

**REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 2224-5227

Volume 3, Number 313 (2017), 61 – 72

**S.A. Mashkov<sup>1</sup>, A.E. Nurtazaev<sup>1</sup>, Ye.Z. Nugman<sup>1</sup>, B.N. Absadykov<sup>2</sup>, A.S. Mashekova<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Kazakh national research technical university named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan;<sup>2</sup>Bekturov Institute of chemical sciences, Almaty, Kazakhstan**SIMULATION MODELING OF THE ROLL BENDING AT  
THE ROLLING OF THIN STRIPS IN THE FIVE-STAND  
LONGITUDINAL-WEDGE MILL**

**Abstract.** A longitudinal-wedge mill of a new design is proposed. The analysis of the results of simulation modeling of the elastic deformation of a rolling mill using the finite element method is presented. The influence of the change in the diameter of working rolls of the longitudinal-wedge mill on the elastic deformation of rolls and heavy duty elements of mill stands is determined. It is shown that the new mill has a sufficiently high stiffness of the structure of the stands, which satisfy the strength condition. It is noted that the rolling of strips on the proposed mill will not lead to the receipt of finished rolled products with longitudinal and transverse gage interference. As a result of modeling the elastic deformation of the heavy duty elements of the stands of the new mill, measures for their modernization have been developed.

**Keywords:** longitudinal-wedge mill, rolls, stands, bearings, elastic deformation, thin strip, gage interference.

УДК 621.771.23

**С.А. Машеков<sup>1</sup>, А.Е. Нуртазаев<sup>1</sup>, Е.З. Нугман<sup>1</sup>, Б.Н. Абсадыков<sup>2</sup>, А.С. Машекова<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан;<sup>2</sup>Институт химических наук имени А.Б. Бектурова, г. Алматы, Республика Казахстан**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА ВАЛКОВ  
ПРИ ПРОКАТКЕ ТОНКИХ ПОЛОС  
В ПЯТИКЛЕТЕВОМ ПРОДОЛЬНО-КЛИНОВОМ СТАНЕ**

**Аннотация.** Предложен продольно-клиновой стан новой конструкции. Представлен анализ результатов имитационного моделирования упругой деформации валкового стана с использованием метода конечных элементов. Определено влияние изменения диаметра рабочих валков продольно-клинового стана на упругую деформацию валков и тяжелонагруженных элементов клетей стана. Показано, что новый стан имеет достаточно высокую жесткость конструкции клетей, которые удовлетворяют условию прочности. Отмечено, что прокатка полос на предлагаемом стане не приведет к получению готового проката с продольной и поперечной разнотолщинностью. В результате моделирования упругой деформации тяжелонагруженных элементов клетей нового стана разработаны мероприятия по их модернизации.

**Ключевые слова:** продольно-клиновой стан, валки, клетки, подшипники, упругая деформация, тонкая полоса, разнотолщинность.

**Введение**

Одним из основных направлений повышения качества прокатываемых полос является обеспечение минимальной продольной и поперечной разнотолщинности, а также планшетной формы полосы [1,2,3]. В настоящее время для прокатки полос с заданной толщиной, профилем и планшетной формой ведутся работы, направленные на совершенствование прокатного оборуд-

дования, создания новых конструкций прокатных станов и валковых систем, разработку автоматических систем управления толщиной, профилем и планшетностью прокатываемых полос, создание новых способов прокатки и валковых систем для их реализации. Установлены и исследованы следующие факторы, приводящие к нарушению планшетности листового металла: поперечная разнотолщинность подката, неравномерность обжатия по ширине очага деформации, вызванная, например, упругим изгибом валковой системы, тепловой выпуклостью валков, сплющиванием и износом бочек валков, и др.

Известно, что в существующих станах разнотолщинность вызывается следующими причинами [4]: большим охлаждением заднего конца полосы при прокатке в чистовых клетях; температурным изменением диаметра рабочих валков; прокаткой концов полосы без натяжения. Поперечная разнотолщинность является в основном следствием упругой деформации тяжело нагруженных элементов клеток стана, изменяющей форму щели между рабочими валками. Упругая деформация остальных частей рабочей клетки вызывает изменение зазора между валками по высоте, т. е. образование продольной разнотолщинности.

Следовательно, жесткость рабочих клеток, т. е. минимум их упругой деформации при прокатке, определяется в основном деформацией валков и станин [4]. Жесткость клеток можно повысить за счет увеличения диаметра рабочих и опорных валков, при этом уменьшится прогиб валков и повысится точность проката, а также сечения стоек и поперечин станин.

Для уменьшения разнотолщинности листов из-за упругого прогиба и выработки валков осуществляют профилирование их бочки шлифованием [5]. Обычно контур бочки всех нижних рабочих валков, окалиноломателей и всех опорных валков прямой. У верхних рабочих валков бочку делают с небольшой выпуклостью (до 0,25 мм – в чистовых клетях и до 0,40 мм – в черновых). Однако подбор профиля валков и регулирование их температуры путем изменения подачи охлаждающей жидкости вдоль бочки валков в процессе прокатки не всегда достаточны для получения требуемой ровности листов из-за инерционности.

Весьма эффективным для получения минимальной поперечной разнотолщинности полосы и улучшения ее ровности является принудительное регулирование профиля валков в процессе прокатки путем их упругого противоизгиба или дополнительного упругого изгиба, что уменьшает значение предварительной профилировки валков [5]. Однако главным условием повышения производительности и точности листовой продукции является оснащение непрерывных листовых станов системами автоматического регулирования толщины и ЭВМ.

Таким образом, упругие деформации валков клеток широкополосных станов, переменные по длине бочки и изменяющиеся под воздействием нестабильных факторов технологии, оказывают значительное влияние на нормируемые показатели точности поперечного профиля прокатываемых полос. Поэтому, одним из важных вопросов разработки технологии листовой прокатки является определение упругой деформации валков вышеуказанных станов.

Анализ литературных источников показал, что проблема моделирования упругих деформаций валков в силу своей сложности еще не является до конца исследованной [6]. Применение современных компьютерных программ, основанных на методе конечных элементов и позволяющих описывать совместное деформирование рабочего и опорного валков в объемной (3D) постановке, и учет реальных особенностей работы опорных узлов позволят дополнить имеющиеся знания и получить новые научные результаты.

В статьях [7-10] приведены результаты моделирования упругой деформации и напряжений валков клеток листовых станов с использованием комплексной программы ANSYS. По мнению авторов работы [11], в вышеперечисленных работах не ставилась задача определения показателей поперечного профиля полосы с минимальной погрешностью.

Заметим [11], что согласно требованиям современных стандартов на широкий холоднокатаный лист, колебания толщины полосы по всей ее площади не должны превышать 2,0 – 2,2% от ее номинальной толщины. Следовательно, погрешность расчета поперечной разнотолщинности не должна быть больше 1,5 – 2% от номинальной толщины. Это условие предъявляет жесткие требования к точности методики моделирования упругих деформаций валков.

