

## ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ СИЛА ПРИ ПРОКАТКЕ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВНОГО ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящее время проблема уменьшения динамических нагрузок в рабочих клетях прокатных станов для освоения новых видов конкурентоспособной продукции и увеличения долговечности самого оборудования, чрезвычайно актуальна для большинства металлургических предприятий, имеющих в своем составе прокатный передел.

При этом основными динамическими нагрузками, максимальные величины и колебания которых вызывают аварийные поломки деталей главных линий и станин прокатных клетей являются: динамический момент прокатки  $M_d$  [1 – 3] и горизонтальные динамические силы при прокатке  $F_{гор. д}$  [4] (см. рис. 1). Кроме этого, указывается связь между  $M_d$  и  $F_{гор. д}$  [5 и 6], что подтверждает возможность их взаимного теоретического расчета.

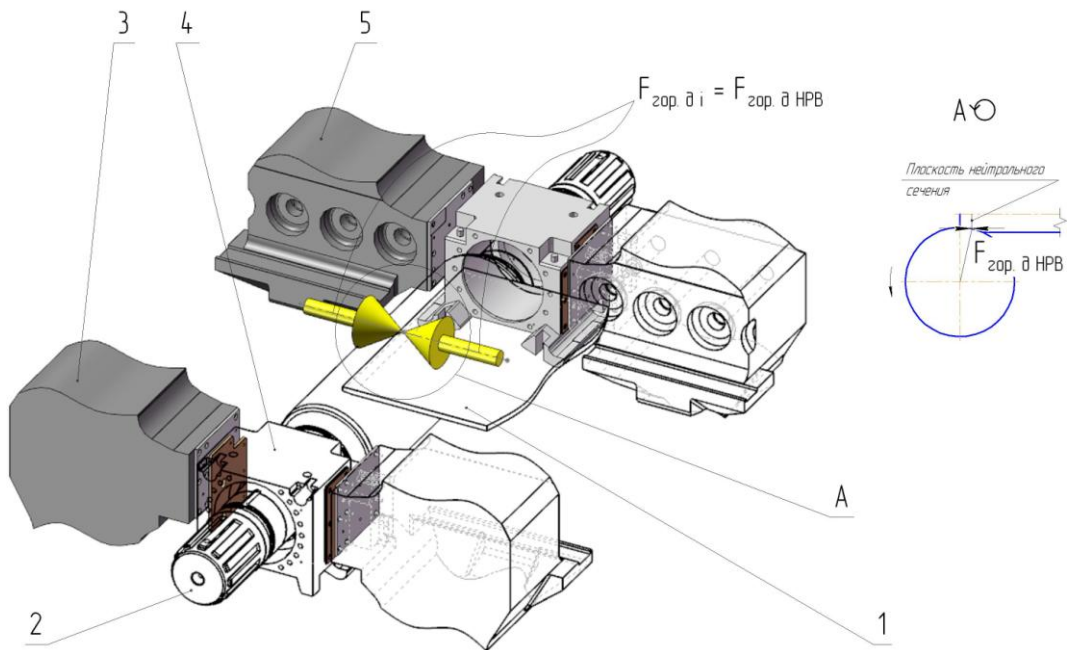
Своевременная диагностика технического состояния металлургических машин подтверждает возможность предотвращения аварийных поломок оборудования [7]. Наиболее широко распространена диагностика путем выполнения экспериментальных исследований и измерений моментов, передаваемых рабочими валками (РВ), деформаций станин, вибраций деталей, углов относительного перемещения масс и т.д. [8]. Сила  $F_{гор. д}$ , в первую очередь, определяет долговечность: деталей прокатных клетей, которые ее воспринимают (см. рис. 1), узлов крепления станин к фундаментным плитам и самого массивного фундамента [9].

