

С.А. Машеков¹, С.А. Акпарова¹, Э.А. Тусупкалиева¹,
Н.С. Сембаев², А.М. Секербек³

¹Казахский научно-исследовательский технический университет
им. К. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

²Павлодарский государственный университет им. С.Торайгырова,
г. Павлодар, Казахстан

³Казахский аграрно-технический университет им. С.Сейфуллина,
г. Нур-Султан, Казахстан

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛАХ НОВОГО ПРОДОЛЬНО-КЛИНОВОГО СТАНА С ДВУМЯ ОПОРНЫМИ ВАЛКАМИ ВО ВСЕХ КЛЕТЯХ

Аннотация. В статье описан продольно-клиновый стан (ПКС) новой конструкции. Используя программный продукт конечно-элементного анализа MSC.visualNastran 4D и MSC. SuperForge провели компьютерное моделирование процесса продольной прокатки полосы и рассчитали напряженно-деформированное состояние (НДС) заготовки, а также НДС и вибрацию тяжело нагруженных элементов ПКС с двумя опорными валками во всех клетях. В результате моделирования установили, что полосы, прокатанные в ПКС с двумя опорными валками во всех клетях имеют продольную и поперечную разнотолщинность, которые являются следствием вибрации рабочего вала. Показали, что полосы, прокатанные в ПКС с двумя опорными валками во всех клетях имеют волнистую поверхность. Доказали, что при прокатке полос в ПКС с двумя опорными валками опасные вибрации не попадают в рабочий диапазон действующих внешних нагрузок, поэтому конструкция нового стана является достаточно надежной с точки зрения прочности при вибрациях. Для устранения дефекта «ребристость» предложили в последних клетях ПКС применить четыре опорных вала.

Ключевые слова: продольно-клиновый стан, валки, клетки, подшипники, напряжение, деформация, тонкая полоса, разнотолщинность, планшетность, вибрация.

• • •

Түйіндемe. Бұл мақалада құрылымы жаңа бойлық-сыналы орнақ (БСО) ұсынылған. Ақырғы элементтер көмегімен талдайтын MSC.visualNastran 4D және MSC.SuperForge бағдарламаларды қолдана отырып, жолақты бойлық илемдейтін процесі компьютерлік модельдеумен зерттедік. Барлық тұғырларында екі тіреуші пішінбіліктері бар бойлық-сыналы орнақта (БСО) илемделген дайындаманың кернеулі-деформациялы күйін (ҚДК) есептедік. Осы орнақтың ауыр жүктелген элементтерінің ҚДК және дірілдеуін анықтадық. Модельдеу нәтижесінде барлық тұғырларында екі тіреуші пішінбіліктері бар БСО илем-

делген жолақтардың қалыңдығы бойлық және көлденең бағыттарда өзгеретіні таптық. Осы бойлық және көлденең бағыттардағы алақалыңдық жұмысшы пішінбіліктердің дірілдеуінің нәтижесі екендігі мақалады анықталды. Барлық тұғырларында екі тіреуші пішінбіліктері бар БСО илемделген жолақтардың бетінде толқын сияқты бет бар екендігі жұмыста көрсетілді. Барлық тұғырларында екі тіреуші пішінбіліктері бар БСО жолақтарды илемдеген кезде пайда болатын қауіпті тербелістер, сырттан әсер ететін жүктемелерден пайда болатын тербелістерінің жұмысшы диапазонына түспейтіндігі мақалады дәлелденді. Сондықтан жаңа орнақтың құрылымы дірілге берік екендігі жұмыста табылды. Толқын түрі бар ақауды жою үшін БСО соңғы қапастарына төрт тіректі пішінбілікті орнату керек екендігі жұмыста ұсынылды.

Түйінді сөздер: бойлық-сыналы орнақ, пішінбілік, қапастар, мойынтіректер, кернеу, деформация, жұқа жолақ, қалыңдық айырмашылығы, тегістік, діріл.

• • •

Abstract. The longitudinal-wedge mill (LWM) of a new design is proposed in this article. By using the software product of finite element analysis MSC.visualNastran 4D and MSC.SuperForge we carried out a computer modeling of the longitudinal strip rolling process and calculated the stress-strain state (SSS) of a billet and also calculated the SSS and the vibration of heavily loaded elements of LWM with two support rolls in all stands. As a result of modeling, it was found that the strips rolled in a LWM with two support rolls in all stands have a longitudinal and lateral non-uniform thickness, which are the result of vibration of the working roll. It was shown that strips rolled in a LWM with two support rolls in all stands have a wavy surface. We proved that when rolling strips in a LWM with two support rolls, insecure vibrations do not fall into the operating range of existing external loads, this is why the design of a new mill is good enough from point of view of hardness when vibrating. To eliminate the “ribbing” defect, it was proposed to use four supporting rolls in the last stands of the LWM.

Keywords: longitudinal-wedge mill, rolls, stands, bearings, stress, deformation, thin strip, non-uniform thickness, flatness, vibration.

Введение. Листопрокатные станы являются энергоёмким оборудованием металлургической и машиностроительной отрасли, особенно мини-заводов. В настоящее время большинство крупных и сравнительно мелких станов листовой прокатки изготавливаются по индивидуальным проектам в небольшом количестве [1]. Связано это с созданием многочисленных литейно-прокатных комплексов (ЛПК), включающих в свой состав машины непрерывного литья полос и агрегаты для прокатки непрерывно-литых полос [2-4]. Большое распространение ЛПК в странах дальнего и ближнего зарубежья связано с возможностью строительства данных комплексов за короткий срок с малым капиталовложением. При этом, в данных ЛПК применяет-

ся простая и компактная технология, а также региональное сырьё в виде металлического лома. Можно отметить, что на мини-заводах выпускается специализированный сортамент продукции, ориентированный на конкретного потребителя. Все это, а также высокая производительность, малые издержки производства, появление новых технологий, а также создание нового технологического оборудования сделала ЛПК одним из наиболее динамично развивающихся и эффективных направлений в металлургии [2-4]. Анализируя материалы, приведённые в работах [2-4] можно отметить, что конструкция станов ЛПК отличается отдельными тяжёлонагруженными узлами. Изменение конструкции отдельных узлов данных станов связано со специализированным сортаментом выпускаемой продукции, их качеством и отличительными условиями работы в зависимости от технологии прокатки. Однако, по мнению авторов, для развития ЛПК необходимо максимально упростить конструкцию листопрокатных станов с одновременным увеличением качества готовых холоднокатаных листов и полос. При этом, технологический процесс прокатки должен максимально быстро настраиваться на выпуск другой продукции. Многие конструкторы при проектировании нового прокатного стана особое внимание уделяют возможности модернизации клетей существующих прокатных станов с целью уменьшения финансовых затрат [5].