В настоящей работе для расчета упругой деформации валков нового продольно-клинового стана [12] применен программный комплекс MSC Nastran, который является лидером среди

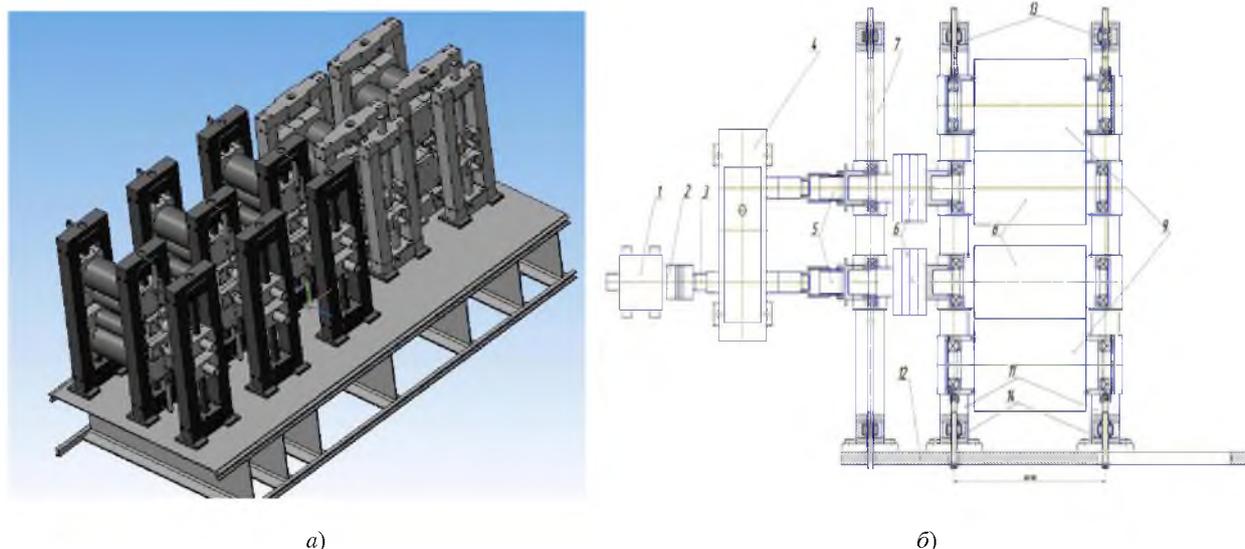
программных продуктов по расчету процессов обработки металлов давлением. Достоверность расчетов и эффективность применения MSC Nastran для компьютерного моделирования процессов прокатки подтверждает опыт ведущих промышленных компаний Японии, США и ЕС, таких как Ford, BMW, Toyota Motor Co, DENSO и др.

В работе ставилась цель - применяя разработанный алгоритм, рассмотреть возможности расчета упругой деформации валков, как одного из тяжело нагруженных элементов продольно-клинового стана.

### Оборудование, инструменты, материалы и методика исследования

Для прокатки тонких полос с точными геометрическими размерами нами разработан новый пятиклетевой продольно-клиновой стан (ПКС) не сложной конструкции (рисунок 1).

Многофункциональный ПКС для прокатки листов из сталей и сплавов содержит электродвигатели, редукторы, шестеренные клетки, универсальные шпиндели, муфты, клетки с рабочими и опорными валками (рисунок 1). При этом в первых трех клетях установлены два, а в последних двух клетях – четыре опорных валка. Вращение уменьшающихся в направлении прокатки рабочих валков осуществляется через подшипниковые клетки пятью мотор-редукторами с угловой скоростью  $\omega = v \cdot R$  (где  $v$  – скорость прокатки в каждой клетке стана;  $R$  – радиус рабочих валков в каждой клетке стана). При этом расстояния между клетями увеличены на величину опережения, а регулировку расстояний между рабочими валками производят едиными червячными нажимными механизмами, расположенными сверху и снизу станин стана и подшипниковых клеток.



1 - мотор-редуктор; 2 – муфта; 3 – вал; 4 - шестеренная клетка; 5 и 6 – шпиндели;  
7 - подшипниковая клетка; 8 - рабочие валки; 9 – опорные валки первых трех клеток;  
10 – опорные валки последних двух клеток (не показаны); 11 – станина;  
12 - опорные плиты; 13 и 14 - нажимные механизмы

Рисунок 1 - Многофункциональный продольно-клиновой стан (а) и конструкция его рабочих клеток (б)

Необходимо отметить, что рабочие валки в каждой клетке имеют постоянный диаметр, а в последовательно расположенных клетях диаметр валков уменьшается в направлении прокатки. На выходе происходит разрезка тонкой полосы или смотка ее в рулоны.

В работе с использованием программы конечно-элементного анализа PATRAN NASTRAN [13,14] разработали динамическую компьютерную модель ПКС и рассчитали прогиб, вибрацию и напряженно-деформированное состояние (НДС) тяжело нагруженных элементов клеток данного стана.

При конструировании нового стана в среде MSC Nastran НДС деталей клеток нами рассчитано по следующему алгоритму [13,14]. В программе КОМПАС по рабочим чертежам создали

трехмерную геометрическую модель каждой детали и произвели сборку узлов рабочей клетки. Произвели импорт модели в препроцессор NASTRAN PATRAN с принятыми кинематическими связями. Выбрали материалы деталей, их механические и физические свойства. Сформировали кинематические и статические граничные условия; смоделировали расчетную механическую схему, включающую распределение нагрузки по ширине прокатываемого листа. Сделали подвод крутящего момента к валкам. Используя опции MeshSeed, нанесли 6-ти и 8-ми узловые объемные конечно-элементные сетки и определили НДС. Для моделирования конструкции клеток нового стана использовали двенадцать типов жесткости для задания характеристик жесткости основных деталей стана. При разработке расчетной схемы сгущенные сетки конечных элементов применялись в местах предполагаемой концентрации напряжений. Упругие связи между узлами клетки моделировали пружинно-демпферным элементом CBUSH. Силу трения между валками приняли равной 0,0868, а начальную температуру валков - 20 °С. Конечно-элементная модель (КЭМ) клеток многофункционального ПКС представлена на рисунке 2.

