

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ТОНКИХ ПОЛОС И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОДОЛЬНО-КЛИНОВОГО СТАНА

*Машеков Серик Акимович** – д.т.н., профессор, Satbayev University, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22. Тел: (8-727) 257 – 70 – 46, e-mail: mashekov.1957@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9577-2219>

Уразбаева Раушан Есмахановна – аспирант КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: raushjan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0978-270X>

Түкібай Асылзат Ахметқызы – доктор PhD, Satbayev University, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22. Тел: (8-727) 292 – 11 – 56, e-mail: asilzat1978@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3074-4505>

Тусупкалиева Эльмира Адиетовна – доктор PhD, Satbayev University, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22. Тел: : (8-727) 257 – 71 – 68, e-mail: elatus78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5287-113X>

Аннотация. В статье предложен стан новой конструкции. Используя программный продукт конечно-элементного (КЭ) анализа MSC.visualNastran 4D провели компьютерное моделирование процесса продольной холодной прокатки полосы из латуни Л63 и рассчитали напряженно-деформированное состояние и вибрацию тяжело нагруженных элементов многофункционального продольно-клинового стана (МПКС) с двумя и тремя станинами. В результате моделирования установили, что полосы прокатанные МПКС с двумя станинами имеют продольную и поперечную разнотолщинность, которая является следствием вибрации рабочего вала. Показали, что прокатанные в МПКС с тремя станинами полосы не имеют волнистую поверхность. Доказали, что при прокатке в МПКС опасные вибрации не попадают в рабочий диапазон действующих внешних нагрузок, поэтому конструкция нового стана является достаточно хорошим с точки зрения прочности при вибрациях.

Ключевые слова: многофункциональный продольно-клиновый стан, валки, клетки, подшипники, станина, тонкая полоса, вибрация.

COMPUTER SIMULATION OF THE THIN STRIPS ROLLING PROCESS AND PERFECTION OF THE DESIGN OF THE LONG-WEDGE MILL

Annotation. The article proposed the camp of the new design. Using the software product of the finite element (CE) analysis MSC.visualNastran 4D, computer simulations were made of the process of longitudinal cold rolling of a strip of brass L63 and calculated the stress-strain state and vibration of heavily loaded elements of a multifunctional longitudinal wedge mill (MPCS) with two and three beds. As a result of the simulation, it was established that the rolled stripes of the MPCs with two beds have longitudinal and transverse thickness variations, which is a consequence of the vibration of the work roll. It was shown that the stripes rolled in the IPCC with three beds do not have a wavy surface. They proved that when rolling in MPX, dangerous vibrations do not fall within the operating range of external loads, therefore the design of the new mill is quite good from the point of view of vibration strength.

Key words: multifunctional wedge mill, rolls, stands, bearings, bed, thin strip, vibration.

Введение

На протяжении последних трех десятилетий требования потребителей к качеству холоднокатаных тонких полос существенно возросло [1,5]. В связи с этим возросло требования производителей прокатной продукции к покупаемым прокатным станам. К требованиям производителей листового проката можно отнести, расширение номенклатуры выпускаемой продукции, повышение качества прокатываемых листов, увеличение производительности при неизменных или даже меньших производственных затратах.

Известно [2,9], что увеличение скорости прокатки приводит к повышению динамических нагрузок и вибрации стана, при этом возникают резонансные явления. Данное явление сопровождается с существенным ростом вибрации основных узлов прокатных клетей. Весомый уровень вибрации негативно влияет на точность прокатки, непосредственно связан с появлением на полосе дефекта «ребристость» и может стать причиной обрыва полосы.

В связи с вышесказанными проблемами производители листового проката вынуждены проводить прокатку тонких полос при скоростях, которые ниже предусмотренных при проектировании стана. При этом, в момент возникновения резонанса дополнительно снижают скорость прокатки для стабилизации процесса, что снижает производительность стана.

В странах СНГ проблема появления большой вибрации на высоких скоростях (более 15 м/с) в станах холодной прокатки возникла уже достаточно давно [5]. Актуальность проблемы вибраций на зарубежных странах, где скорости прокатки существенно выше (20–25 м/с), можно оценить по материалам большого количества публикаций [2-14]. На всех станах

появление вибрации до максимального уровня снижает производительность, уменьшает качество тонких полос по разнотолщинности, планшентности и периодическим дефектам поверхности типа «ребристость», «поперечные теневые полосы», а также увеличивает расход валков. В данное время основным, широко применяемым на практике способом снижения резонансной вибрацией в станах дальнего и ближнего зарубежья, является уменьшение скорости прокатки, что повышает амплитуду колебаний, однако понижает среднюю рабочую скорость стана. В некоторых работах [3,4,14] показано, что повышение скорости прокатки также может уменьшить фрикционные колебания, но появления обрыва полос при такой скорости прокатки не позволяет применить такой способ листопркатных станах.

