжают оставаться основным материалом в автомобилестроении, химической, трубной промышленности и т.п. С ростом производства и потребления листового металла повышаются требования к качеству этой продукции. Планшетная полоса – это абсолютно плоская полоса, без каких либо геометрических дефектов. Неудовлетворительная планшетность и разнотолщинность полос, применяемых при производстве трансформаторной, динамной стали, в телевизионной и электронной технике приводит к нарушению стабильности работы приборов и повышенному расходу электроэнергии, неблагоприятно сказывается на процессах автоматической листовой штамповки, прессовании и глубокой вытяжке, вызывая износ и разрушение рабочего инструмента, ухудшая качество изделий. Нарушение планшетности и разнотолщинности листового металла при прокатке приводит к повышенной отбраковке продукции и ее правке на правильных агрегатах, что в два раза повышает стоимость листового металла.

Отметим основные виды нарушений планшетной формы листового металла [1]:

- при продольном изгибе полосы передний конец полосы изгибается только в вертикальной плоскости, а радиус этого изгиба не меняется;
- при поперечном изгибе полосы, или «желобе» передний конец полосы изгибается в поперечном направлении, а радиус этого изгиба не изменяется в продольном;
- нарушение планшетности в виде волн, когда полоса на отдельных участках изгибается в

продольном и поперечном направлениях, причем радиус изгиба изменяется по длине и ширине полосы.

Различают следующие виды дефектов планшетности [1]:

- центральная волнистость, когда волны образуются в средней части ширины полосы;
- краевая волнистость, когда волны образуются по краям ширины полосы;
- местная волнистость, когда волны образуются не систематически на отдельных участках по длине и ширине полосы.

Кроме того, волнистость может быть симметричной или несимметричной, стабильной или нестабильной по ее длине.

Одним из основных направлений повышения качества прокатываемых полос является обеспечение минимальной продольной и поперечной разнотолщинности, а также планшетной формы полосы. В настоящее время для прокатки полос с заданной толщиной, профилем и планшетной формой, ведутся работы, направленные на совершенствование прокатного оборудования, создания новых конструкций прокатных станков и валковых систем, разработку автоматических систем управления толщиной, профилем и планшетностью прокатываемых полос, создание новых способов прокатки и валковых систем для их реализации.

По нашему мнению лучшим методом регулирования поперечной разнотолщинности и планшетности является уменьшение усилия прокатки от одной клетки к другой в направлении прокатки. С этой целью нами разработана конструкция прокатного стана [2], позволяющая снизить энергосиловые параметры прокатки.

Данный непрерывный стан для прокатки полос из стали и сплавов содержит рабочие клетки, универсальные шпиндели, электродвигатель, шестеренные клетки, редуктор с коническими шестернями, моторную муфту, коренные муфты, пружинные уравнивающие устройства шпинделей, опорные неприводные валки, рабочие приводные валки, станину, опорную плиту, анкерные болты. При этом имеющие от одного двигателя переменного тока приводы клеток содержат рабочие и опорные валки постоянного диаметра. Необходимо отметить, что в последовательно расположенных клетях диаметр рабочих

валков уменьшается в направлении прокатки, а диаметры опорных валков увеличиваются. При этом диаметры рабочих и опорных валков определяются по формуле, соответственно:

$$D_i = \frac{\pi \cdot h_i \cdot n}{60}; \quad D_j = \frac{\pi \cdot h_j \cdot n}{60},$$

($i = 1, 2, \dots, N-1, N$ при $j = N, N-1, \dots, 2, 1$), (1)
 где h_i – толщина прокатываемой полосы; n – число оборотов валков за проход прокатки; N – порядковый номер клетки, а расстояние между рабочими валками от одной клетки к другой против направлений прокатки увеличиваются на величину kh_k , h_k – конечная толщина прокатываемой полосы; k – порядковый номер клетки в обратном направлении прокатки.

Выполнение диаметров рабочих валков уменьшающим, а опорных валков увеличивающим в направлении прокатки позволяет значительно уменьшить давление металла на валки в клетях, расположенных в конце прокатного стана, и повысить жесткость данного стана. Снижение усилия, действующего на валки, а так же повышение жесткости стана позволяет уменьшить мощность привода с одной стороны, и повысить точность прокатываемой полосы, с другой стороны.