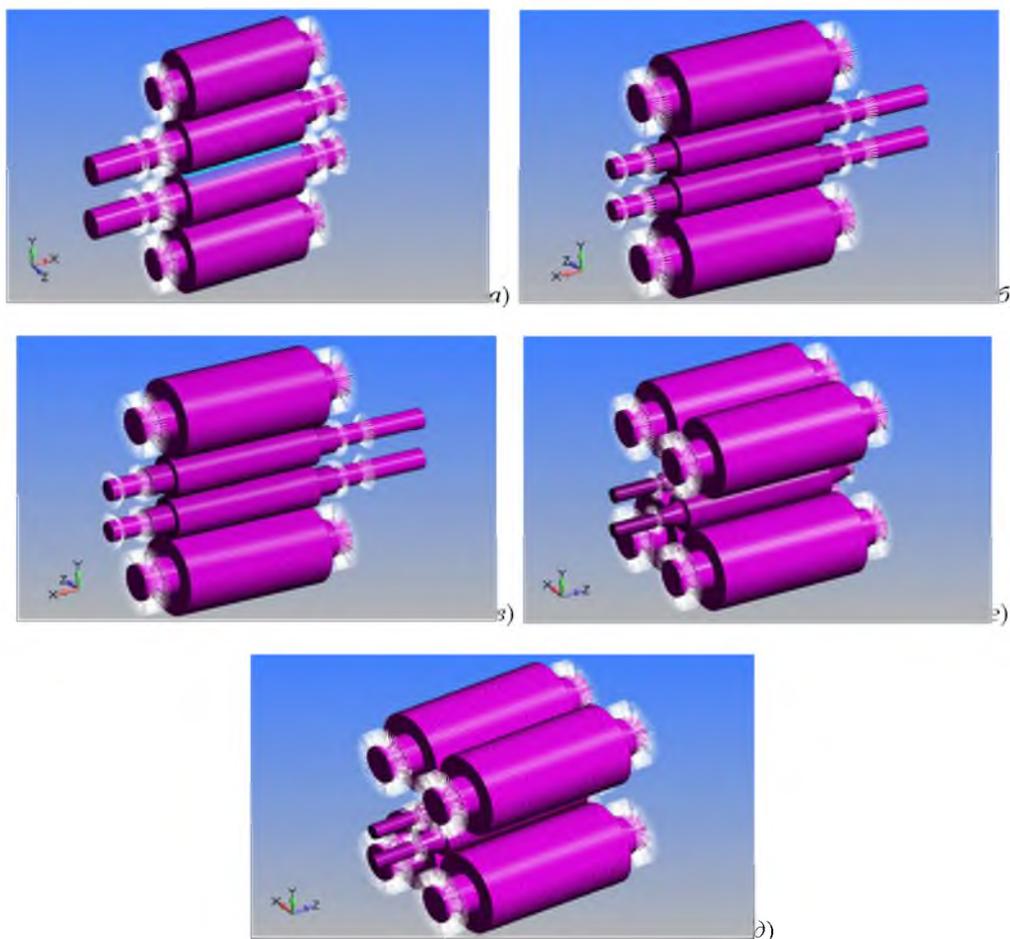


Рисунок 2 - Расчетные схемы КЭМ первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) клеток многофункционального продольно-клинового стана

Следует отметить, что более детально были смоделированы опоры валкового узла клеток. Расчетная модель каждого сферического роликоподшипника включает в себя три типа деталей: наружное, внутреннее кольца и два ряда роликов по 18 в каждом.

Напряженное состояние в тяжело нагруженных валках клеток вычисляли при приложении усилия прокатки и воздействии температурными напряжениями. Кинематические связи между тяжело нагруженными элементами моделировались кинематическими парами вращения и скольжения для общих поверхностей сопряжения. При этом учитывались соударения и трение в валках, подушках, подшипниках и т. д.

Взаимодействие между жесткими опорными, рабочими валками и деформируемым материалом заготовки моделируется с помощью контактных поверхностей, которые описывают контактные условия между поверхностями опорных и рабочих валков, а также поверхностью тонкого листа. В процессе моделирования контактные условия постоянно обновляются, отражая вращение опорных и рабочих валков, и деформацию материала, что позволяет моделировать скольжение между опорными и рабочими валками, а также материалом обрабатываемой заготовки. При этом, в расчетных схемах были учтены линейные контакты между рабочими и опорными валками. Контакт между рабочими валками и тонким листом смоделирован трением по Кулону, коэффициент трения был принят 0,3.

Следует отметить, что валки были закреплены на опорных шейках подшипниковых узлов по трем степеням свободы  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  (рисунок 2). В качестве материала валков была принята сталь 9Х1 со следующими механическими свойствами: модуль упругости - 2,1+11 Па; коэффициент Пуассона - 0,283; модуль сдвига - 8,1839+10 Па. Материалы других деталей стана - сталь 40ХС, Ст45 и т.д. с соответствующими механическими свойствами.

Прочность и жесткость рабочих и опорных валков многофункционального стана исследовали при горячей прокатке полос (температура прокатки 250 °С) из сплава АД31 размером 0,7×400 мм. В качестве исходной заготовки использовали подкат толщиной  $h_0 = 3,5$  мм.

Для прокатки полосы использовали следующие исходные данные: высота полосы после прокатки -  $h_1 = 2,576$  мм,  $h_2 = 1,708$  мм,  $h_3 = 1,148$  мм,  $h_4 = 0,84$  мм,  $h_5 = 0,7$  мм; абсолютное обжатие -  $\Delta h_1 = 0,924$ ,  $\Delta h_2 = 0,868$ ,  $\Delta h_3 = 0,56$ ,  $\Delta h_4 = 0,308$ ,  $\Delta h_5 = 0,14$ ; единичное обжатие -  $\varepsilon_1 = 26,4\%$ ,  $\varepsilon_2 = 33,7\%$ ,  $\varepsilon_3 = 32,8\%$ ,  $\varepsilon_4 = 26,8\%$ ,  $\varepsilon_5 = 16,7\%$ ; скорость полосы -  $v_1 = h_5 \cdot v_5 / h_1 = 0,7 \cdot 2,085 / 2,576 = 0,5$  м/с,  $v_2 = 0,68$  м/с,  $v_3 = 1,03$  м/с,  $v_4 = 1,526$  м/с,  $v_5 = 2,085$  м/с; диаметр опорного валка -  $D_{ОП1} = 220$  мм,  $D_{ОП2} = 220$  мм,  $D_{ОП3} = 220$  мм,  $D_{ОП4} = 220$ ,  $D_{ОП5} = 220$ ; диаметр рабочего валка -  $D_{Р1} = 180$  мм,  $D_{Р2} = 150$  мм,  $D_{Р3} = 125$  мм,  $D_{Р4} = 106$  мм,  $D_{Р5} = 94$  мм.

### Результаты и обсуждение

Проведенные расчеты на конечно-элементных моделях клетей нового стана показали, что:

- максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в бочках опорных валков первой, второй, третьей, четвертой и пятой клетей предлагаемого стана соответственно равны: 12,9 МПа; 21,3 МПа; 6,95 МПа; 20,59 МПа; 39,5 МПа. При этом эквивалентные напряжения по Мизесу для шейки опорных валков данных клетей нового стана соответственно равны: 27,49 МПа; 62,83 МПа; 20,52 МПа; 0,2197 МПа; 0,3990 МПа. Следует отметить, что максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу для бочки рабочих валков первой, второй, третьей, четвертой и пятой клетей соответственно равны: 22,14 МПа; 21,32 МПа; 13,02 МПа; 67,35 МПа; 52,89 МПа. Причем, в шейках рабочих валков данных клетей нового стана возникают следующие по величине максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу: 36,90 МПа; 106,6 МПа; 39,05 МПа; 112,3 МПа; 88,16 МПа. Следует отметить, что максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу в основном возникает в шейке валков. Заметим, что при прокатке в первой, второй, третьей, четвертой и пятой клетях полученные максимальные значения эквивалентных напряжений по Мизесу не превышают максимально допустимое значение предела прочности для материала валков;

- под действием приложенных вертикальных сил (по оси  $У$ ) валки прогибаются в направлении действия силы, т.е. максимальные усилия, возникающие в направлении оси  $У$  приводит к возникновению максимальных прогибов в этом же направлении прокатки (рисунок 3). Поэтому бочка и шейка валков упруго деформируются в вертикальном направлении.