В последние десятилетия большое внимание уделяется механизму процесса взаимодействия элементов прокатного стана [3,4,14] и рассматривается прокатный стан как динамически объект [13,17]. Анализирую в настоящее время применяемую теорию возникновения вибраций на станах холодной прокатки можно прийти к выводу, что причины возникновения критических вибраций, «гудения» клетей и поверхностных дефектов является периодический удар валкового узла клетки о станину [2,9].

Рассмотрев материалы работ [2,5,9] по резонансной вибрации на скоростных станах холодной прокатки можно прийти к выводу, что обсуждаемую проблему можно решить путем применение стационарных систем контроля вибрации тяжело нагруженных узлов клетей, а также визуальный контроль циклически появляемых дефектов на поверхности валков и полосы. Следует отметить, что решение проблем вибрации для станов холодной прокатки в странах дальнего зарубежья ведутся в двух направлениях [6,15]:

- 1) разработка систем контроля вибрации и диагностики технического состояния станов;
- 2) создание способов и устройств демпфирования колебаний.

Проектировщиками таких систем являются следующие компании: Vold Solution Automation (США) с системами «QuartzGrind» и «QuartzMill», AMTRI (Великобритания) с системой наблюдения «AVAS», IAS – Industrial Automation Systems (Австралия) с системой «VIDAS chatter monitor», SMS Demag (Германия) с системой «MIDAS», а также фирма SensorScript (США) с системой «ChatterMD» и другие. Некоторые фирмы, кроме вышеприведенных системам контроля вибрации, предлагают различные технические решения, направленные на демпфирование вибрации.

Применение в пульте управления станами систем контроля вибрации дает возможность операторам проводить прокатку тонких полос на повышенной скорости и достигать технологически допустимого по уровню вибрации предела скорости [14]. Однако диагностические возможности многих зарубежных систем исчерпываются выдачей оператору предупреждения о превышении амплитуды спектра вибраций в выбранных диапазонах частот некоторого заданного порогового уровня. Это не позволяет в режиме реального времени работы прокатного стана оценить влияние отдельных элементов оборудования на возникновение резонансных вибраций и, следовательно, целенаправленно увеличить пороговый уровень скорости прокатки путем ревизии или замены отдельных узлов оборудования, которые являются основными источниками резонансной вибрации и ограничивают возможную максимальную скорость прокатки.

В связи с вышесказанным теоретическое исследование вибрационных процессов в непрерывных станах холодной прокатки для исключения резонансных вибраций, снижающих качество проката и эффективность работы оборудования, является актуальной научно-технической задачей.

По нашему мнению лучшим методом уменьшения резонансной вибрации является усовершенствование конструкции стана, оптимизации режимов обжатий и усилия горячей прокатки. С этой целью нами предложена гидравлическая система для погашения вибрации в новом многофункциональном прокатном стане [7].

Целью данной работы являлось динамическое моделирование в среде MSC.visualNastran 4D продольную прокатку полос на многофункциональном продольно-

клиновом стане и путем исследования вибрации валков усовершенствование конструкции нового стана.

Оборудования, инструменты, материалы и методика исследования. Для прокатки тонких полос с точными геометрическими размерами нами разработан новый многофункциональный продольно-клиновый стан (МПКС) не сложной конструкции.

Данный стан содержит, электродвигатели, редукторы, шестеренные клетки, универсальные шпиндели, муфты, клетки с рабочими и опорными валками. При этом в первых трех клетях установлены два, а в последних двух клетях, четыре опорных валка. Вращение уменьшающихся в направлении прокатки рабочих валков осуществляется 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, регулировку расстояния между рабочими валками производят едиными червячными нажимными механизмами, расположенными сверху и снизу станин стана.

Необходимо отметить, что рабочие валки в каждой клетке имеют постоянный диаметр, а в последовательно расположенных клетках 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 [10] разработали динамическую компьютерную модель МПКС и рассчитали прогиб, вибрацию и напряженно-деформированное состояние (НДС) тяжелонагруженных элементов клеток данного стана.