Специалисты стран ближнего и дальнего зарубежья отмечают [5], что станы, установленные в ЛПК, ударной силой действуют на прокатываемую заготовку. Это особенно проявляется при захвате заготовки валками. Действие таких сил приводит к появлению значительных по величине динамических нагрузок. Возникающие в процессе прокатки динамические нагрузки могут в несколько раз превосходить технологические нагрузки, что неудовлетворительно влияет на прочность деталей прокатного стана, точность работы механизмов и качество металлопродукции. Следовательно, динамически изменяющиеся нагрузки плохо влияют на долговечность оборудования. По мнению авторов работы [6], технологическая и эксплуатационная надёжность прокатных станов зависит от динамических процессов, проходящих в тяжёлонагруженных узлах оборудования при прокатке листов и полос из сталей и сплавов. Динамическая нестабильность в работе прокатного стана появляется из-за быстрого изменения технологических параметров, ударного замыкания зазоров, неудачной конструкции узлов клетей стана, фрикционного автоколебания, пе-

риодических силовых или параметрических возмущений, аварийной ситуации.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день очень важным направлением улучшения технологии холодной прокатки листов и полос является повышение скорости прокатки на непрерывных автоматизированных станах [7]. При повышении скорости холодной прокатки, за счёт теплового эффекта деформации, увеличивается температура прокатываемой заготовки и тем самым уменьшается её сопротивление деформации. Сравнительно высокая температура, вследствие пластической деформации, уменьшает также наклеп металла. Вместе с тем, при *повышенной скорости прокатки* увеличивается гидродинамическое давление в масляной пленке и улучшается смазка прокатываемого металла, что снижает силу внешнего трения. Известно, что низкая величина сопротивлений деформации, наклепа металла и силы трения приводит к снижению энергосиловых параметров холодной прокатки. Однако, при прокатке большими скоростями, появляются многочисленные технологические проблемы. Среди этих проблем особенно можно отметить появление неконтролируемой резонансной вибрации в клетях стана, особенно при прокатке полос толщиной менее 0,5 мм [8-14]. Колебательные процессы оказывают разрушительное воздействие на тяжелонагруженные узлы прокатных станов, снижают производительность оборудования, вызывают обрыв полосы, отрицательно влияют на качество листовой продукции и тем самым повышают её себестоимость. При этом, увеличивается продольная разнотолщинность и периодические дефекты поверхности типа «ребристость», «поперечные темные полосы», а также повышается расход валков. В известных литературных источниках [12-15], возникновение вибрации связывают с такими явлениями как:

- биение и зазоры в подшипниках скольжения и качения;
- эксцентриситет и неуравновешенность валков;
- собственные колебания валков, их подушек, станины;
- дефекты проката на предыдущих технологических стадиях;
- фрикционные явления в подшипниках, шестеренных клетях и редукторах.

Из материалов работ [14,15] видно, что перечисленные выше факторы оказывают влияние на диапазоны частот собственных и вынужденных колебаний, возникающих в листопрокатных станах. Данные факторы на большую величину увеличивают фазы вибра-

ций. В системе клеть - валок – привод стана проявляется автоколебание. Данные незатухающие колебания, периодически действуют на стан и выводят из строя конструкцию стана. Всё это может привести к обрыву полосы, поломке рабочих и опорных валков, а также других деталей, т.е. аварии стана. В работах [11-13] отмечено, что присутствие дефектов на поверхности валков приводит к прямому воздействию данных дефектов на полосу. Это способствует передаче вибрации на следующую клеть прокатного стана. Такое эволюционное воздействие дефектов валков приводит к увеличению дефектов полосы, деталей клетей и непосредственно самих валков. На основе вышеприведенных материалов можно сделать вывод, что одним из применяемых методов снижения резонансной вибрации на различных станах является снижение скорости прокатки [8,14]. Данный метод снижает амплитуду колебаний, уменьшает среднюю рабочую скорость стана, повышает качество готовой листопрокатной продукции. Анализ публикаций последнего десятилетия, посвященных резонансной вибрации на скоростных станах холодной прокатки [9], показывает, что данная проблема может быть решена также комплексными мерами, прежде всего с использованием стационарных систем контроля вибрации оборудования клетей, включая визуальный контроль периодических дефектов на поверхности валков и полосы. По мнению авторов данных работ, возможным путём увеличения скорости прокатки и устранения дефектов полос являются:

- мониторинг и вибродиагностика состояния оборудования (валковая система, линия привода), в т.ч. и контроль на участке подготовки валков (дисбаланс, дефекты поверхности);

- изменение технологических режимов (скорость прокатки, обжатия, натяжения), в т.ч. изменение параметров и режима подачи смазочно-охлаждающих жидкостей, шероховатости и профилировки валков;

- конструктивные изменения прокатных клетей, в т.ч. применение устройств демпфирования вибраций, изменение жесткости элементов клетки. Анализируя материалы работ [16,17] можно сделать вывод, что в настоящее время не разработана очень точная теория, объясняющая причины возникновения колебательных процессов. Поэтому, на сегодняшний день, не разработаны эффективные способы, в полном объеме устраняющие вибрацию, действующую на стан. На основе вышеизложенных результатов можно сказать, что задача теоретического и экспериментального изучения вибрацион-

ных процессов в рабочих клетях различных листопрокатных станов является актуальной задачей для прокатного производства.