При прокатке в первой, второй, третьей, четвертой и пятой клетях многофункционального продольно-клинового стана в середине бочки опорных валков в направлении оси  $У$  возникают максимальные по величине перемещения. Их значения соответственно равны: 0,000106 мм; 0,0002792 мм; 0,00006738 мм; 0,00003579 мм; 0,00006721 мм. Причем, в шейке опорных валков данных клетей возникают перемещения, соответственно равные: 0,00005351 мм; 0,0001275 мм; 0,00002573 мм; 0,00003161 мм; 0,00004161 мм (рисунок 3). Следует отметить, что максимальные значения перемещения для бочки рабочих валков клетей стана равны: 0,00009316 мм; 0,0002064 мм; 0,00005269 мм; 0,0002035 мм; 0,0001711 мм. При этом в шейках рабочих валков данных

клетей возникают следующие максимальные по величине перемещения: 0,00006158 мм; 0,0001327 мм; 0,0000246 мм; 0,00009611 мм; 0,0001125 мм.

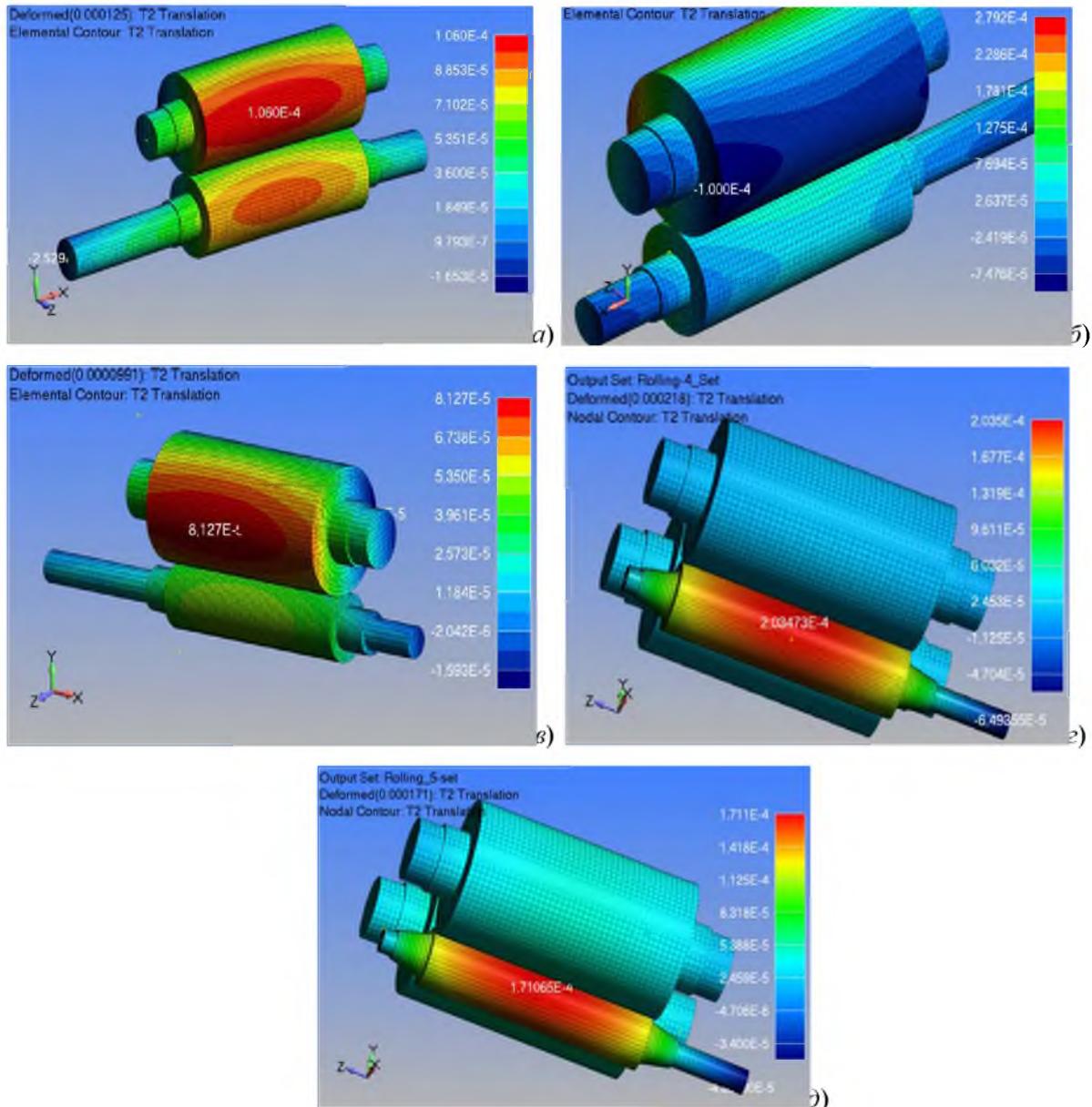


Рисунок 3 - Картина распределения поля перемещений упругих деформаций в опорных и рабочих валках первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) клетях многофункционального стана по оси Y

Заметим, что полученные расчетные значения эквивалентных напряжений по Мизесу не превышают верхнюю границу допускаемых контактно-усталостных напряжений. Это обстоятельство говорит о том, что даже небольшие отклонения от технологического процесса не приведут к появлению дефектов на поверхности валков: трещины, выкрашивания, отколы.

Небольшие усилия, возникающие в направлении оси прокатки, т.е. оси X, приводят к появлению небольших упругих перемещений материала валков в этом же направлении. Причем, при прокатке в первой, второй, третьей клетях предлагаемого стана со стороны противоположного привода клетей, на краях бочки опорных валков возникают максимальные значения перемещения, равные 0,00002788 мм; 0,00006604 мм; 0,00001945 мм, соответственно, при этом эти же перемещения возникают в шейках соответствующих опорных валков (рисунок 4). Результаты

расчета показали, что при прокатке в первой, второй, третьей клетях максимальные значения перемещений в рабочих валках также возникают с противоположной стороны привода клетей стана. Их значения для бочки и шейки рабочих валков первой, второй, третьей клетей соответственно равны: 0,00002555 мм; 0,00006126 мм; 0,00002087 мм. Следует отметить, что при прокатке в четвертой и пятой клетях нового стана максимальные по величине перемещения возникают в середине бочки опорных и рабочих валков. При этом максимальные значения перемещений для бочки рабочих валков равны: 0,0001251 мм; 0,00005497 мм, а для шейки данных валков – 0,00008638 мм; 0,00004047 мм, соответственно. Результаты расчета показали, что в бочке опорных валков последних отмеченных клетей возникают следующие максимальные значения перемещений: 0,00006695 мм; 0,00009568 мм. При этом в шейках опорных валков данных клетей появляются следующие максимальные значения перемещений: 0,00005204 мм; 0,00006797 мм.