При конструировании нового стана в среде MSC Nastran нами было рассчитана вибрация и НДС деталей клеток по следующему алгоритму. 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 Mesh Seed нанесли 6-ти и 8-ми узловые объемные конечно-элементную сетку и определили вибрацию и НДС. Упругие связи между узлами клетки моделировали пружинно – демпферным элементом CBUSH. Силу трения между валками приняли равным 0,0868, а начальную температуру валков - 20 °С. Оценили уровень полученных упругих деформаций и напряжений в объеме клеток относительно требуемых критериев прочности и ввели соответствующие изменения в конструкцию клеток.

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.

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 9Х1 со следующими механическими свойствами: модуль упругости - $2,1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона - 0,283; модуль сдвига – $8,1839 \cdot 10^{10}$ Па. Материалом станины клеток выбрали сталь 40ХС с модулем упругости $214 \cdot 10^3$ МПа, коэффициентом Пуансона 0,3. Материалом других деталей стана была принята Сталь 45 со следующими механическими свойствами: модуль упругости - $2,034 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона - 0,29; плотность - $7833,394$ кг/м³.

Прочность и жесткость рабочих и опорных валков нового стана исследовали при горячей прокатке полос из латуни Л63 размером $0,7 \times 400$ мм. В качестве исходной заготовки использовали подкат толщиной $h_0 = 3,5$ мм. Коэффициент трение приняли равным 0,25 [20].

Результаты и обсуждение. Проведенные на конечно-элементных моделях расчеты показали, что в валках и станине клеток полученные максимальные значения эквивалентных напряжений не превышают максимально допустимое для выбранного материала валков и

станины значения предела прочности, соответственно 880 и 981 МПа. При этом максимальные значения напряжений возникают в шейках валков и нижней поперечине станины.

Распределение запаса прочности для валков и стоек станины в целом удовлетворяет условие прочности, при принятом коэффициенте запаса прочности соответственно 5 и 10. Наиболее слабым местом станины является верхняя поперечина.

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

Подушки упруго деформируются в вертикальной и горизонтальной плоскости и на небольшой угол поворачиваются относительно оси прокатки. Упругое перемещение в направлении действия нагрузки для подушек, располагаемых со стороны привода валка 1,3 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 частоты внешних сил. Одним из основных возбудителей резонансных частот в конструкции прокатных станом, является рабочая частота вращения привода рабочих валков, распространяющая вибрации на стан.

Исследованиями установлено, что при увеличении скорости прокатки на стане новой конструкции происходит сравнительно большой рост динамических нагрузок в основных узлах клетей и линии привода. Механические колебания узлов клетей и линий приводов становятся причиной появления вибрации. Исследования показали, что, по сравнению с первыми тремя клетями, в последних двух клетях нового стана появляются сравнительно большие по величине вынужденные колебания (рис. 1), возбуждающиеся внешними периодически изменяющимися силами и скоростью прокатки (таблица 1).

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

Номер клетки	Собственные частоты клетей 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
Продольно-клиновыи стан двумя станинами													
1	34.21	40.17	93.63	164.1	189.3	213.5	6.56	5.22	6.12	14.2	25.0	28.8	32.5
2	43.81	57.19	98.56	189.7	212.4	233.2	12.17	3.6	4.7	8.1	15.6	17.5	19.1
3	53.52	60.44	118.7	201.5	227.3	251.6	19.72	2.71	3.07	6.02	10.2	11.5	12.8
4	64.61	168.4	183.8	221.4	251.3	272.1	38.61	1.67	4.36	4.76	5.74	6.51	7.05
5	71.82	158.5	213.3	237.8	263.7	283.8	63.24	1.14	2.51	3.38	3.76	4.17	4.49
Продольно-клиновыи стан с тремя станинами													
1	55.12	70.02	143.7	214.7	266	403.1	5.71	9.65	12.3	25.2	37.6	46.6	70.5
2	58.27	71.45	136.3	248.8	260.3	323.3	9.07	6.43	7.88	15.1	27.4	28.7	35.6
3	61.39	72.67	132.7	252.7	258.3	266.9	16.48	3.73	4.41	8.06	15.4	15.7	16.2
4	84.58	162.8	240.3	261.3	290.9	302.6	30.52	2.77	5.34	7.88	8.56	9.53	9.92
5	86.91	167.7	242.4	263.9	282.9	303.5	55.60	1.56	3.02	4.36	4.75	5.09	5.46

Причиной появления сравнительно повышенной резонансной вибрации в валках предлагаемого стана является не горизонтальное расположение шпинделей привода МПКС. При этом валковые узлы не имели достаточно высокую жесткость в горизонтальной плоскости. Это привело к перемещению рабочих валков в 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. Это привело к негативным последствиям, как непрогнозируемое колебание межвалковых зазоров.