Основной целью данной статьи являются:

- определение взаимосвязей  $F_{гор. д}$  и  $M_d$  для прокатных клетей;
- выполнение анализа влияния различных технологических параметров прокатки на величину горизонтальных сил, а также анализ возможности использования замеров горизонтальных сил, действующих на станину (сил горизонтальных ударов подушек РВ о станины) для определения состояния основных деталей и узлов прокатных клетей.

На рис. 1 на примере нижнего РВ (НРВ) показана первоначальная динамическая горизонтальная сила  $F_{гор. д НРВ}$  действующая от раската 1 на НРВ 2, на который устанавливаются подушки 4, расположенные в окнах станин со стороны завалки 3 и привода 5, соответственно. Две стрелки  $F_{гор. д НРВ}$ , действующие навстречу друг другу, свидетельствуют о ее колебательном характере в период неустановившегося процесса прокатки.

Физическая природа крутильных колебаний в главных линиях прокатных клетей представляется следующим образом: переход от нагрузки холостого хода к рабочей происходит на отрезке времени, необходимом для заполнения очага деформации раскатом. Этим определяется, с одной стороны, скорость увеличения динамического крутящего момента на РВ, с другой стороны, соответствующая скорость нарастания упругой деформации закручивания деталей главной линии. Чем меньше время захвата раската РВ, тем больше скорость увеличения динамического крутящего момента на РВ и, соответственно, скорость нарастания упругой деформации закручивания главной линии [10]. Суммарная кинетическая энергия плоскопараллельного движения РВ (перемещение подушек РВ с валками, проводками, наделками и т.д. в поле зазора в окне станин (подушек ОВ) и вращение РВ вокруг их осей) будет расходоваться на пластическую деформацию металла и энергию упругого деформирования деталей привода при многократном перемещении РВ в плоскости прокатки. В результате потерь энергии на внешнее и внутреннее трение величины упругих деформаций деталей главных линий уменьшаются и колебания затухают.



**Рис. 1.** Схема действия первоначальной  $F_{гор. д НРВ}$  от раската на НРВ

Общепринято [11], что основными причинами значительных изменений величин моментов сил сопротивления (моментов прокатки, моментов сил упругости в приводе) при захвате металла РВ являются: динамический захват металла РВ с формированием дуги захвата, величины скоростей движений и вращений масс, присоединение массы раската к многомассовой системе прокатной клетки и т.д. Большинство подобных причин должно быть учтено как появление инерционной горизонтальной силы, действующей от раската на РВ.

Первоначальная горизонтальная динамическая сила на  $i$  – м РВ  $F_{гор. д i}$  прокатной клетки (рис. 1) в момент времени  $t$  может быть определена из уравнения:

$$F_{гор. д i}(t) = \frac{M_{ди}(t) - M_{ст i}(t)}{r_i}, \text{ Н} \quad (1)$$

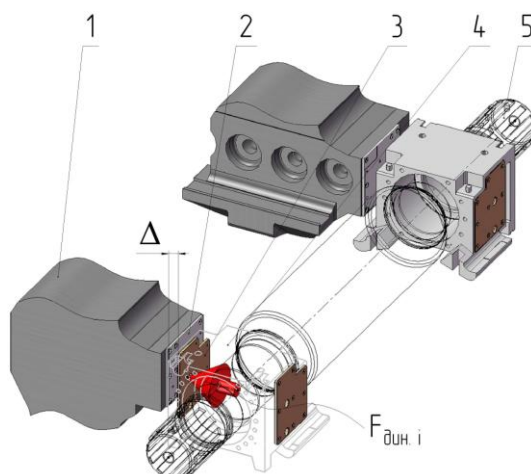
где  $M_{ди}$  – динамический момент прокатки на  $i$  – м РВ, Н·м;

$M_{ст i}$  – момент при установившемся процессе прокатки на  $i$  – м РВ, Н·м.

$r_i$  – радиус  $i$  – го РВ, м.