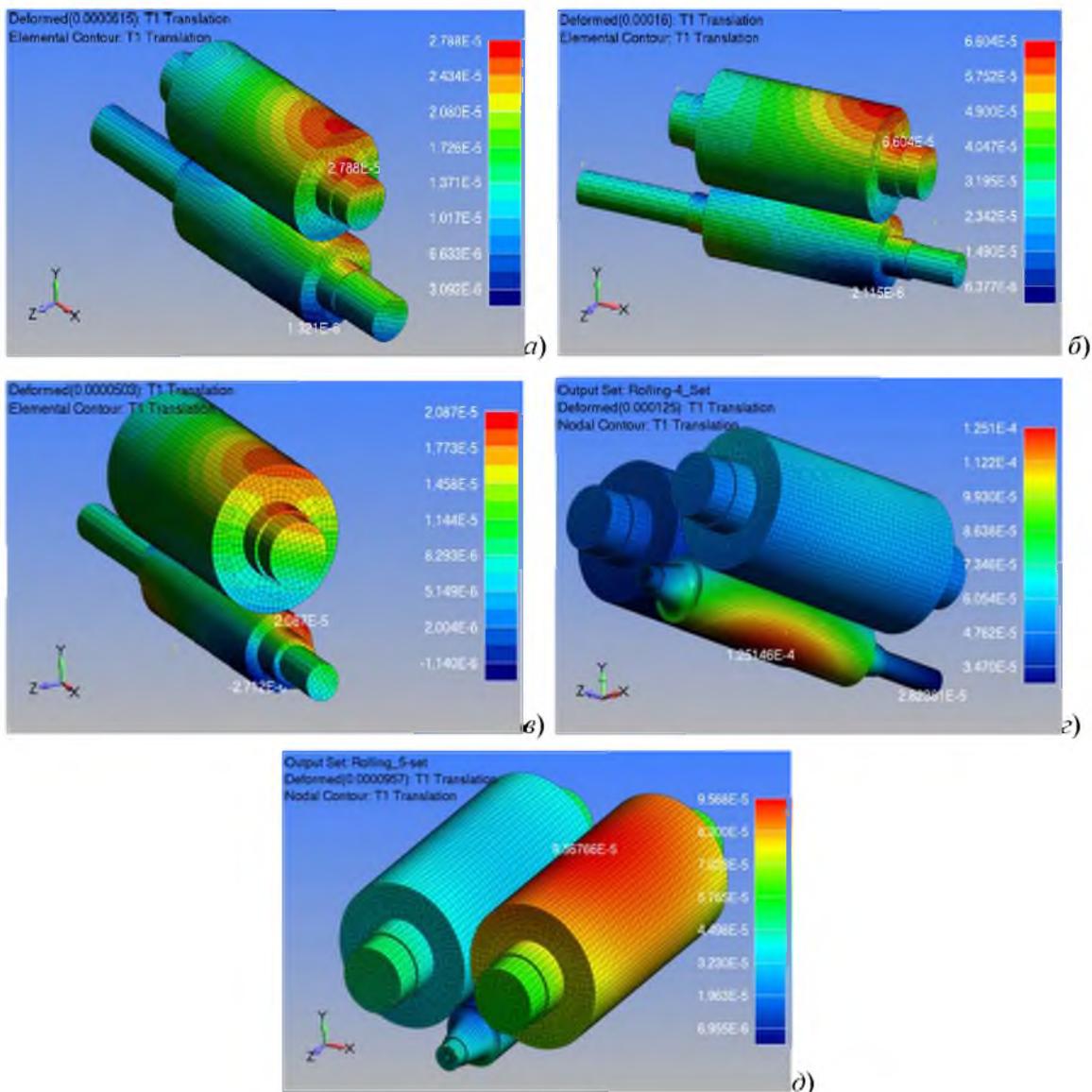


Рисунок 4 - Картина распределения поля перемещений упругих деформаций в опорных и рабочих валках первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) клетей многофункционального стана по оси X

Небольшие усилия, возникающие в направлении, перпендикулярном оси прокатки, т.е. оси Z, приводят к появлению упругих перемещений материала валков в этом же направлении. Причем, при прокатке в четвертой и пятой клетях предлагаемого стана со стороны противоположного

привода клетей, на краях бочки опорных валков возникают максимальные значения перемещений, равные 0,000003809 мм; 0,000008941 мм, соответственно, при этом эти же перемещения возникают в шейках соответствующих опорных валков (рисунок 5). Результаты расчета показали, что при прокатке в четвертой и пятой клетях нового стана максимальные значения перемещений в рабочих валках также возникают с противоположной стороны привода клетей стана. Их значения для бочки и шейки рабочих валков четвертой и пятой клетей соответственно равны: 0,00003221 мм; 0,000026555 мм. Следует отметить, что при прокатке в первой, второй и третьей клетях нового стана максимальные по величине перемещения возникают в бочках опорных и рабочих валков. При этом максимальные значения перемещения для бочки опорных валков равны: 0,0004572 мм; 0,00127 мм; 0,0003196 мм, а для шейки данных валков – 0,0005040 мм; 0,001413 мм; 0,0003587 мм, соответственно. Результаты расчета показали, что в бочке рабочих валков последних отмеченных клетей возникают следующие максимальные значения перемещения: 0,0004106 мм; 0,001160 мм; 0,000363 мм. Причем, в шейках рабочих валков данных клетей появляются следующие максимальные значения перемещения: 0,0003736 мм; 0,001064 мм; 0,0002715 мм. Заметим, что упругие перемещения материала валков в направлении оси Z при прокатке в клетях с двумя опорными валками определенно больше, нежели при прокатке в клетях с четырьмя опорными валками.