Использование рабочих D_i и опорных D_j валков, диаметры которых определяются по формуле (1), позволяет уменьшить до нуля межклетевое натяжение, за счет строгого выполнения постоянства секундных объемов при прокатке в различных клетях. Уменьшение до нуля межклетевых натяжений позволяет избежать разрыв полос в процессе прокатки. Увеличение расстояния между рабочими валками от одной клетки к другой против направлений прокатки на величину kh_k также уменьшает межклетевое натяжение.

Для определения энергосиловых параметров прокатки, а так же напряженно-деформированного состояния деформируемого металла и различных узлов нового стана необходимо спроектировать данный стан с соответствующими рабочими клетями. Рабочая клеть предлагаемого прокатного стана представляет собой многокомпонентную машину, включающую вращающиеся прокатные валки, подшипники, станину, установочные механизмы валков, устройства крепления и другие узлы и детали. Проектирование такой машины является весьма сложным и трудоемким процессом, требующим проведения большого объема расчетных и графических работ. При выполнении расчетных и графических частей проекта в разных компьютерных системах возникает целый ряд проблем, что приводит к увеличению сроков проектирования.

Для решения задач проектирования рабочих клеток наиболее важными являются следующие свойства выбранной системы:

- возможность в единой интегрированной среде конструирования и расчета создавать твердо-

тельные модели деталей клетки и рассчитывать напряженно-деформированное состояние этих деталей в каждой точке их объема;

- способность моделировать сборку отдельных узлов и всей машины в целом;
- возможность по моделям в автоматизированном режиме получать рабочие чертежи с соблюдением правил единой системы конструкторской документации;
- наличие библиотек стандартных изделий, материалов и текстур, освобождающих пользователя от необходимости поиска в справочной литературе и ввода таких данных, как коэффициент Пуассона, модуль упругости, предел прочности материалов и др.

Учитывая вышесказанное, методику расчета реализовали с использованием программы конечно-элементного анализа MSC.visualNastran 4D. Система компьютерного моделирования MSC.visualNastran 4D позволяет исследовать кинематику, динамику механизмов с возможностью расчета напряженно-деформированного и теплового состояния, как отдельных звеньев, так и механизма в целом.

При конструировании рабочих клеток в среде MSC.visualNastran 4D нами было выполнено следующие операции:

- создание геометрической модели каждой детали и сборка узлов рабочей клетки;
- выбор материалов деталей, их механические и физические свойства (модуль упругости, массовую плотность, коэффициент Пуассона, предел прочности и т.п.);
- формирование кинематических и статических граничных условий;
- создание сетку конечных элементов детали;
- определение напряженно-деформированного состояния;
- оценка уровня полученных упругих деформаций и напряжений в объеме каждой детали относительно требуемых критериев жесткости и прочности и введение соответствующих изменений в конструкцию стана (твердотельную модель машины).

Исходными данными для расчета являются твердотельная геометрическая форма конструкции стана, силы и условия закрепления, приложенные к ним, а также условия сопряжения кинематических пар конструкции клеток.

Сборочная трехмерная геометрическая модель стана, была построена в CAD программе Inventor, и посредством встроенного транслятора импортирована в среду MSC.visualNastran 4D с принятыми кинематическими связями. Данный подход позволяет улучшить связь этапов автоматизированного проектирования сложных механизмов. Для возможности автоматической коррекции геометрии модели стана, был использован метод параметризации геометрических размеров конструкции. Данный метод позволяет по результатам расчета на прочность, вносить соответ-

вующие изменения в конструкцию инструмента.

В ходе предварительного анализа работы стана, исходя из условия симметрии работы элементов конструкции, а также для упрощения расчетной схемы, были приняты к расчету наиболее нагруженные силовые элементы конструкции, такие как валки, нажимные механизмы, клетки и шейки валков.

Кинематические связи между элементами, моделировались кинематическими парами вращения и скольжения для общих поверхностей сопряжения. При этом учитывались соударения и трение в валках, клетях и т. д.

Рассмотрим основные результаты расчета эквивалентных напряжений и деформации валков, возникающих при прокатке в новом стане. Технические характеристики рабочих клеток укрупненного лабораторного стана приведено в таблице 1.