Цель работы - имитационным моделированием расчёт вибрации тяжело нагруженных элементов нового продольно-клинового стана с двумя опорными валками во всех клетях и на основе расчёта проведение корректировки конструкции клетей нового стана.

Оборудование, инструменты, материалы и методика исследования. Для прокатки тонких полос с точными геометрическими размерами был разработан новый пятиклетьевого продольно-клиновый стан (ПКС) не сложной конструкции [18]. Данный стан содержит рабочие клетки, электродвигатель, муфту, опорные и рабочие валки, станину, опорную плиту, имеющие от двигателя переменного тока привод клетки и содержат рабочие и опорные валки постоянного диаметра, а в последовательно расположенных клетях диаметр рабочих валков уменьшается в направлении прокатки. При этом вращение валков осуществляют через индивидуальную муфту, редуктор, шестеренную клетку и шпиндели. Следует отметить, что диаметры опорных валков равняются 150 мм, а рабочих валков первой, второй, третьей, четвертой и пятой клетки - 50, 75, 100, 125, 150 мм, соответственно. В предлагаемом стане горизонтальные оси верхних и нижних валков первых трёх клетей без нажимного механизма смещаются от оси прокатки в вертикальном направлении на величину $\Delta x_i = 0,25 \cdot k_n \cdot D_{pi} \cdot \alpha_i^2$, где D_{pi} – диаметр новых рабочих валков i -той клетки, мм; k_n – коэффициент переточки; α_i – допускаемый угол захвата для валков i -той клетки.

В работе с использованием программы конечно-элементного анализа PATRAN NASTRAN [19] разработали динамическую компьютерную модель ПКС и рассчитали прогиб, вибрацию и напряженно-деформированное состояние (НДС) тяжело нагруженных элементов клетей данного стана. При этом, как было сказано выше, исследовали ПКС с двумя рабочими и опорными валками во всех клетях. При конструировании нового стана по программе КОМПАС была создана объемная твердотельная модель отдельных деталей. Для осуществления конечно-элементного анализа применили объединение всех деталей в одно тело с помощью команд программы КОМПАС.

После создания трёхмерной модели нового ПКС, она была импортирована в систему MSC Nastran и произведено конечно-элементное моделирование процесса прокатки с принятыми кинема-

тическими связями. Выбрали материалы деталей, их механические и физические свойства. При умолчании из библиотеки конструктивных материалов программы MSC Nastran были назначены материалы некоторым деталям твердотельной модели стана. Далее 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 Mesh Seed нанесли 6-ти и 8-ми узловые объемные, конечно-элементную сетку и определили НДС. Силу трения между валками приняли равной 0,0868, а начальную температуру валков - 20°C. Оценили уровень полученных упругих деформаций и напряжений в объеме клеток относительно требуемых критериев прочности и ввели соответствующие изменения в конструкцию клеток.

В работе более детально были смоделированы опоры валкового узла клеток. Расчётная модель каждого сферического роликоподшипника включает в себя три типа деталей: наружное, внутреннее кольца и два ряда роликов по 18 в каждом. Следует отметить, что валки были закреплены на опорных шейках подшипниковых узлов по трем степеням свободы T_x , T_y , T_z . Материалом валков была принята Сталь 9X1 со следующими механическими свойствами: модуль упругости - 2,1+11 Па; коэффициент Пуассона - 0,283; модуль сдвига - 8,1839+10 Па. Материалом станины клеток выбрали сталь марки 40XC с модулем упругости 214×10³ МПа, коэффициентом Пуансона 0,3. Материалом других деталей стана была принята Сталь 45 со следующими механическими свойствами: модуль упругости - 2,034E+11 Па; коэффициент Пуассона - 0,29; плотность - 7833,394 кг/м³. Для расчета вибраций и изгиб валков нового стана, а также НДС тяжело нагруженных элементов стана и прокатываемых полос из алюминиевого сплава Д16 размером 0,7×400 мм использовали подкат толщиной $h_0 = 3,5$ мм. Прокатку полос производили при температуре 350 °C.

Задача исследования объемного НДС заготовки в процессе прокатки является достижение контактного, упругопластического, нелинейного, с учётом температурного режима деформирования, а также больших перемещений и деформаций. Для этих целей применялся программный продукт конечно-элементного анализа нелинейных, нестационарных процессов ОМД. Расчёт проводили в объемной постановке с учётом температурного поля. Трехмерная геометриче-

ская модель заготовки была построена в CAD программе Inventor, и импортирована в CAE программу MSC.SuperForge [20]. При создании конечно-элементной модели тонкого сляба, был использован трёхмерный объемный элемент CTETRA применяемый для моделирования трёхмерных тел. С целью снижения вычислительных затрат и уменьшения размерности конечно-элементной модели, необходимо уменьшать длину прокатываемой полосы на величину приблизительно $(0,3-0,5) \times b$ мм, где b – ширина прокатываемой полосы. Данное упрощение позволяет моделировать процесс прокатки на уровне установившегося режима без больших вычислительных затрат. Время расчёта процесса прокатки в каждой клети составила 30 мин. на компьютере Pentium Duo с тактовой частотой 3,4 ГГц и оперативной памятью 2 Гбайта.