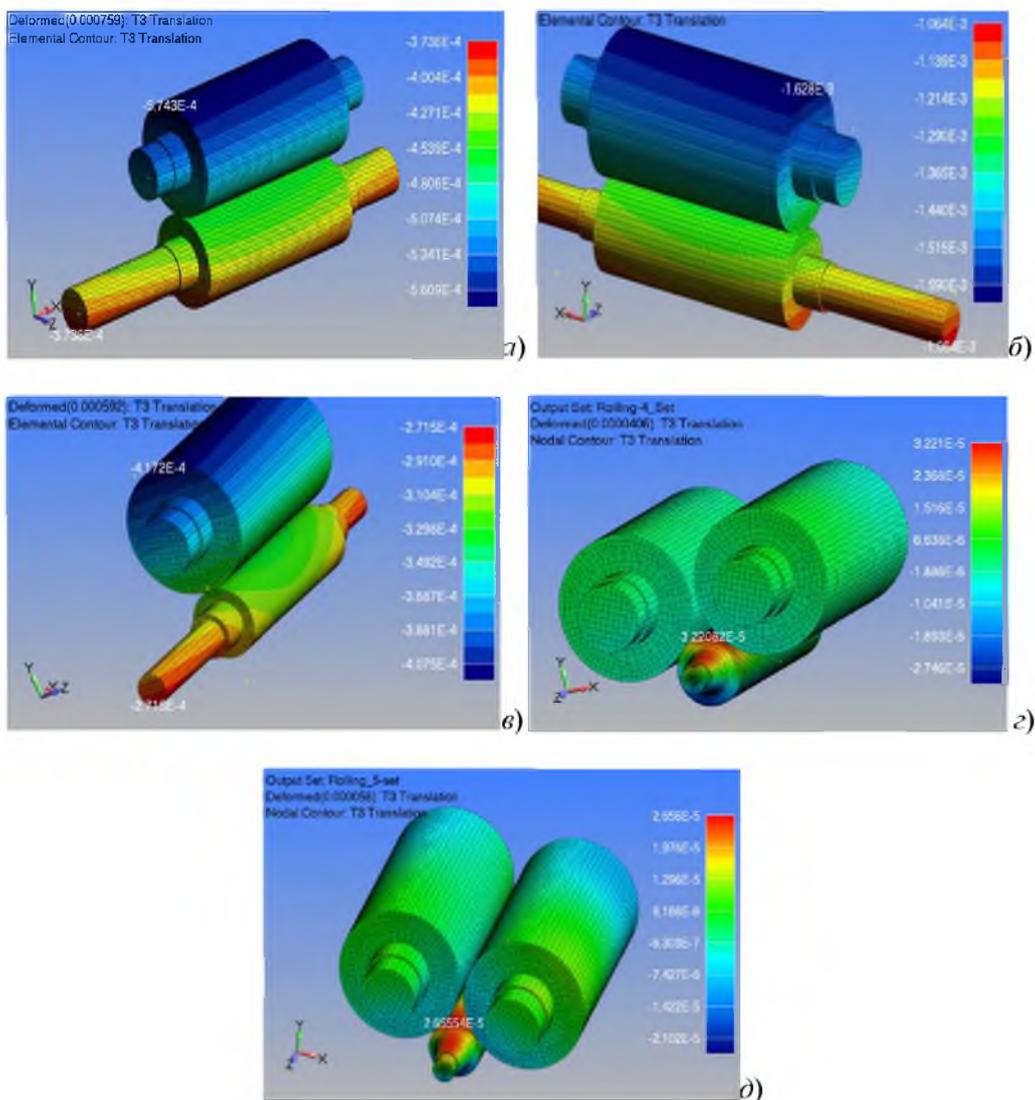


Рисунок 5 - Картина распределения поля перемещений упругих деформаций опорных и рабочих валков первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) клетей многофункционального стана по оси Z

В целом, величина упругой деформации элементов валков невелика (рисунок 6), что свидетельствует о достаточно высокой жесткости узла валков рабочей клетки. Это гарантирует получение поперечной разнотолщинности и планшетности прокатываемых полос в пределах требуемых допускаемых отклонений.

Итак, наибольшими для всех рабочих валков клеток стана являются перемещения вдоль приложения усилия прокатки, т.е. в направлении действия усилия прокатки (вдоль оси  $Y$ ). Перемещения вдоль осей  $X$  и  $Z$  практически равнозначны. Для опорных валков существенными являются деформации вдоль осей  $Y$  и  $X$ , а для рабочих валков и подшипников – вдоль осей  $Y$  и  $Z$ .

Таким образом, при прокатке на новом многофункциональном продольно-клиновом стане в результате снижения давления прокатки уменьшается упругий прогиб, особенно валков последних клеток стана, и, как следствие, снижается поперечная разнотолщинность и улучшается планшетность прокатываемых полос.

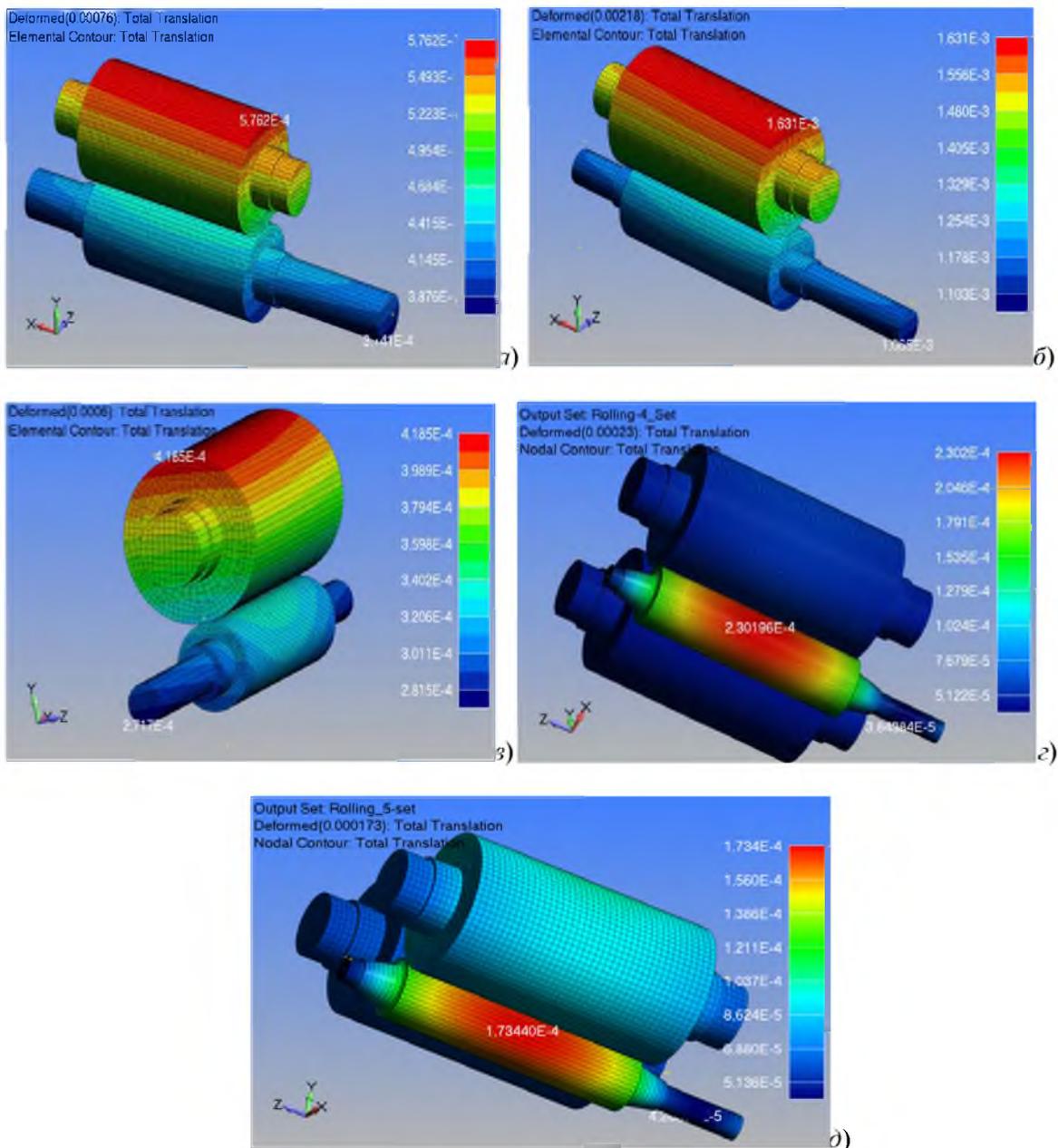


Рисунок 6 - Картина распределения суммарного поля перемещений упругих деформаций в опорных и рабочих валках первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) клетях многофункционального стана

При прокатке тонких полос в клетях нового стана, благодаря уменьшению длины дуги захвата при переходе от первой к последней клетям, уменьшается длина очага деформации (см. выше). Такое уменьшение длины очага деформации дает преимущество предлагаемому процессу прокатки перед обычным процессом прокатки. Преимущества процесса прокатки на новом стане заключаются в том, что значительно (от 2 до 10 раз) снижается давление металла на рабочие валки. Это позволяет значительно снизить металлоемкость прокатного оборудования при проектировании и запуске в работу прокатных станов новой конструкции.