В MSC.SuperForge инструменты принимаются абсолютно жесткими и обеспечивают свойства теплопроводности и теплопередачи, т.е. удельная теплопроводность, удельная тепло-

емкость и плотность приняты во внимание. Из базы данных материалов назначаем материал инструмента H13. Для этого материала плотность и тепловые свойства программа назначала по умолчанию. Взаимодействие между жестким валком и деформируемым материалом заготовки моделировались с помощью контактных поверхностей, которые описывают контактные условия между поверхностями валков и поверхностью толстого листа. В процессе моделирования контактные условия постоянно обновлялись, отражая вращение валков и деформацию материала, что позволяло моделировать скольжение между валком и материалом обрабатываемой заготовки. Контакт между валком и толстым листом смоделирован трением по Кулону, коэффициент трения был принят 0,5. Из базы данных материалов назначали материал S20C (сталь Ст.08кп по стандарту стран СНГ) прокатываемой полосе. Упругие свойства и диаграмма деформирования данной стали в зависимости от степени и скорости деформации представлена на рисунке 1.

Таблица 1

Техническая характеристика рабочих клеток

Параметры	Номер клетки					
	I	II	III	IV	V	
Расстояние между клетями, м	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Диаметр валков	D _p , мм	150	125	100	75	50
	D _{оп} , мм		150	150	150	150
Скорость прокатки, v _{пр} , м/с	0,5	0,67	0,92	1,45	2,03	
Толщина до прокатки, h ₀ , мм	4	2,5	1,75	1,15	0,9	
После прокатки, h ₁ , мм	2,5	1,75	1,15	0,9	0,7	
Абсолютное обжатие, Δh, мм	1,5	0,75	0,6	0,25	0,2	
Относительное обжатие: E = Δh / h ₀	0,375	0,3	0,34	0,22	0,22	

Температурный режим при прокатке состоит из обмена тепла между валком, тонким слябом и окружающей средой, а также из теплового эффекта за счет деформации металла. Процесс прокатки проходит при комнатной температуре, поэтому начальную температуру валка приняли равным 20⁰С.

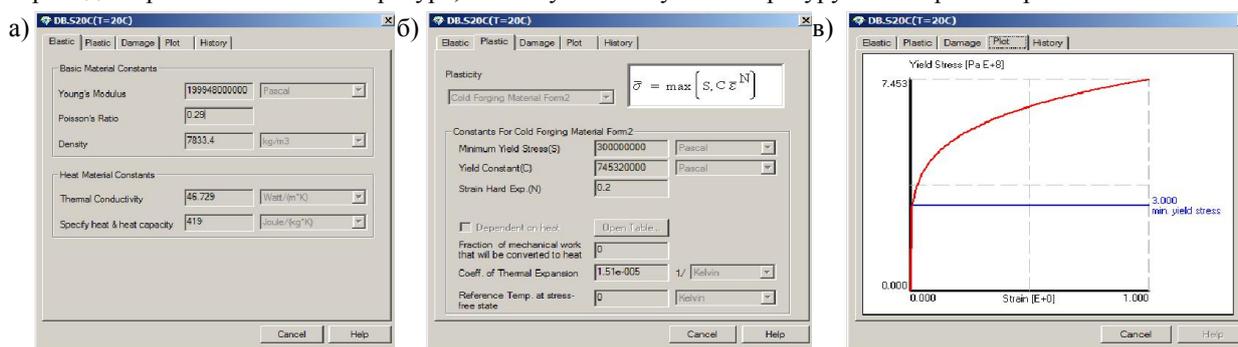


Рис.1. Упругие (а) и пластические (б) свойства, диаграмма деформирования (в) стали S20C в зависимости от степени и скорости деформации

Для того чтобы рассчитать эквивалентные напряжения и деформации валков необходимо рассчитать эквивалентные напряжения и деформации, а так же температурное поле, возникающие при прокатке в деформируемой полосе.

На рисунке 2 представлено результаты расчета в виде картины распределения эквивалентных напряжений и деформаций и температурного поля (первая клеть).

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что при прокатке во всех клетях нового стана эквивалентные напряжения и деформации сосредотачиваются в зоне контакта металла с деформируемой полосой. При этом в этих зонах повышается температура до 370 °С.

На рисунке 3 и 4 приведены результаты расчета усилия прокатки возникающих в различ-

ных направлениях осей координат x, y, z (направление оси x совпадает с направлением оси прокатки), а так же эквивалентные напряжения и деформации валков при прокатке в новом стане. Действительные значения эквивалентных напряжений и деформации приведены в цифровом виде

на соответствующих цветовых эпюрах. Из данных рисунков видно, что в нестационарном стадии во всех направлениях деформируемой полосы усилия прокатки возрастает, а в установившемся стадии полоса деформируется при постоянном усилии.