В MSC.SuperForge инструменты принимаются абсолютно жёсткими и обеспечивают только свойства теплопроводности и теплопередачи, т.е. удельная теплопроводность, удельная теплоёмкость и плотность приняты во внимание, а механические свойства игнорируются. Из базы данных материалов назначили материал инструмента сталь 9X1. Для этого материала плотность и тепловые свойства программа назначены по умолчанию. Взаимодействие между жёстким валком и деформируемым материалом заготовки моделируется с помощью контактных поверхностей, которые описывают контактные условия между поверхностями валков и поверхностью сравнительно толстого листа. В процессе моделирования контактные условия постоянно обновляются, отражая вращение валков и деформацию материала, что позволяет моделировать скольжение между валком и материалом обрабатываемой заготовки. Контакт между валком и заготовкой смоделирован трением по Кулону, коэффициент трения был принят 0,3. Для прокатки полосы в первой, второй, третьей, четвертой и пятой клети, соответственно, 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; единичное обжатие – $\varepsilon_1 = 26,4\%$, $\varepsilon_2 = 33,7\%$, $\varepsilon_3 = 32,8\%$, $\varepsilon_4 = 26,8\%$, $\varepsilon_5 = 16,7\%$; скорость полосы – $u_1 = 0,5$ м/с, $u_2 = 0,68$ м/с, $u_3 = 1,03$ м/с, $u_4 = 1,526$ м/с, $u_5 = 2,085$ м/с; диаметр опорного валка всех клеток – $D_{оп} = 150$ мм; диаметр рабочего валка – $D_{P1} = 150$ мм, $D_{P2} = 125$ мм, $D_{P3} = 100$ мм, $D_{P4} = 75$ мм, $D_{P5} = 50$ мм.

Результаты и обсуждение. Проведённые на конечно-элементных моделях расчёты показали, что под действием приложенных

вертикальных сил рабочие валки прогибаются в направлении действия силы. При этом шейка валков упруго деформируется в этом же направлении, причём максимальное значение суммарного поля перемещений упругих деформаций рабочих валков для первой, второй, третьей, четвертой, пятой клетки, соответственно, составляют: 0,016; 0,0094; 0,0088; 0,0094; 0,0143 мм (рисунок 1). В целом величина упругой деформации и перемещения элементов валков невелика, что свидетельствует о достаточно высокой жесткости узла валков рабочей клетки. При этом картина распределения суммарных перемещений в трёх направлениях согласуется с деформированной формой валков. Однако, суммарные перемещения по длине бочки рабочих валков распределяются неравномерно. Максимальное значение перемещения наблюдается в серединной части рабочих валков. Это может привести к образованию поперечной разнотолщинности и ухудшению планшетности прокатываемых полос. По мнению авторов образование поперечной разнотолщинности и ухудшение планшетности толщин полос не будет превышать допустимое отклонение.

На основе полученных данных отметим, что компенсацию перемещения рабочих валков клетей нового стана можно осуществлять за счёт увеличения выпуклости рабочих валков при каждой новой завалке. При этом, рабочие валки клетей нового стана необходимо готовить с профилировками 0,009 – 0,015 мм. Проведённые исследования показали, что при горячей прокатке полос из алюминиевого сплава Д16 шириной 400 мм по сечению валков не возникают большие по величине эквивалентные напряжения (рисунок 2). Максимальное напряжение по Мизесу для первой, второй, третьей, четвертой, пятой клетки соответственно составляет: 120,1; 54,7; 42,9; 37,2; 29,5 МПа. Причём максимальные напряжения возникают в шейках валков стана. Полученное максимальное значение эквивалентного напряжения не превышает максимально допустимое значение предела прочности стали 9Х1 (880 МПа). Следует отметить, что распределение запаса прочности для валков в целом удовлетворяет условие прочности, при принятом коэффициенте запаса прочности соответственно 10.

Заметим, что полученные расчетные значения эквивалентных напряжений по Мизесу не превышают верхнюю границу допустимых контактно-усталостных напряжений. Это обстоятельство говорит о том, что даже небольшое отклонение от технологического процесса не приведёт к появлению дефектов на поверхности валков: трещин, выкрашивания, отколов.

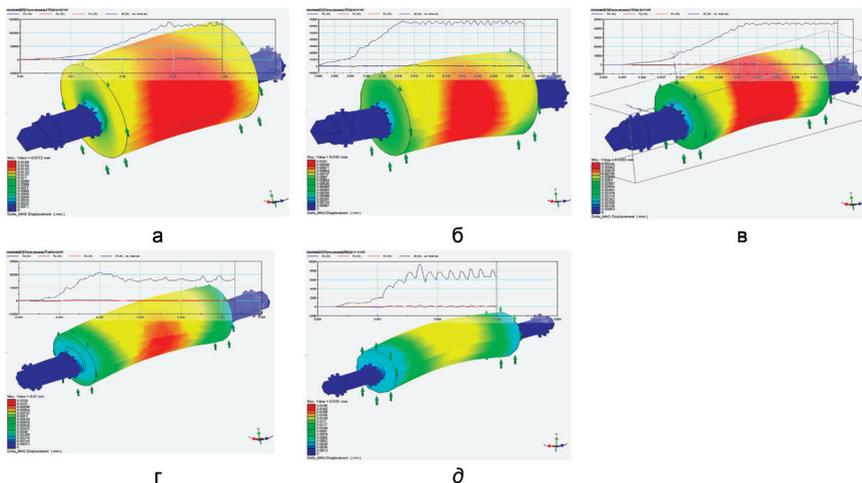


Рисунок 1 – Картина распределения суммарного поля перемещений упругих деформаций рабочих валков и колебаний усилия деформации при прокатке полос в первой (а) , второй (б) , третьей (в) , четвертой (г) и пятой (д) клетки нового продольно-клинового стана

Подушки упруго деформируются в вертикальной и горизонтальной плоскости и на небольшой угол ($\gamma_{\max} = 0,00016^\circ$) поворачиваются относительно оси прокатки. Упругое перемещение в направлении действия нагрузки для подушек, располагаемых со стороны привода валка 1,2 раза больше, чем для подушек, располагаемых с противоположной стороны валка. Известно, что при работе оборудования особенно опасными являются резонансные колебания, возникающие при совпадении собственной частоты конструкции и частоты внешних сил. Поэтому важным является определение собственной частоты и частоты внешних сил. Одним из основных возбудителей резонансных частот в конструкции прокатных станов, является рабочая частота вращения привода рабочих валков, распространяющая вибрации на стан.