При увеличении скорости прокатки на стане новой конструкции происходит сравнительно небольшой рост динамических нагрузок в основных узлах клетей и линии привода. Механические колебания узлов клетей и линий приводов при этом становятся причиной небольшой по величине вибрации. Исследования показали, что по сравнению с последними двумя клетями сравнительно большие по величине вибрации появляются в первых трех клетях нового стана. Это связано с применением в первых трех клетях двух опорных валков. В последних двух клетях применяются четыре опорных валка.

Следует отметить, что использование только двух опорных валков оказывает определенное влияние на упругую деформацию подшипников. Однако, применение четырех опорных валков в последних двух клетях стана приводит к уменьшению как величины, так и площади упругой деформации подшипников качения. Максимальную деформацию имеют наружные кольца подшипника, при этом с уменьшением диаметров валков и увеличением количества опорных валков область наибольшей упругой деформации подшипника смещается во внутренние стороны шейки валка. Это связано с изменением схемы приложения нагрузки в валковом узле многофункционального продольно-клинового стана.

В процессе моделирования прочности и жесткости клетей нового многофункционального продольно-клинового стана было исследовано влияние температурного колебания прокатываемой полосы на НДС клетей стана. НДС вычисляли при различных усилиях прокатки.

Результаты вычислений НДС при различных температурах показали, что с повышением температуры деформируемой полосы на 50 °С упругие деформации тяжело нагруженных деталей клетей снижаются на 5 – 9%, а с повышением на 100 °С – на 20%.

Подушки, внутри которых располагаются шейки валков, могут упруго деформироваться в вертикальной и горизонтальной плоскости и поворачиваться относительно оси прокатки. Упругое перемещение в направлении действия нагрузки для подушек, располагаемых со стороны привода валка, в 1,2 раза больше, чем для подушек, располагаемых с противоположной стороны валка.

Таким образом, прочности тяжело нагруженных элементов клетей соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к станам. При этом новый многофункциональный продольно-клиновой прокатный стан имеет достаточно высокую жесткость конструкции клетей. На основании результатов исследований можно отметить, что прокатка полос на предлагаемом стане не приведет к получению готового проката с продольной и поперечной разнотолщинностью.

В соответствии с проведенным исследованием разработаны мероприятия по модернизации клетей многофункционального продольно-клинового стана. Показано, что в четвертой и пятой клетях необходимо установить гидравлическое нажимное устройство для регулирования межвалкового зазора рабочих валков. Для обеспечения равномерного распределения нагрузки и повышения срока службы подшипников предложено укреплять валки свободно плавающими подушками. В подушке четвертой и пятой клетей предложено заменить двухрядный сферический роликоподшипник на один конический роликоподшипник с большей грузоподъемностью. Предлагаемые проектные решения позволят снизить уровень деформации клетей.

#### **Источник финансирования исследований**

Статья написана в рамках финансируемой госбюджетной темы №757 МОН.ГФ.15.ЭМ4: «Разработка новой конструкции многофункционального стана для прокатки листов высокого качества».

#### **Заключение**

1. На основе результатов моделирования доказано, что величины напряжений, возникающих в деталях конструкции клетей многофункционального продольно-клинового стана в процессе прокатки, не превышают предельно допустимого напряжения.

2. Расчетом установлено, что уменьшение диаметра валков в направлении прокатки оказывает существенное влияние на уменьшение упругой деформации тяжело нагруженных элементов клетей многофункционального продольно-клинового стана, при этом применение четырех опорных валков в последних двух клетях данного стана приводит к уменьшению как величины, так и площади упругой деформации подшипников валкового узла стана.

3. Доказано, что прочностные характеристики клетей нового стана удовлетворяют условию прочности станов. При этом жесткость конструкции клетей многофункционального продольно-клинового стана соответствует требованиям ГОСТов.

4. Доказано, что величина упругой деформации элементов валков невелика, что свидетельствует о достаточно высокой жесткости узла валков рабочих клетей. Это гарантирует получение поперечной и продольной разнотолщинности и планшетности прокатываемых полос в пределах требуемых допускаемых отклонений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федоринов М.В., Файчак А.А., Чуруканов А.С. Экспериментальные исследования кинематической асимметрии на силу прокатки относительно тонких лент и полос // *Обработка материалов давлением*, 2009, № 1 (20). - С. 221 – 224.
- [2] Максимов Е.А. Улучшение планшетности полосы // *Национальная металлургия. Оборудование*. – 2005. – № 1. – С. 22–27.
- [3] Максимов Е.А. Развитие теории прокатки полос с качественной геометрической формой // *Металлург*, 2009, № 12. - С. 51 – 54.
- [4] Максимов Е.А. Использование прокатных клетей с регулируемым профилем межвалкового зазора // *Национальная металлургия. Оборудование*. – 2006. – № 11. - С. 60–65.
- [5] Браунштейн О. Е. Анализ причин разнотолщинности листов и способы ее устранения // *Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии* : сб. науч. тр. Вып. 10. Новокузнецк: СибГИУ, 2001. С. 94–99.
- [6] Болобанова Н.Л. Развитие методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков листовых станов с целью совершенствования технологии прокатки широких полос // *Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук*, - Череповец: Череповецкий государственный университет, 2015. – 123 с.
- [7] Недорезов И.В., Белоглазов Е.Г., Нестерова Н.Д. и др. Расчеты прочности и оценки ресурса долговечности действующих прокатных станов // *Сталь*, 2008, № 11. – С. 14-20.
- [8] Восканьянц А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния валковой системы действующих прокатных станов // *Производство проката*, 2001, №5. – С.35 – 81.
- [9] Сеницкий В.М., Иванов И.В., Виноградов Н.А. Анализ конструктивных схем клетей стана холодной прокатки с повышенной точностью проката // *Производство проката*, 2012, №3. – С.11 – 16.
- [10] Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Профилирование валков широкополосных станов с применением метода конечных элементов // *Производство проката*, 2012, №3. – С.6 – 10.
- [11] Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Совершенствование метода моделирования упругих деформаций валков клетки кварто и их влияния на поперечный профиль широких полос // *Производство проката*, 2012, №12. – С.14 – 18.
- [12] Патент РК №31750. Многофункциональный продольно-клиновый стан для прокатки листов из сталей и сплавов /С.А. Машеков, Б.Н. Абсадыков, Е.З. Нугман и др. // *Опубл.* 30.12. 2016 г. в БИ №18.
- [13] Копанев Д.Б. Решение задач динамики средствами MSC.Patran-Nastran. Руководство пользователя. – М.: MSC.Software Corporation, 2010. – 169 с.
- [14] Рыбников Е.К., Володин С.В., Соболев Р.Ю. Инженерные расчеты механических конструкций в системе MSC.Patran-Nastran. Части I и II. Учебное пособие. – М. MSC.Software Corporation, 2003. – 130 с. и 174 с.