Следует отметить, что хотя в МПКС не возникают опасные резонансные вибрации, нами было предпринято попытка изменить конструкцию МПКС таким образом, чтобы вывести ее собственные частоты за рабочий диапазон и произвести оценку резонансных колебаний и получить большой запас до появления выше отмеченных колебаний. Поэтому в конструкцию нового стана дополнительно ввели третью станину, применили шпиндели специальной конструкции и гидравлический демпфер.

Третью станину расположили со стороны привода стана, что позволила строго горизонтально соединить специальные шпиндели с рабочими валками стана. Исследования показали, что, при таком соединении в последних двух клетях нового стана также появляются сравнительно большие по величине вынужденные колебания. Однако их величина существенно ниже, чем при прокатке МПКС с двумя станинами (таблица 1).

Таким образом, осуществление вращения валков рабочих клетей через третью станину позволило строго горизонтально расположить шпиндели, а применение шпинделей специальной конструкции позволяло устранить горизонтальное перемещение рабочих валков. При этом МПКС с тремя станинами позволило большим запасом до резонансной вибрации передавать крутящие моменты к рабочим валкам клетей стана (таблица 1). Ожидается, что все это будет способствовать получению полос с точными геометрическими размерами и без поверхностных дефектов.

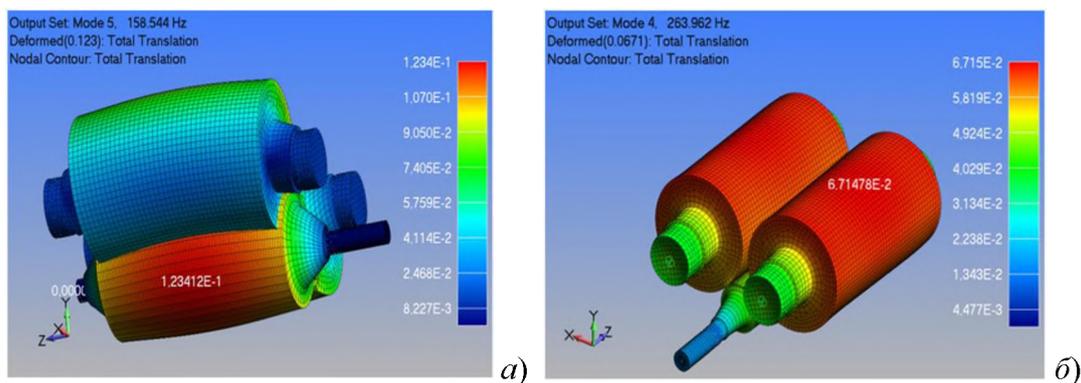


Рис. 1. Форма колебания валков от вибрационной нагрузки при прокатке полос на продольно-клиновом стане с двумя (а) и тремя (б) станинами

При оценке собственных частот станины в сборе с валковым узлом получены следующие результаты: вертикальным колебаниям растяжения-сжатия стоек станины с валковым узлом и перекадиной соответствует диапазону частот 32-143 Гц, при этом вынужденное колебание валкового узла изменяется в диапазоне 6-60 Гц.

На визуализированных результатах хорошо видно, каким образом передаются вибрация валков к изгибам рабочих и опорных валков (рис. 1). Проведенные исследования показали, что картина распределения суммарных перемещений в трех направлениях согласуется с деформированной формой валков. Максимальный прогиб в опорных валках изменялся в диапазоне от 0,115 до 0,0852 мм, а рабочих валках - от 0,145 до 0,0401 мм.

Нами также предложено использовать гидравлический демпфер для погашения вибрации. Гидравлический демпфер состоит из упругого элемента, т.е. станины, и гидравлического цилиндра. Данные элементы соединены параллельно. В этом случае, при действии усилий прокатки на станину клетки и его упругой деформации, превышающий

допускаемой величины, в демпфирующем гидравлическом цилиндре создается давления сжатия, позволяющий полностью или частично гасить вибрацию.

По результатам моделирования установили, что полосы, прокатанные в МПКС с двумя станинами, имеют волнистую поверхность с периодом колебаний порядка 10 – 15 мм. Следует отметить, что такие волнистые поверхности не обнаружены в полосах, прокатанных в ПКС с тремя станинами. Согласно современным представлениям о процессе продольной прокатки появление на поверхности полос волн объясняется появлением сравнительно больших вибрации валков.

