

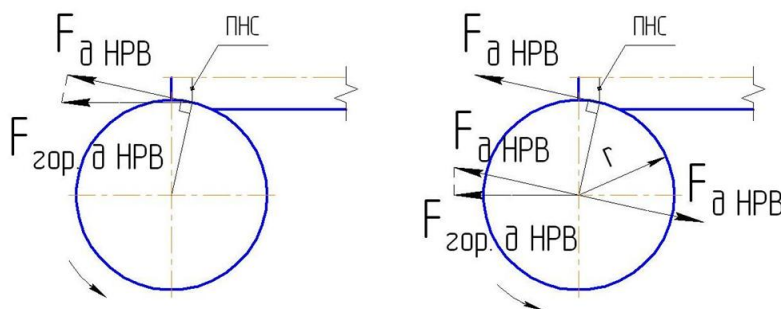
## ПРИОРИТЕТНОЕ ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ ПРИ ПРОКАТКЕ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОСНОВНОГО ЛИСТОПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В многолетней практике подробных теоретических прочностных расчетов главных линий и исследований динамических нагрузок в различных прокатных клетях [1 – 6] особое внимание принято уделять определению максимальных величин динамических моментов прокатки (моментов сил упругости), которые возникают в периоды нестационарных процессов прокатки. При этом причинами многочисленных поломок главных линий деталей прокатных клетей принято считать возникновение значительных величин динамических моментов прокатки [3, 7 и 8]. При теоретических и экспериментальных исследованиях горизонтальных сил при прокатке [9 – 12] основными целями являлись: определение величин горизонтальных сил, повышение срока эксплуатации оборудования, улучшение качества прокатываемого металла и т.д.

При этом в современной практике защиты главных линий прокатных клетей от аварийных поломок приоритетным является защита оборудования от значительных величин динамических моментов прокатки, а вопрос снижения горизонтальных сил редко является актуальным. В связи с таким состоянием вопроса, основными целями данной статьи являются:

- определение взаимосвязи горизонтальных сил  $F_{гор.д}$  и динамических моментов прокатки  $M_d$  для 4-х валковых прокатных клетей, которые наиболее востребованы в технологическом процессе получения листовой и толстолистовой прокатной стали и широко используются в отечественных и зарубежных современных прокатных цехах;
- подтверждение возникновения  $F_{гор.д}$  и ударов подушек РВ о станины при прокатке ранее, чем  $M_d$ , что свидетельствует о технической важности анализа горизонтальных сил, особенно при нестационарных процессах прокатки.

Действие первоначальной горизонтальной силы от раската на нижний рабочий валок (НРВ) подробно рассмотрено в [13]. На рис. 1 показана схема действия первоначальной горизонтальной динамической силы  $F_{гор.д НРВ}$  на базе НРВ при ее переносе в центр НРВ согласно правила параллельного переноса сил с указанием в качестве места ее приложения плоскости нейтрального сечения (ПНС).



**Рис. 1.** Схема действия первоначальной  $F_{гор.д НРВ}$  от раската на НРВ при ее переносе в центр НРВ

Принимая во внимание определение первоначальной горизонтальной динамической силы на  $i$ -м рабочем валке (РВ)  $F_{гор.д i}$  для 2-х валковой прокатной клетки, подробно рассмотренное в [13],  $F_{гор.д i}$  в момент времени  $t$  для 4-х валковой

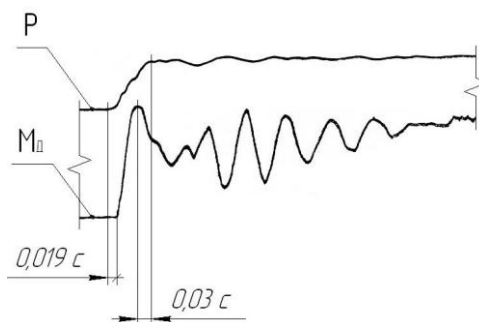
прокатной клетки при отсутствии проскальзывания между РВ и опорными валками (ОВ) может быть определена из уравнения:

$$F_{гор.дi}(t) = \frac{M_{дi}(t) - M_{cmi}(t)}{r_i \cdot \left[ 1 + \left( \frac{r_i}{R_j} \right)^2 \right]}, \quad (1)$$