#### REFERENCES

- [1] Fedorinov M.V., Fajchak A.A., Churukanov A.S. Jeksperimental'nye issledovanija kinematischej asimmetrii na silu prokatki otnositel'no tonkih lent i polos // *Obrabotka materialov davleniem*, **2009**, № 1 (20). S. 221 – 224.
- [2] Maksimov E.A. Uluchshenie planshetnosti polosity // *Nacional'naja metallurgija. Oborudovanie*. **2005**. № 1. S. 22–27.
- [3] Maksimov E.A. Razvitie teorii prokatki polos s kachestvennoj geometricheskoj formoj // *Metallurg*, **2009**, № 12. S. 51–54.
- [4] Maksimov E.A. Ispol'zovanie prokatnyh kletej s reguliruемым profilem mezhvalkovogo zazora // *Nacional'naja metallurgija. Oborudovanie*. **2006**. № 11. S. 60–65.
- [5] Braunshtejn O. E. Analiz prichin raznotolshhinnosti listov i sposoby ee ustraneniya // *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sekcii RAEN. Otdelenie metallurgii* : sb. nauch. tr. – Vyp. 10. – Novokuzneck: SibGIU, **2001**. S. 94–99.
- [6] Bolobanova N.L. Razvitie metodov modelirovanija profilirovok i uprugih deformatsij valkov listovyh stanov s cel'ju sovershenstvovanija tehnologii prokatki shirokih polos // *Dissertacija na soiskanie uch. step. kand. tehn. nauk*, - Cherepovec: Cherepoveckij gosudarstvennyj universitet, **2015**. 123 s.
- [7] Nedorezov I.V., Beloglazov E.G., Nesterova N.D. i dr. Raschety prochnosti i ocenki resursa dolgovechnosti dejstvujushhijh prokatnyh stanov // *Stal'*, **2008**, № 11. S. 14-20.
- [8] Voskan'janc A.A. Raschet naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija valkovoij sistemy dejstvujushhijh prokatnyh stanov // *Proizvodstvo prokata*, **2001**, №5. S.35 – 81.

[9] Sinickij V.M., Ivanov I.V., Vinogradov N.A. Analiz konstruktivnyh shem kletej stana holodnoj prokatki s povyshennoj tochnost'ju prokata // *Proizvodstvo prokata*, **2012**, №3. S.11 – 16.

[10] Garber Je.A., Bolobanova N.L. Profilirovanie valkov širokopolosnyh stanov s primeneniem metoda konechnykh jelementov // *Proizvodstvo prokata*, **2012**, №3. S.6 – 10.

[11] Garber Je.A., Bolobanova N.L. Sovershenstvovanie metoda modelirovaniya uprugih deformatsij valkov kleti kvarto i ih vlijaniya na poperechnyj profil' širokix polos // *Proizvodstvo prokata*, **2012**, №12. S.14 – 18.

[12] Patent RK №31750. Mnogofunkcional'nyj prodol'no-klinovyj stan dlja prokatki listov iz stalej i splavov / S.A. Mashekov, B.N. Absadykov, E.Z. Nugman i dr. // *Opubl.* 30.12. **2016** g. v BI №18.

[13] Kopanev D.B. Reshenie zadach dinamiki sredstvami MSC.Patran-Nastran. Rukovodstvo pol'zovatelja. M.: MSC.Software Corporation, **2010**. 169 s.

[14] Rybnikov E.K., Volodin S.V., Sobolev R.Ju. Inzhenernye raschety mehanicheskix konstrukcij v sisteme MSC.Patran-Nastran. Chasti I i II. Uchebnoe posobie. M. MSC.Software Corporation, **2003**. 130 s. i 174 s.

ӘОЖ: 621.771.23

**С.А. Машеков<sup>1</sup>, А.Е. Нұртазаев<sup>1</sup>, Е.З. Нұғман<sup>1</sup>, Б.Н. Абсадықов<sup>2</sup>, А.С. Машекова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

<sup>2</sup>А.Б. Бектұров атындағы Химия ғылымдары институты, Алматы қ., Қазақстан

### **БЕС ҚАПАСТЫ БОЙЛЫҚ СЫНАЛЫ ОРНАҚТА ЖҰҚА ЖОЛАҚТАРДЫ ИЛЕМДЕГЕН КЕЗДЕ ПІШІНБІЛІКТЕРДІҢ ИЛУІН ИМИТАЦИЯЛЫ МОДЕЛЬДЕУ**

**Аннотация.** Мақалада құрылымы жаңа бойлық-сыналы орнақ ұсынылған. Жаңа орнақтың пішінбілігінің серпімді деформациясы шеткі элемент әдістемесін қолданып имитациялық моделдеумен зерттелген, алынған нәтиже талданып мақалада көрсетілген. Бойлық-сыналы орнақтың пішінбілігі диаметрінің өзгеруі пішінбіліктің және басқа ауыр жүк түсетін элементтердің серпімді деформациясына қалай әсер ететіндігі анықталған. Жаңа орнақтың қапасында жеткілікті дәрежеде қаттылық және айтылған қапастар беріктік шартын қанағаттандыратындығы жұмыста көрсетілген. Ұсынылып отырған орнақта жұқа жолақты жаймалаған кезде, олардың бойлық және көлденең бағыттарында алақалыңдық пайда болмайтындығы мақалада дәлелденген. Жаңа орнақ қапастарының ауыр жүктелген элементтерін модельдеу нәтижесінде, оларды жаңғырту мәселесі шешілген.

**Түйін сөздер:** бойлық-сыналы орнақ, пішінбілік, қапастар, мойынтірек, серпімді деформация, жұқа жолақ, алақалыңдық.

#### **Сведения об авторах:**

*Машеков Серик Акимович* – профессор, доктор технических наук, Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, профессор кафедры «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства», 040925. г. Алматы, микрорайон Теректи, ул. Абая 3.

(8-727) 388-41-07 д.т. (home), (8-727) 292-11-56 р.т. (office), [mashekov.1957@mail.ru](mailto:mashekov.1957@mail.ru);

*Нуртазаев Адилжан Елеуович* – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства», Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, 050017. г. Алматы. ул. Толе-би 124 кв.306.

(8-727) 292-11-56 р.т. (office), [adilghan@mail.ru](mailto:adilghan@mail.ru);

*Нугман Ерик Зеинелович* - кандидат технических наук, доцент кафедры «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства», Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, 050028. г. Алматы. микрорайон Кокжиек 50, кв.35, (8-727) 257 – 71 – 68 (office), [nugman79@mail.ru](mailto:nugman79@mail.ru);

*Абсадықов Бахыт Нарикбаевич* - доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора, Институт химических наук имени А.Б. Бектұрова, 050028. г. Алматы. микрорайон Кокжиек 18, кв.32.

(8-727) 292-11-56 р.т. (office), [b\\_absadykov@mail.ru](mailto:b_absadykov@mail.ru);

*Машекова Айгерим Сериковна* – докторант кафедры «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства», Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, 040925. г. Алматы, микрорайон Теректи, ул. Абая 3.

(8-727) 388-41-07 д.т. (home), (8-727) 292-11-56 р.т. (office), [mashekovaigerim@mail.ru](mailto:mashekovaigerim@mail.ru)