Проведённые исследования показали, что конечно-элементная сетка значительно влияет на точность полученных значений собственных частот и частот внешних сил при такой сложной пространственной конфигурации прокатного стана. Установлено, что при более мелком разбиении достигается более хорошая точность полученных результатов. Однако, по мнению авторов, аппроксимация трехмерной модели нового ПКС большим количеством малых четы-

рёхузловых тетраэдров приводит к системе алгебраических уравнений большого порядка, что снижает скорость выполнения расчёта. В связи с получением таких результатов наносилось различное количество малых четырёхузловых тетраэдров на конечно-элементную модель ПКС. При этом, последовательно решились несколько задач с различными возрастающими степенями дискретизации. Считали, что в случае достижения одинаковых по величине собственных частот и частот внешних сил при последовательном изменении густоты сетки достигается рациональный уровень дискретизации. Следует отметить, что при разработке расчетной схемы, сгущенные сетки конечных элементов применялись в местах предполагаемой концентрации вибрации.

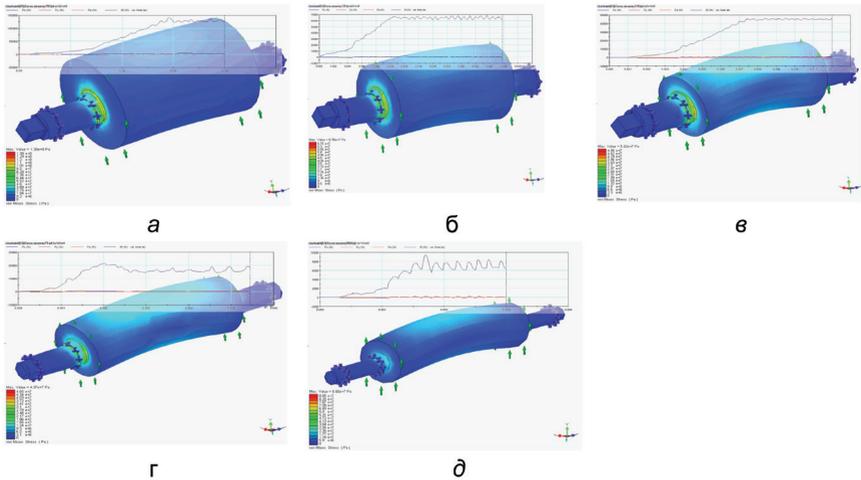


Рисунок 2 – Картина распределения эквивалентных напряжений в рабочих валках и колебаний усилия деформации при прокатке полос в первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) клетки нового продольно-клинового стана

Рациональная конечно-элементная модель (КЭМ) клеток нового стана:

- 1-я клетка прокатного стана из 201745 элементов и 241923 узлов;
- 2-я клетка прокатного стана из 188505 элементов и 231688 узлов;
- 3-я клетка прокатного стана из 196113 элементов и 234545 узлов;
- 4-я клетка прокатного стана из 163409 элементов и 201421 узлов;
- 5-я клетка прокатного стана из 151501 элементов и 182875 узлов.

При этом, упругие связи между узлами клетки моделировали пружинно – демпферным элементом CBUSH со следующими свойствами:

- жёсткость по перемещениям T_x, T_y, T_z - $1, E+10$ Н/м;
- жёсткость по вращениям R_x, R_y, R_z - $1, E+8$ Н/м;
- коэффициент структурного демпфирования 0,04.

Исследованиями установлено, что при увеличении скорости прокатки на стане новой конструкции происходит сравнительно большой рост динамических нагрузок в основных узлах клеток и линии привода. Механические колебания узлов клеток и линий приводов становятся причиной появления вибрации. По мнению авторов, основными причинами возникновения вибраций являются: различные биения, а также зазоры в подшипниках; эксцентриситет и неравномерность валков, шпинделей и т.д. при повышении скорости прокатки; собственные колебания подушек валков. Результаты исследования показали, что, по сравнению с первыми тремя клетями, в последних двух клетях нового стана появляются сравнительно большие по величине вынужденные колебания, возбуждающиеся внешними периодически изменяющимися силами и скоростью прокатки (таблица 1, рисунки 1 и 2).

Таблица 1 – Величины собственных и вынужденных колебаний при прокатке полос в продольно клиновом стане с двумя станинами

№ клетки	Собственные частоты клеток стана, Гц						Частота вынужденного колебания, Гц	Запас до резонансной частоты:					
	1-ая	2-ая	3-ая	4-ая	5-ая	6-ая		1-ой	2-ой	3-ой	4-ой	5-ой	6-ой
1	15.36	30.42	60.7	90.7	122,3	153.9	3.91	3.9	7.8	15.5	23.2	31.3	39.4
2	18.63	39.36	69.6	95.7	132.4	162.8	8.74	2.2	4.5	8.0	11.0	15.2	18.6
3	23.91	53.13	84.4	114.5	144.3	174.1	12.59	1.9	4.2	6.7	9.1	11.5	13.8
4	35.63	65.7	95.8	125.8	155.7	185.3	16.83	2.2	3.9	5.7	7.5	9.3	11.0
5	44.83	74.9	106.5	134.8	164.5	194.2	19.34	2.3	3.9	5.5	6.97	8.51	10.1

На основе анализа полученных данных пришли к выводу, что главной причиной появления сравнительно повышенной резонансной вибрации в валках предлагаемого стана является отсутствие в конструкции стана достаточно жёстких опор со стороны опорных валков. Например, присутствие четырёх опорных валков позволило бы строго горизонтально расположить валки ПКС и тем самым

гасить вибрацию при различных скоростях прокатки. При этом валковые узлы должны иметь достаточно высокую жёсткость в горизонтальной плоскости. Необходимо отметить, что в исследуемом случае строго горизонтально не располагались шпиндели. Поэтому отсутствовала достаточно высокая жёсткость валков в горизонтальной плоскости. Всё вышеотмеченное привело к перемещению рабочих валков в вертикальной и горизонтальной плоскости. В результате даже небольшие зазоры между подшипниками, подушками и окнами станин, вызванные допусками посадок и износом, приводили к горизонтальным смещениям вертикальной осевой плоскости рабочих валков относительно опорных, т.е. рабочие валки оказывались в неустойчивом положении, а их оси перекашивали. Негативным последствием этого является появление непрогнозируемого колебания межвалковых зазоров. На основе численного моделирования по CAE программе MSC.SuperForge получены следующие результаты:

1. Усилия горячей прокатки, возникающие в клетях нового стана, значительно снижаются (от 2 до 10 раз) в направлении прокатки при обработке в новом стане (рисунки 1 и 2);

2. При прокатке в первой клетке интенсивности деформации (Γ) и напряжения (σ_i) в начальный момент прокатки сосредотачиваются в зонах захвата металла валками стана. С увеличением обжатия акцент Γ и σ_i переносятся от поверхности к центру и краям деформируемой заготовки. Дальнейшее увеличение обжатий приводит к более равномерному распределению Γ и σ_i в центральной зоне заготовки, а в конце прохода интенсивности деформации и напряжения сосредотачиваются в центре входной зоны очага деформации;

3. В процессе прокатки в первой клетке температура в зонах контакта «горячий металл – валки» повышается за счёт выделения тепла формоизменения и трения. Однако, в конце прохода температура заготовки понижается особенно на участках находящиеся в выходной части очага деформации;

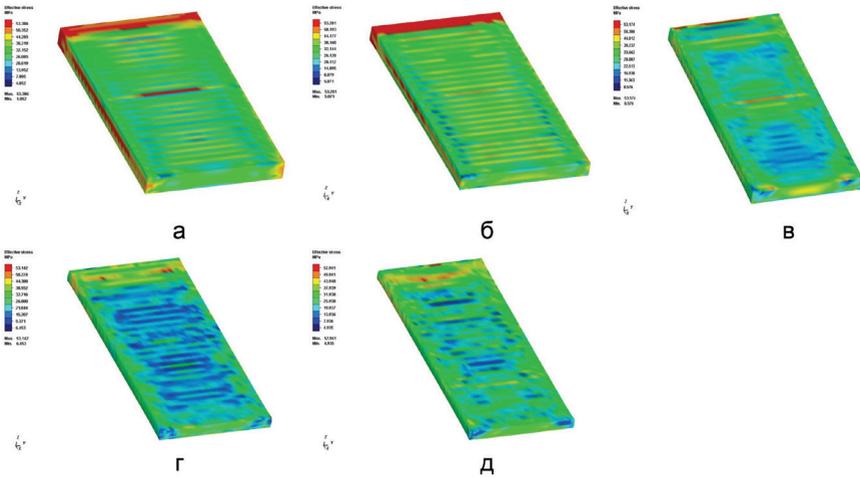
4. При прокатке во второй, третьей, четвертой и пятой клетях зоны интенсивного сосредоточения Γ и σ_i (рисунок 3) в процессе прокатки перемещаются постепенно от центра к периферийной зоне очага деформации;

5. При прокатке во второй, третьей, четвертой и пятой клетях зоны, с повышенной температурой, перемещаются вместе с очагом

деформации от начала до конца прохода. При этом охлаждаются зоны контакта деформируемого металла с валком и зоны находящиеся вне очага деформации.

Известно [7], что в прокатном производстве существенное значение имеет качество листовой продукции. При этом, на качество горячее- и холоднокатаного проката большое влияние оказывает поперечная и продольная разнотолщинность листового проката. В большинстве случаев на показатели качества полос оказывает влияние деформационно-скоростные режимы прокатки, а также натяжений и усилий. При этом, определенную роль выполняют такие технологические параметры, как профиль подката, марка стали, качество смазки, шероховатость подката и валков, упругость клетей и валков, их вибрация, мощность прокатных двигателей. Анализируя полученные данные пришли к выводу, что увеличение скорости полосы больше 5 м/с в рабочих клетях ПКС новой конструкции приводит к возникновению больших неконтролируемых высокочастотных резонансных колебаний. Данные колебания могут негативно влиять на качество поверхности горяче- холоднокатаных полос (дефект поперечная «ребристость»), приводящих к их порывам и увеличению себестоимости продукции.

При оценке собственных частот станины в сборе с валковым узлом получены следующие результаты: при прокатке в разделе «методика» приведенными скоростями прокатки возникает вертикальное колебание растяжения-сжатия стоек станины с валковым узлом и перекадиной в диапазоне частот 23-46 Гц, при этом вынужденное колебание валкового узла изменяется в диапазоне 3-13 Гц. Исследованиями установлено, что при вибрациях ПКС с двумя опорными валками во всех клетях (таблица 1) возникает дефект поперечная «ребристость», имеющая волнистую поверхность (рисунок 3). Данный дефект наблюдается как чередующиеся параллельные полосы с различными цветами. Период полос изменяется в диапазоне от 12 до 16 мм поперек направления прокатки. Изучение колебательных процессов позволило определить, что при прокатке во всех клетях предлагаемого стана появляется вибрация, что сопровождается колебаниями прокатываемой полосы в последних межклетевых промежутках. Время роста амплитуды вибрации равняется 2-3 с. Однако, величина вибрации не велика, что исключает обрыв полосы и сравнительно увеличивает точность получаемой полосы.