где  $M_{дi}$  – динамический момент прокатки на  $i$ -м РВ (шпинделе), Н·м;  
 $M_{cmi}$  – момент при установившемся процессе прокатки на  $i$ -м РВ, Н·м;  
 $r_i$  – радиус  $i$ -го РВ, м;  
 $R_j$  – радиус  $j$ -го ОВ находящегося в контакте с  $i$ -м РВ, м.

Дальнейший переход силы  $F_{гор.дi}$  в динамическую силу горизонтального удара подушки РВ о станину подробно рассмотрен в [14]. На ее величину влияют: горизонтальная жесткость станины в месте удара подушки РВ (наделки) о поверхность окна станины (лицевой планки), зазор между наделкой и лицевой планкой и энергия столкновения со станиной движущихся горизонтально масс. Данная методика расчета теоретической величины динамической силы горизонтального удара подушки РВ о станину может использоваться персоналом прокатных цехов, на базе которых проводятся промышленные измерения динамических моментов прокатки.

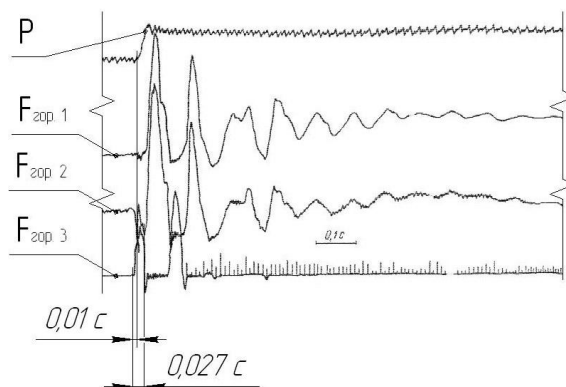
Анализ многочисленных экспериментальных данных замера динамических моментов прокатки (моментов сил упругости) на шпинделях, РВ и деформаций стоек станин широкополосных станов 2500 и 1700 горячей прокатки [2 и 15] показал, что начало роста деформации станин (усилия прокатки  $P$ ), а, следовательно, и давления металла на РВ, опережает начало изменения  $M_{д}$  на шпинделе (в непосредственной близости от РВ) приблизительно на 0,018–0,021 с (рис. 2). В свою очередь, максимум  $M_{д}$  на шпинделе опережает на 0,03 с (см. рис. 2) максимум усилия растяжения стойки станины от давления металла на РВ.



**Рис. 2.** Фрагмент осциллограммы усилия прокатки и момента прокатки в черновой клетке стана 1700

Результаты экспериментальных замеров динамических горизонтальных сил и усилий прокатки в черновой клетке стана 1700 горячей прокатки [10] показывают, что начало роста горизонтальных сил  $F_{гор.}$ , действующих от подушек РВ на ответные поверхности подушек ОВ, опережает рост усилий прокатки  $P$  приблизительно на 0,01 с (рис. 3). Поэтому, в первом приближении для большинства черновых клеток стана 1700, можно утверждать, что начало роста  $F_{гор.}$  (при которой возможен удар подушек РВ об ответные поверхности подушек ОВ) опережает начало изменения (роста)  $M_{д}$  на шпинделе (в непосредственной близости от РВ) приблизительно на

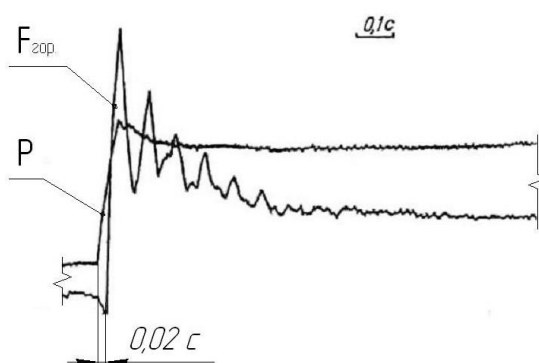
0,03 с. Данная величина определена как сумма времени 0,02 с (см. рис. 2) отставания начала роста  $M_d$  на шпинделе от начала роста усилия прокатки  $P$  и времени 0,01 с (см. рис. 3) отставания начала роста  $P$  от начала роста  $F_{гор.}$ .