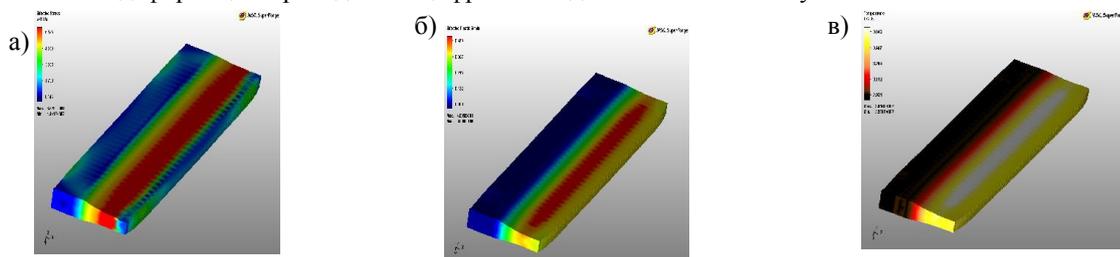


Рис.2. Картина распределения, эквивалентных напряжений (а), деформаций (б) и температуры (в) при прокатке толстых листов в непрерывном стане

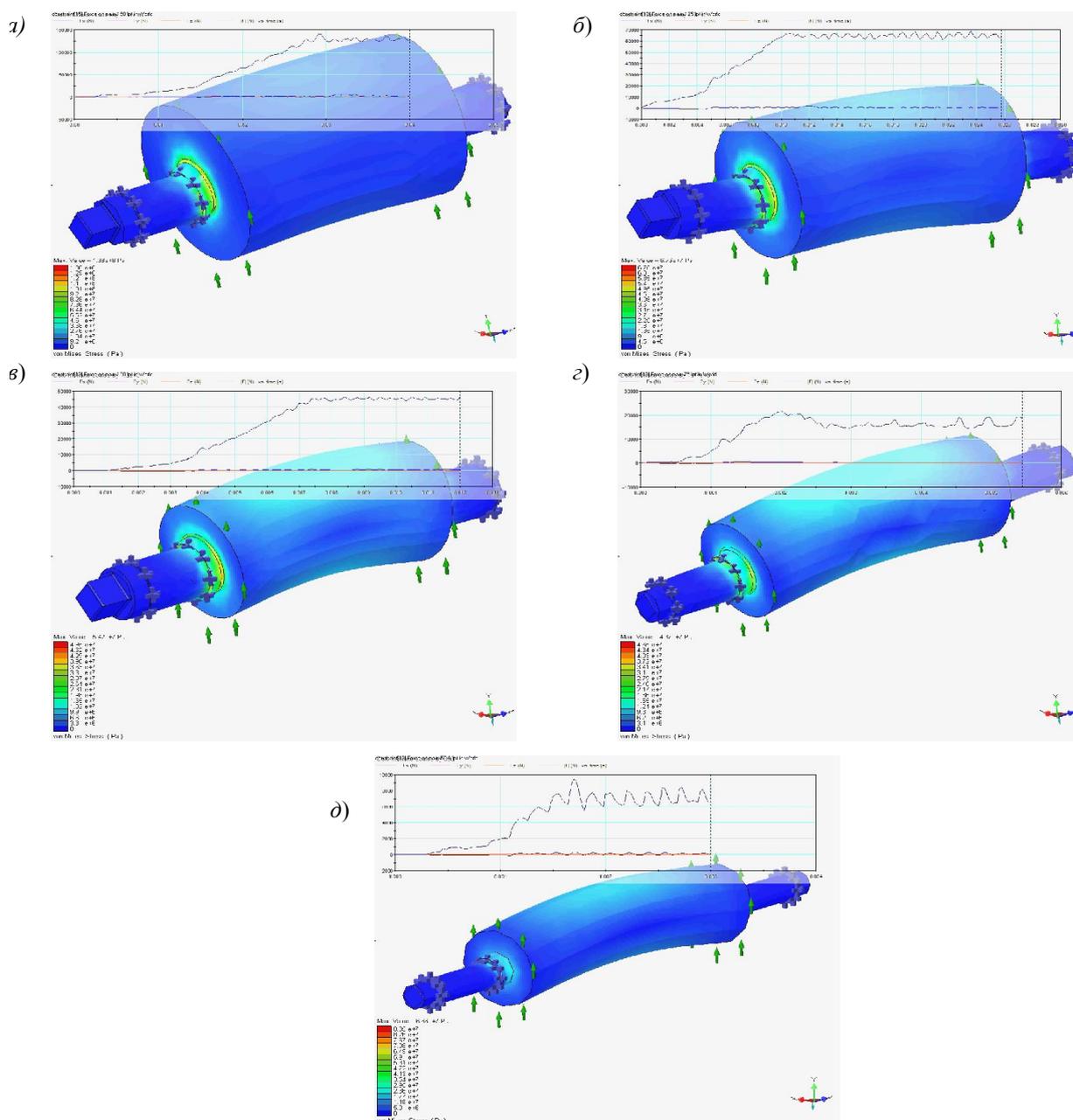


Рис. 3. Картина распределения эквивалентных напряжений валков первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) клетки нового стана