а – первая клеть ; б – вторая клеть; в – третья клеть; г – четвертая клеть;
 д – пятая клеть

Рисунок 3 – Форма полосы и картина распределение интенсивности напряжений при прокатке полос на продольно-клиновом стане с двумя станинами

Следует отметить, что такие факторы, как вибрация станины и валков (рисунки 1,2), дефекты валков и полосы могут накладываться друг на друга в широком диапазоне частот, что в свою очередь, способствует развитию фазы вибраций (начинают проявляться автоколебания в механической системе). Данные незатухающие колебания, поддерживаемые самой системой с определённой периодичностью, весьма плохо влияют на конструкцию стана. Всё это может привести к поломкам тяжело нагруженных элементов нового стана и тем самым к возникновению аварий на стане, таких как обрыв полосы, повреждение рабочих и опорных валков. Исследования показали, что при прокатке полос в последних двух клетях нового стана появляются сравнительно большие по величине вынужденные колебания (рисунки 1, 2). Однако их величина существенно ниже, чем при прокатке полос в существующих станах. Необходимо отметить, что наличие поверхностных дефектов валков может оказывать непосредственное воздействие на полосу и передавать вибрацию на следующую прокатную клеть. Вследствие этого может увеличиваться дефектность полосы, деталей клетей и непосредственно самих валков. На основе полученных результатов предлагается уменьшать вибрацию путем применения в последних

двух клетях четырех опорных валков. При этом, для вывода собственной частоты за рабочий диапазон предлагается изменить конструкцию ПКС путем ввода в ПКС третьей станины и применить шпиндели специальной конструкции.

Выводы. 1. Колебательные процессы, возникающие в прокатных станах, являются одной из самых распространённых проблем в современной прокатной промышленности. Они оказывают разрушительное воздействие на узлы агрегатов, а также негативно сказываются на качестве выпускаемого металла.

2. При проектировании прокатных станов необходимо оценить спектр собственных частот конструкции и со значительной долей вероятности прогнозировать риск возникновения резонансов в известном диапазоне частот внешних воздействий. Во избежание или для существенного уменьшения вероятности появления резонансов необходимо, чтобы большая часть нижних собственных частот конструкции стана не лежала в диапазоне частот внешних воздействий.

3. Самым распространённым дефектом, возникающим при вибрациях стана, является дефект «ребристость» возникающий в виде чередующиеся параллельных темных и светлых полос с периодом 10-20 мм поперёк направления прокатки. В работе для устранения этих дефектов предлагается применение четырех опорных валков.

4. При малых скоростях прокатки могут появиться дефекты смешанной формы (разнотолщинность, неудовлетворительная планшетность, различия в шероховатости, биения) имеющие различную длину волны и амплитуды, которые в определенных пределах не видимы или не оказывают возмущающего эффекта, однако могут проявляться при изготовлении готового листа соответствующей продукции.

5. На основе результатов компьютерного моделирования установлено, что в клетях ПКС новой конструкции появляются вынужденные колебания основных узлов клетей, зависящие от скорости прокатки. Резонансное явление может возникнуть, когда гармоники собственных частот становятся близкими по значению к частоте резонанса системы. Иницилирующими факторами резонанса могут быть воздействия изменяющихся сил в очаге деформации и узлах привода.

Список литературы

1 Федонин О.В., Унру С.Я., Немкин М.В., Даниленко Д.Н., Кандауров Е.Л. Перспективы развития производства холоднокатаного проката на мировом и российском рынках// Металлург, 2011. № 5. - С. 9-17. [Fedonin O.V.,

Unru S.Ya., Nemkin M.V., Danilenko D.N., Kandaurov E.L. Perspektivy` razvitiya proizvodstva kholodnokatanogo prokata na mirovom I rossijskom ry`nkakh// Metallurg, 2011.-N5.-S.9-17]

2 *Зиновьев А.В.* Технология прокатки и смотки тонких полос на литейно-прокатном агрегате// Новости черной металлургии за рубежом. 2006.- № 2.-С. 49-52. [Zinov`yev A.V. Tekhnologiya prokatki I smotki tonkikh polos na litejno-prokatnom aggregate//Novosti chyornoj metallurgii za rubezhom, 2006.-N2.-S.49-52]

3 *Салганик В.М., Гун А.С., Карандаев А.А. Радионов.* Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. – 506 с. [Salganik V.M., Gun A.S., Karandayev A.A. Tonkoslyabovuy`e litejno-prokatny`ye agregaty` dlya proizvodstva stal`ny`kh polos/ M.:MGTU im N.E. Baumana, 2003.-506s]

4 *Grydin O., Batyrshina E., Bach Fr.W.* Mathematische Modellierung des Giebens von dunnen Blechen nach dem Zwei-Rollen-Verfahren // Proc. of ANSYS Conference, 27th CADFEM Users' Meeting, Leipzig. – 2009. – 2.11.15.– S. 1-9.

5 *Гун И.Г., Салганик В.М., Пивоваров Ф.В. и др.* Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты: развитие технологии, компоновок и оборудования / // Черная металлургия: Бюл. НТ и ИЭ - М.: Черметинформация, 2000. - Вып. 3-4. - С. 23-25. [Gun I.G., Salganik V.M., Pivovarov F.V. I dr. Tonkoslyabovuy`e litejno-prokatny`ye agregaty`: razvitiye tekhnologii, komponovok I oborudovaniya// Chyornaya metallurgiya: Byull. NT I IE, M.: Chermetinformatsy`ya, 2000.-Vy`p.3-4.- S.23-25]

6 *Ефименко С.П., Тарасевич Ю.Ф.* Перспектива производства особотонкого горячекатаного листа // Тр. Третьего конгр. прокатчиков. - М.: Черметинформация, 2008. - С. 60-65. [Efimenko S.P., Tarasevich Yu.F. Perspektiva proizvodstva osobotonkogo goryachekatanogo lista// Tr. Tret`ego kongr. Prokatchikov.- M.: Chermetinformatsy`ya, 2008.- S.60-65]

7 *Бобих П., Бореи Р., Ротта М.* Тенденции развития технологии и оборудования для производства высококачественной полосовой стали: Тр. Четв. Конгр. прокатчиков. Магнитогорск. 16-19 октября 2001 г. М.: Черметинформация». 2002.- С. 54-57. [Bobikh P., Borej R., Rotta M. Tendentsii razvitiya tekhnologii I oborudovaniya dlya proizvodstva vy`sikokachestvennoj polosnoj stali:Tr. Chetv. Kongr.prokatchikov. Magnitogorsk. 16-19 oktyabrya 2001g., M: Chermetinformatsy`ya, 2002.- S.54-57]