**Рис. 3.** Фрагмент осциллограммы горизонтальных сил и усилия прокатки в черновой клети стана 1700:

- $F_{гор. 1}$  – горизонтальная сила, действующая на ответную наделку подушки ОВ со стороны выхода раската из клети, сторона привода;
- $F_{гор. 2}$  – горизонтальная сила, действующая на ответную наделку подушки ОВ со стороны выхода раската из клети, сторона перевалки;
- $F_{гор. 3}$  – горизонтальная сила, действующая на ответную наделку подушки ОВ со стороны входа раската в клеть, сторона перевалки.

Результаты экспериментальных замеров динамических горизонтальных сил ударов подушек РВ о станины и усилий прокатки в черновой клети № 5 стана 2000 [9] показывают, что начало роста горизонтальных сил  $F_{гор.}$ , действующих от подушек РВ на ответные поверхности станин, отстает от начала роста усилий прокатки  $P$  приблизительно на 0,02 с (рис. 4). Это объясняется тем, что датчики горизонтальных сил устанавливались в планки стоек станин со стороны выхода раската из черновой клети [16], где в подавляющем большинстве случаев происходит второй удар подушек РВ, так как экспериментально доказано, что первый горизонтальный удар подушек РВ о подушки ОВ (станины) происходит со стороны входа раската в раствор РВ [10 и 11]. При этом второй удар (со стороны выхода раската из прокатной клети) подушек РВ о станины происходит через 0,02...0,03 с (см. рис. 3) и [17] в зависимости от конструкции прокатной клети, зазоров между контактными поверхностями подушек валков и станин и т.д.



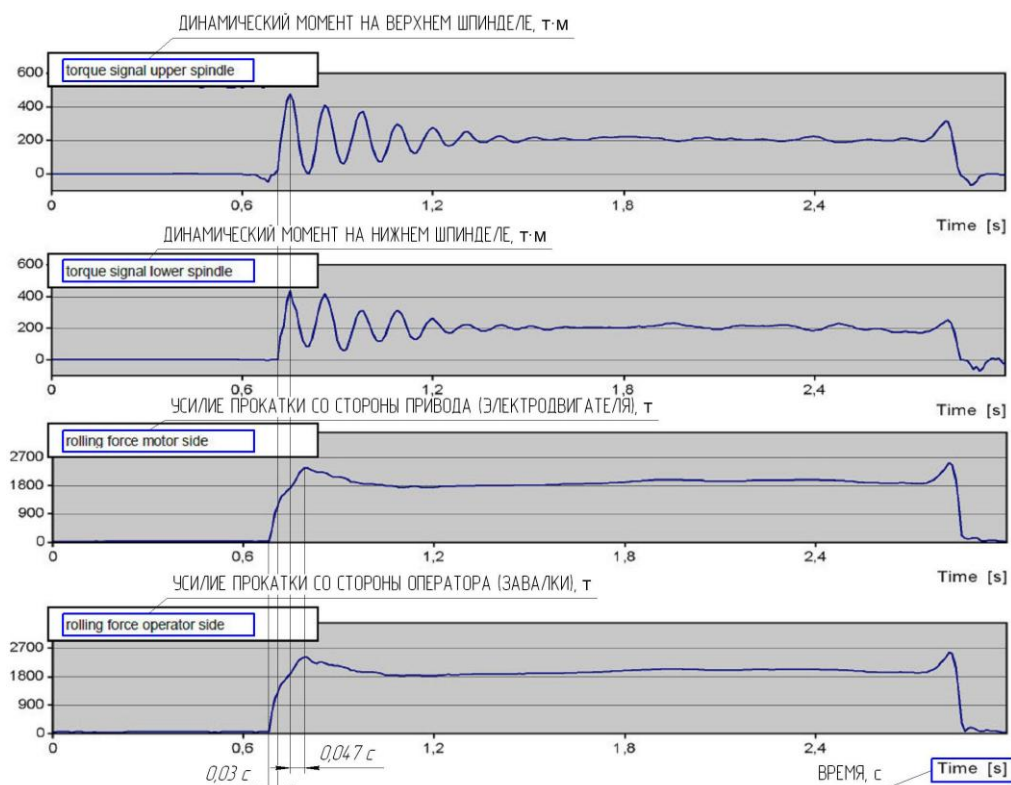
**Рис. 4.** Фрагмент осциллограммы горизонтальных сил второго удара подушек РВ и усилия прокатки в черновой клети № 5 стана 2000 при установке датчиков фиксации  $F_{гор.}$  со стороны выхода раската из клети