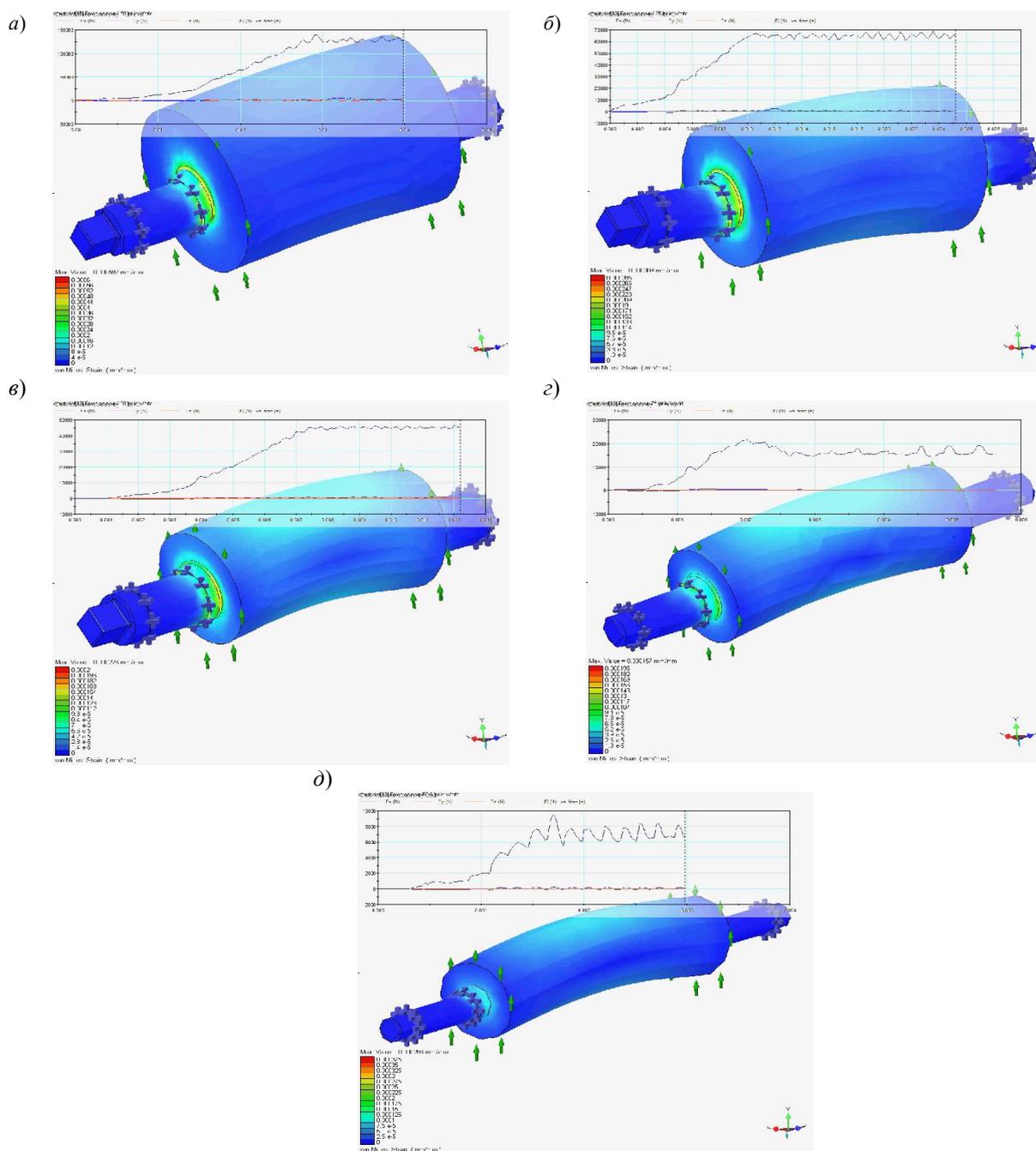


Рис.4. Картина распределения эквивалентных деформации валков первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) клетки нового стана

Проведенные на конечно-элементных моделях расчеты показали, что:

- максимальное усилие возникающие в направлении оси *y*, т.е. в вертикальном направлении, приводят к возникновению максимальных упругих перемещении (изгиба) в этом же направлении прокатки;
- наибольшее усилие возникающие в направлении оси прокатки, т.е. оси *x*, приводят к появлению симметричных наибольших упругих перемещении материала валков в краях данного инструмента;
- сосредоточения максимальных усилий, возникающих в направлениях оси валка (т.е. оси

z) по краям валков в шахматном порядке приводят к появлению максимальных упругих перемещении материала валков в этих же местах инструмента;

- при проходе заготовок от одной клетки к другой усилие прокатки уменьшается и равняется следующим значениям: 150000 Н; 70000 Н; 45000 Н; 20000 Н; 10000 Н соответственно для первой, второй, третьей, четвертой и пятой клеток (рисунок 3 и 4);

- максимальное эквивалентное напряжения в бочке валков равняется 2,76 е+7 Па (рисунок 3), 1,35 е+7 Па, 1,32 е+7 Па, 1,55 е+7 Па и 2,36 е+7 Па, а для шейки валков – 1,01 е+8 Па (рисунок 3),

4,95 e+7 Па, 3,63 e+7 Па, 3,41 e+7 Па и 2,95 e+7 Па соответственно при прокатке в первой, второй, третьей, четвертой и пятой клетки предлагаемого стана. Причем максимальное эквивалентное напряжение возникает в шейке валков. Полученные максимальные значения эквивалентного напряжения 4,95e+7 Па, не превышают максимально допустимое для данного материала значение предела прочности 1.380e+9 Па;