8 *Веренев В.В., Большаков В.И., Крот П.В.* Исследование и разработка систем вибродиагностики прокатного оборудования // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов. – Вып.5. –К.: Наукова думка, 2002.– С.367–373. [Verenev V.V., Bol`shakov V.I., Krot P.V. Issledovanie I razrabotka system vibrodiagnostiki prokatnogo oborudovaniya// Fundamental`ny`ye I prikladny`ye problemy` chyornoj metallurgii. Sb. Nauchny`kh trudov.- Vy`p.5.- K.: Naukova dumka, 2002.- S.367-373]

9 *Маркушевский Н.А.* Моделирование и исследование колебательных процессов в приводах листовых прокатных станов // Современная техника и

технологии. 2015. -№ 9 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2015/09/7484>. [Markushevskij N.A. Modelirovanie I issledovanie kolebatel'ny`kh protsessov v privodakh listovy`kh prokatny`kh stanov // Sovremennaya tekhnika I tehnologii. 2015.-N9 [Elektronny` resurs]: URL: <http://technology.snauka.ru/2015/09/7484>]

10 *Кожевников А.В.* Исследование, моделирование и устранение вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки : Дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 : Череповец, 2004.- 160 с. [Kozhevnikov A.V. Issledovaniye, modelirovaniye I ustranenuye vibratsy`j v rabochikh kletyakh stanov kholodnoj prokatki: Dis. Kand,tekh.nauk: 05.02.13: Cherepovtts, 2004.- 160s.]

11 Automaticvibration analysis and trending for complex drives / G.Helekal, R.Luftensteiner, C.Riegler, H.Aigner // *Steel Technology*, October, 2002, p.43–49.

12 *Гарбер Э.А., Наумченко В.П. и др* Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов //Производство проката. – 2003. – №1– С. 10–12. [Garber E.A., Naumchenko V.P. I dr. Issledovaniye prichin voznikoveniya kolebanij v kletyakh neprery`vny`kh prokatny`kh stanov// Proizvodstvo prokata, – 2003. – №1– S. 10–12.]

13 *Рыбаков Ю.В., Субботин Г.Н.* Определение источников вибрации, вызывающих явление резонанса на станах холодной прокатки // Производство проката, 2003. – №10.– С. 13–16. [Ry`bakov Yu.V., Subbotin G.N. Opredelenie istochnikov vibratsii, vy`zy`, vayushhikh yavlenie rezonansa na stanakh kholodnoj prokatki // Proizvodstvo prokata, 2003. – №10.– S. 13–16]

14 *Hardwick B.R.* A technique for the detection and measurement of chatter marks on roll surfaces // *Steel Technology*, April, 2003, p.64–70.

15 *Гарбер Э.А., Наумченко В.П., Кожевников А.В., Самойлов В.И., Рыбаков Ю.В.* Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов // Производство проката, 2003.- №1. –С. 10-13. [Garber E.A., Naumchenko V.P., Kozhevnikov A.V., Samojlov V.I., Ry`bakov Yu.V. Issledovaniye prichin voznikoveniya kolebanij v kletyakh neprery`vny`kh prokatny`kh stanov// Proizvodstvo prokata, 2003.- №1. –S. 10-13.]

16 *Гарбер Э.А., Кожевников А.В., Наумченко В.П., Шадрунова И.А., Павлов С.И.* Исследование, моделирование и устранение вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки // Производство проката. 2004.– № 6. — С. 34-41. [Garber E.A., Kozhevnikov A.V., Naumchenko V.P., Shadrunova I.A., Pavlov S.I. Issledovaniya, modelirovaniye I ustranenuye vibratsy`j v rabochikh kletyakh stanov kholodnoj prokatki// Proizvodstvo prokata, 2004.– № 6.- S. 34-41.]

17 *Мальцев А.А., Русаков А.Д., Даева Н.Н.* Прогнозирование долговечности деталей главной линии “ПНК-320” // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2012.- №4 - С. 86-93. [Mal`tsev A.A., Rusakov A.D., Daeva N.N. Prognozirovaniye dolgovechnosti detalej glavnoy linii “PNK-320” // Vestnik MGТУ im. N.E. Baumana. Ser. “Mashinostroyeniye”. 2012.-N4.-S.86-93]

18 Патент 20969. Непрерывный стан для прокатки полос из сталей и сплавов/ С.А. Машеков, Е.З. Нугман, А.С. Машекова, и др. //Опубл.

16.03.2009, Бюл. №3. [Patent 20969. Nepreryvnyj stan dlya prokatki polos iz stalej I splavov/ S.A. Mashekov, E.Z.Nugman, A.S. Masheкова, I dr.// Opubl. 16.03.2009, Вуul.. №3.]

19 Рыбников Е.К., Володин С.В., Соболев Р.Ю. Инженерные расчеты механических конструкций в системе MSC.Patran-Nastran. Ч. I-II. – М. MSC. Software Corporation, 2003. – 130,174 с. [Rybnikov E.K., Volodin S.V., Sobolev R.Yu., Inzhenernyye raschyoty mekhanicheskikh konstruktsiy v sisteme MSC. Patran-Nastran. Ch. I i II. – М. MSC.Software Corporation, 2003. – 130, 174s.]

20 Солдаткин А., Голенков Ю., и др. Программа MSC.SuperForge как один из элементов системы виртуального производства и управления качеством изделий.//САПР и графика, 2000.- №7.- с. 11-13. [Soldatkin A., Golenkov Yu., I dr. Programma MSC SuperForge kak odin iz elementov sistemy virtual'nogo proizvodstva I upravleniya kachestvom izdelij // SAPR I grafika, 2000.- №7.- s. 11-13.]

Машеков С.А. - доктор технических наук, профессор.

Тусупкалиева Э.А. - доктор PhD, e-mail: elatus78@mail.ru.

Сембаев Н.С. - кандидат технических наук, e-mail: n.sembaev@mail.ru

Секербек А.М. - e-mail: sekerbek.aymangul@mail.ru

Акпарова С.А. - e-mail: simba_94-25@mail.ru