Следовательно, в первом приближении можно утверждать об одновременных началах роста  $F_{гор.}$  (со стороны входа раската в клеть) и  $P$ , или отставании начала роста  $P$  от начала роста  $F_{гор.}$  на  $t_1 = 0,01$  с в рассматриваемой на рис. 4 черновой прокатной клетке, что более соответствует экспериментальным данным, показанным на рис. 3. При этом для дальнейшего теоретического расчета времени опережения начала роста  $F_{гор.}$  от начала роста  $M_d$  на шпинделе можно принять величину  $t_1 = 0,005$  с.

Согласно данным осциллографирования нагрузок в черновой клетке № 5 стана 2000 [22 и 20], отставание начала роста динамического крутящего момента на валу главного двигателя  $M_{д. дв.}$  от начала роста  $P$  составляет около  $t_2 = 0,05 - 0,06$  с (для дальнейшего расчета можно принять  $t_2 = 0,055$  с), а отставание начала роста  $M_{д. дв.}$  от  $M_d$  на нижнем шпинделе составляет около  $t_3 = 0,014 - 0,015$  с (для дальнейшего расчета можно принять  $t_3 = 0,015$  с). Тогда, в первом приближении для черновой клетки № 5 стана 2000, можно утверждать, что начало роста  $F_{гор.}$  (при которой возможен удар подушек РВ об ответные поверхности подушек ОВ) опережает начало роста  $M_d$  на шпинделе приблизительно на  $t = t_1 + t_2 - t_3 = 0,045$  с.

Дальнейший анализ экспериментальных данных замера динамических моментов прокатки (моментов сил упругости) на шпинделях, усилий прокатки и перемещений подушек РВ выполнен на базе современного развития техники и средств измерения.

Анализ данных замера динамических моментов прокатки на шпинделях и усилия прокатки в клетке кварто толстолистового цеха (Isenburger Grobblech GmbH) [18] показал, что начало роста усилия прокатки, а, следовательно, и давления металла на РВ, опережает начало изменения динамических моментов прокатки на шпинделях  $M_d$  приблизительно на  $0,027 - 0,033$  с (рис. 5). В свою очередь, максимум  $M_d$  на шпинделях опережает на  $0,045 - 0,05$  с (см. рис. 5) максимум усилия прокатки от давления металла на РВ.