- под действием приложенных вертикальных сил валки прогибаются в направлении действия силы, а шейка валков упруго деформируются в этом же направлении, причем максимальное значение эквивалентной деформации (рисунок 4) составляет для бочки валков 0,000008, 0,0000057, 0,000007, 0,0000052, 0,0001 для шейки валков – 0,00044, 0,000209, 0,000154, 0,00013, 0,0001 соответственно первой, второй, третьей, четвертой и пятой клетки предлагаемого стана. В целом величина упругой деформации элементов валков невелика, что свидетельствует о достаточно высокой жесткости узла валков рабочей клетки. Это гарантирует получение поперечной разнотолщинности и планшетности прокатываемых полос в пределах требуемых допускаемых отклонений;

- при прокатке в последних клетях предлагаемого стана, особенно нестационарном

стадии прокатки, увеличивается резонансное колебание, что сопровождается колебаниями прокатываемой полосы в последних межклетевых промежутках (рисунок 3 и 4). Время роста амплитуды вибрации в нестационарной стадии равняется 0,01 – 0,02 с. Однако, в установившейся стадии, процесс прокатки стабилизируется, что исключает обрыв полосы и увеличивает точность получаемой полосы.

Выводы:

1. Для получения качественного листового проката предложена новая конструкция непрерывного стана;
2. На основе полученных данных в среде MSC.visualNastran 4D построенная геометрическая модель узла клетки отвечает необходимым критериям жесткости и прочности.

Литература:

1. Максимов Е., Преимущества несимметричной прокатки и процесса прокатки – волочение при получении полос с планшетной формой // Оборудование, 2005, №11. С. 56 – 63.
2. Машеков С.А., Нугман Е.З., Машекова А.С., и др., Непрерывный стан для прокатки полос из сталей и сплавов, Патент 20969, Бюл. №3, Опубл. 16.03.2009.

Рецензент: д.т.н., профессор Поветкин В.В.