Отмечается [12], что сила  $F_{гор. д i}$  переходит в динамическую силу  $F_{дин. i}$  горизонтального удара подушки 4 о станину 1 (рис. 2). На величину  $F_{дин. i}$  влияют: горизонтальная жесткость станины 1 в месте удара подушки 4 (наделки 3) о поверхность окна станины 1 (лицевой планки 2), зазор  $\Delta$  между наделкой 3 и лицевой планкой 2 и энергия столкновения со станией движущихся горизонтально масс.

На примере 4-х валковой толстолистовой черновой реверсивной прокатной клетки подвергшейся значительной модернизации [13 и 14], у которой максимальные величины основных показателей: усилие прокатки до 8000 т, масса раската до 16 т и максимальная скорость прокатки около 4,1 м/с, рассмотрим влияние рассогласованности скоростей задачи раската в зев РВ  $V_{мет}$  и скорости прокатки  $V_{прок.}$

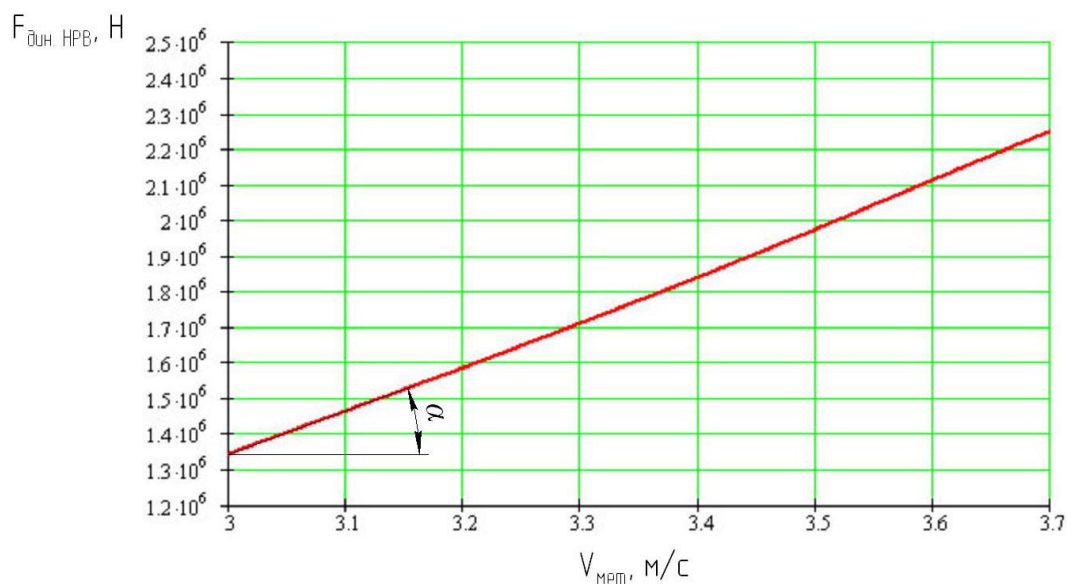


**Рис. 2.** Схема действия силы горизонтального удара  $F_{дин. i}$  подушки РВ о станину

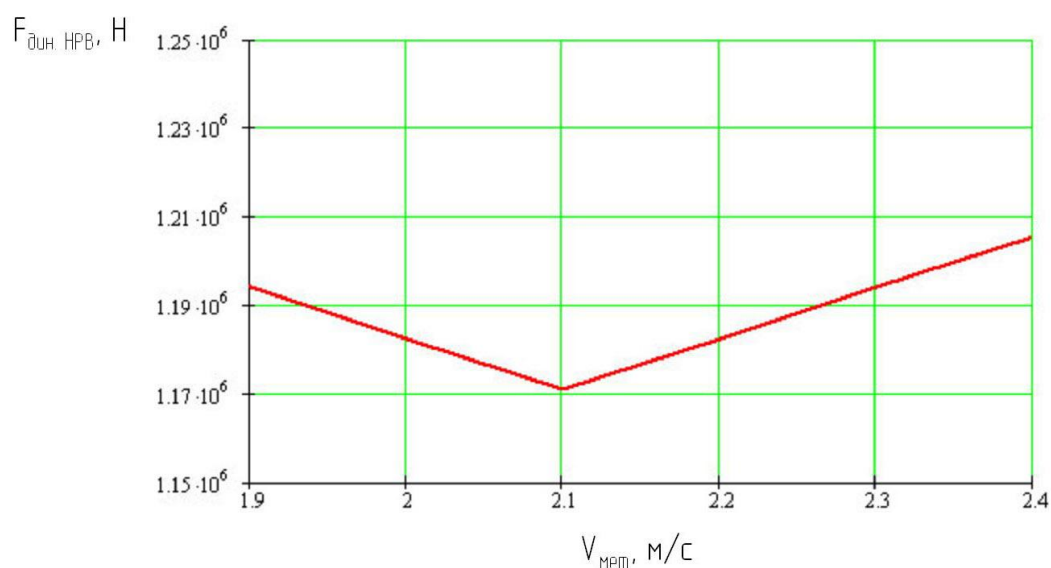
Оптимальным рассогласованием  $V_{мет}$  и  $V_{прок}$  является отличие  $V_{мет}$  от  $V_{прок}$  не более чем на 2%, что на практике трудно достижимо, например, из – за наличия остатков окалины на поверхности раската и использования контролируемой прокатки [15]. Поэтому фактическое соотношение скоростей составляет  $V_{мет} = 0,96...0,99 \cdot V_{прок}$ . При этом многочисленными наблюдениями и анализом схем прокатки подтверждено, что операторами многих толстолистовых прокатных станов реализуется  $V_{мет} > V_{прок}$ , в результате возникают значительные величины горизонтальных сил. График теоретической зависимости силы горизонтального удара подушки НРВ  $F_{дин. НРВ}$  о станину от  $V_{мет}$  в диапазоне (3,0 м/с – 3,7 м/с) при  $V_{прок} = 2,1$  м/с и массе раската 15270 кг из стали АРІ Х60 при его захвате РВ, с учетом зазора  $\Delta=0,0018$  м между