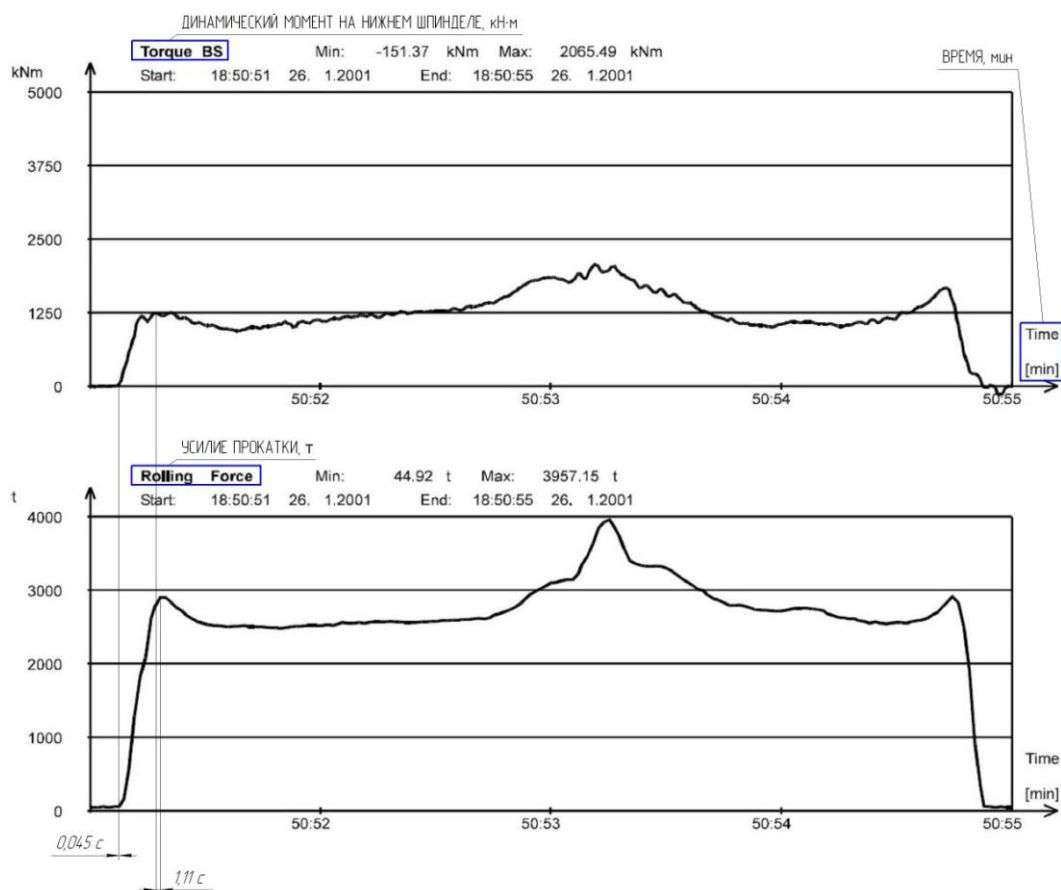


**Рис. 5.** Фрагмент осциллограммы усилия прокатки и моментов прокатки в толстолистовой клетке кварто

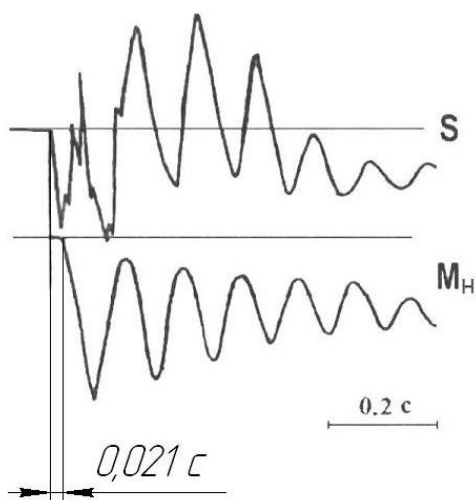
Анализ измерений динамического момента прокатки на шпинделе нижнего РВ и усилия прокатки в клети кварто толстолистного цеха (Rolled Products Inc.) [19] показал, что начало роста усилия прокатки, а, следовательно, и давления металла на РВ, опережает начало изменения динамического момента прокатки на нижнем шпинделе  $M_d$  приблизительно на 0,04 – 0,05 с (рис. 6). В свою очередь, второй максимум  $M_d$  на шпинделе опережает на 1,05 – 1,15 с (см. рис. 6) максимум усилия прокатки от давления металла на РВ.

Анализ измерений моментов сил упругости на шпинделе нижнего РВ  $M_H$  и перемещений подушки РВ со стороны привода S в проеме окна станины чистовой клети № 7 стана 2000 при захвате полосы РВ [20] показал, что начало перемещения подушки РВ со стороны привода опережает начало роста момента сил упругости на шпинделе на 0,018 – 0,024 с (рис. 7).