Выводы:

1. Показано, что применение программы конечно-элементного анализа PATRAN NASTRAN является эффективным средством для исследования влияния вибрации валков различного характера на формирование толщины полос при холодной прокатке.

2. Установлено, что прокатанные в МПКС с тремя станинами полосы не имеют волнистую поверхность.

3. Доказано, что при прокатке в МПКС опасные вибрации не попадают в рабочий диапазон действующих внешних нагрузок, поэтому конструкция нового стана является достаточно хорошим с точки зрения прочности при вибрациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Automatic vibration analysis and trending for complex drives / G. Helekal, R. Luftensteiner, C. Riegler, H. Aigner // *Steel Technology*, October, 2002, pp. 43-49.

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

3. Гарбер, Э.А. Причины возникновения и методы устранения на поверхности холоднокатаных автомобильных листов дефектов «поперечная ребристость» и «полосы нагартовки» / Э.А. Гарбер, С.И. Павлов, В.В. Кузнецов // *Металлы*. – 2009. – № 1. – С. 12 – 20.

4. Гарбер, Э.А. Устранение вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки путем коррекции их энергосиловых параметров / Э.А. Гарбер, В.П. Наумченко, А.В. Кожевников, С.И. Павлов // *Сталь*. – 2003. – № 9. – С. 79 – 82.

5. Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов / Э.А. Гарбер, В.П. Наумченко и др. // *Производство проката*, №1, 2003, с. 10-12.

6. Исследование причин образования дефекта «ребристость» при дрессировке жести / В.Д.Петров, В.В.Левин, Т.С.Сейсимбинов, В.А.Шенбергер // *Бюлл. «Черная металлургия»*. – 1999. – № 11-12. – С. 42-44.

7. Многофункциональный продольно-клиновый стан для прокатки листов из сталей и сплавов. / Машеков С.А., Нугман Е.З., Түкібай А.А. и др. // Патент РК № 31750. // Оpubл. 30.12. 2016 г в БИ № 18.

8. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 399 с.

9. Рыбаков Ю.В., Субботин Г.Н. Определение источников вибрации, вызывающих явление резонанса на станах холодной прокатки // *Производство проката*, №10, 2003, с. 13-16.

10. Рыбников Е.К., Володин С.В., Соколов Р.Ю. Инженерные расчеты механических конструкции в системе MSC.Patran-Nastran. Часть I и II. – М. MSC.Software Corporation, 2003. – 130 и 174 с.

11. Hu, P.H. Stability Analysis of Chatter on a Tandem Rolling Mill / P.H. Hu, K.F. Ehmman // *International Journal of Manufacturing Processes*. – 2000. – № 4. – P. 217 – 224.

12. Shengli Wu, Liming Wang, Yimin Shao, Yilin Yuan Vibration characteristic analysis of twenty-high rolling mill with local defect on roll surface based on the time-varying contact stiffness Engineering Failure Analysis. Volume 42, July 2014, Pages 297-310

13. Swiatoniowski, A. Parametrical excitement vibration in tandem mills – mathematical model and its analysis / A. Swiatoniowski, A. Bar // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – V. 134. – P. 214 – 224.

Известия КГТУ им. И.Раззакова 49/2019

14. Tamiya, T. Analysis of Chattering Phenomenon in Cold Rolling / T. Tamiya, K. Fumi, H. Iida // Proceedings of Int. Conference on Steel Rolling, ISIJ, Tokyo. – 1980. – P. 1191 – 1202.

15. Yang Xu, Tong, C. N., Coupling Dynamic Model and Control of Chatter in Cold Rolling. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, 2012, 134(4): pp 1-8

16. Yang Xu, Li, Q., Tong, C. N., et al. Vertical Vibration Model for Unsteady Lubrication in Rolls-Strip Interface of Cold Rolling Mills. Advances in Mechanical Engineering, 2012, Article ID 734510, 7 pages doi:10.1155/2012/734510

17. Hu, P.H. Stability Analysis of Chatter on a Tandem Rolling Mill / P.H. Hu, K.F. Ehmann // International Journal of Manufacturing Processes. – 2000. – № 4. – P. 217 – 224.

18. Харахнин, К.А. Разработка алгоритма идентификации вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки / К.А. Харахнин, А.В. Кожевников, Е.А. Маслов // Сталь. – 2010. – № 10. – С. 38 – 40.