Многочисленными измерениями, выполненными на базе различных листовых и толстолистовых прокатных клетей, подтверждается факт того, что на шпинделе РВ динамический момент возникает и регистрируется приборами ранее, чем на провале или валу главного электродвигателя [21].



**Рис. 6.** Фрагмент осциллограммы усилия прокатки и момента прокатки в толстолистовой клети кварто



**Рис. 7.** Фрагмент осциллограммы моментов сил упругости на шпинделе нижнего РВ и перемещений подушки РВ со стороны привода в проеме окна станины чистой клетки № 7 стана 2000 при захвате полосы РВ

На основании вышеизложенного подтверждается предположение автора о первоочередном действии горизонтальной инерционной силы на РВ (возникающей при рассогласовании скорости задачи раската в раствор РВ и скорости прокатки, динамическом захвате), последующих первоначальных горизонтальных ударах подушек РВ о станины (проемы подушек ОВ), чем начало возникновения и роста динамического момента прокатки на шпинделях. Следовательно, в первом приближении, удар раската о РВ, присоединение массы раската к многомассовой системе прокатной клетки, горизонтальный удар подушек РВ о станины (подушки ОВ) и прижатие подушек к станинам для получения необходимой опоры РВ в проеме клетки при прокатке, и пластическая деформация самого металла с постоянным действием горизонтальных сил вызывает изменение динамического момента прокатки на шпинделях.

## ВЫВОДЫ

1. Показана зависимость горизонтальных сил для 4-х валковых прокатных клетей при известных моментах прокатки и геометрических характеристиках самой клетки.
2. На основании многочисленных экспериментальных данных доказано, что горизонтальная инерционная сила, действующая на РВ и переходящая в силу горизонтального удара подушек РВ о станины (проемы подушек ОВ), при захвате металла РВ возникает ранее, чем динамический момент прокатки на соответствующем шпинделе, что свидетельствует о важности учета горизонтальных сил, особенно при нестационарных процессах прокатки.
3. Определены теоретически и экспериментально величины отставания начала роста динамического момента прокатки (момента сил упругости) на соответствующем шпинделе от начала роста силы горизонтального удара подушки РВ о станину (проем подушки ОВ), что для черновой клетки стана 1700 составляет 0,03с, для черновой клетки № 5 стана 2000 составляет 0,045 с и для чистой клетки № 7 стана 2000 составляет 0,021 с.
4. Поскольку горизонтальные силы, приложенные к РВ, предшествуют появлению всех других основных нагрузок в листовых прокатных клетях и их главных линиях, они должны быть обязательно учтены при решении

вопросов защиты основного прокатного оборудования от поломок и продления его срока эксплуатации.

*Перечень ссылок*

1. Динамические нагрузки главных линий прокатных станов и учет этих нагрузок при расчетах на прочность и выносливость / *Кожевников С.Н. [и др.]* // Труды ВНИИМЕТМАШ. – 1968. – №23.- С.28–46.
2. Исследование динамики приводов главных линий широкополосных станов горячей прокатки / *Целиков А.И. [и др.]* // Международный симпозиум по динамике тяжелых машин горной и металлургической промышленности. Секция динамики металлургических машин: Тез. докл. – Донецк, 1974. – С.3–12.
3. *Адамия. Р.Ш.* Оптимизация динамических нагрузок прокатных станов / *Р.Ш. Адамия* – М.: «Металлургия», 1978. – 232с.
4. *Целиков А.И. [и др.]* Машины и агрегаты металлургических заводов. Учебник для вузов. – Изд. 2–е, перераб. и доп.: В 3 т. / Машины и агрегаты для производства и отделки проката. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с. – Т. 3.
5. *Большаков В.И.* Особенности эксплуатации оборудования главных линий черновых клетей стана 1680 горячей прокатки / *В.И. Большаков, В.П. Поздняков* // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1999. – Вып. 4. – С.15–24.
6. *Большаков В.И.* Методика исследования динамики приводов металлургических машин / *В.И. Большаков* // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – №3.- С.72–78.
7. Обзор повреждений в приводах прокатных станов / *Мюллер В.* // Черные металлы. – 1981. – №25–26.- С.9–14.
8. Анализ причин аварий оборудования листопркатных станов и меры по их предупреждению / *А.Ф. Крисанов [и др.]* // Черная металлургия: Обзорная информация ин-та «Черметинформация». – М., 1985. – 36с.
9. Влияние крутильных колебаний в линии привода на горизонтальные усилия в четырехвалковой прокатной клети / *Гарцман С.Д. [и др.]* // Исследование, расчеты и конструирование машин металлургического производства. Сборник научных трудов, под ред. *Дрозда В.Г., Краузе Г.Н.* – М.: Металлургия, 1980. – С.137–140.
10. Снижение динамических нагрузок при захвате полосы на широкополосных станах / *Плахтин В.Д. [и др.]* // Черная металлургия: Бюллетень ин-та «Черметинформация». – 1983. – №10. – С.36–37.
11. *Ищенко А.А.* Экспериментальная оценка ударных нагрузок на станины рабочих клетей толстолистовых станов / *Ищенко А.А., Калинин И.А., Гришко В.П.* // Сталь. – 2009. – №5.- С.56–58.
12. Устройство для демпфирования горизонтальных ударных нагрузок и вибраций клети на стане горячей прокатки / *Т. Усуги, К. Хаяси* // Черная металлургия: Бюллетень ОАО «Черметинформация». – 2005. – №6. – С.52–55.
13. *Мазур В.О.* Горизонтальная сила при прокатке как показатель технологичности процесса прокатки и технического состояния основного прокатного оборудования / *В.О. Мазур* // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2013. – Вып. 15. – С.15–22.
14. *Артюх В.Г.* Конструктивные меры уменьшения горизонтальных сил в клетях прокатных станов / *В.Г. Артюх [и др.]* // Сталь. – 2011. – № 7.- С.64–66.
15. *Хоменко В.И.* Характер изменения момента и давления при захвате металла валками / *В.И. Хоменко* // Труды первой всесоюзн. конф. по расчетам на прочность металлургических машин. ВНИИМЕТМАШ. – М., 1968. – Т.1, №23.- С.239–245.

16. Исследования способа измерения натяжения полосы без образования силовой петли на станах с клетями кварто / *Чехлов Ю.С. [и др.] // Труды ВНИИМЕТМАШ, 1977.- №47.- С.38–44.*
17. Исследование динамических нагрузок на станины клетки стана 3000 в процессе прокатки и разработка предложений по оптимизации его работы: отчет о НИР: № 6/04 / ПГТУ; рук. *Ищенко А.А.*; исполн.: *Гришко В.П. [и др.]*. – Мариуполь, 2006. – 118 с. – № ГР 0104U005363.
18. Developing a Report Generator for the Automatic Analysis of Rolling Data in Heavy Plate Mills. / *Dr.-Ing. Robert Krumbach, Dipl.-Ing. Jurgen Korth [и др.] // RWTH Aachen, 2001.*
19. Report on Measurements and Process Analyses at the Heavy Plate Mill of Rolled Products Inc., USA. Musterbericht - ACIDA Torque Measurement Services. ACIDA GmbH. 2004. – 36с.
20. *Вернев В.В.* Диагностика и динамика прокатных станов / *В.В. Вернев [и др.]*. Монография. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2007. – 144с.
21. *Вернев В.В.* Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680 / *В.В. Вернев [и др.]*. Монография. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. – 184с.
22. Снижение угловых зазоров и динамических нагрузок при захвате металла валками / *Коцарь С.Л. [и др.] // Черная металлургия: Бюллетень ин-та «Черметинформация». – 1979. – №2. – С.42–43.*

Рецензент: д.т.н., проф. Артюх В.Г.

*Статья поступила 06.11.2014.*