наделкой подушки НРВ и лицевой планкой станины, показан на рис. 3, где на величину угла  $\alpha$  наклона кривой влияют величины сил нормального давления раската на НРВ, сил трения между раскатом и НРВ, сил инерции действующих от раската на НРВ и угловые скорости торможения / разгона холостого нижнего ОВ. График теоретической зависимости силы  $F_{дин. НРВ}$  от  $V_{мет}$  в диапазоне (1,9 м/с – 2,4 м/с) при  $V_{прок} = 2,1$  м/с и массе раската 15270 кг из стали АРІ Х60 при его захвате РВ, с учетом зазора  $\Delta=0,0018$  м между наделкой подушки НРВ и лицевой планкой станины, показан на рис. 4.

Расчет теоретических зависимостей выполнен на разработанных автором данной статьи математических моделях (ММ), вычислительный аппарат которых основан на фундаментальных принципах кинематики процесса листовой прокатки и оптимальном алгоритме расчета сил динамического взаимодействия РВ с прокатом и ОВ при неустановившемся процессе прокатки. ММ учитывают условия захвата (свободный или динамический захват), геометрические параметры проката, его марку стали, температуру и массу, величину обжатия, скорость задачи раската в зев РВ и скорость прокатки, геометрические и конструкционные параметры прокатной клетки, ее напряженно – деформированное состояние и т.д. Это позволяет успешно выполнять подобный расчет для других толстолистовых / листовых прокатных клеток. Математические модели прошли проверку на базе экспериментальных исследований, показанных и проанализированных в работах [16 и 17]. Погрешность расчетов составляет не более 9%.

При имеющихся данных (см. рис 3 и 4) необходимым является определение математической зависимости  $F_{дин. i}$  от  $V_{мет}$  при отсутствии проскальзывания между раскатом и РВ при его захвате РВ. Это позволит, в первом приближении, выполнять эксплуатационному персоналу предварительный теоретический расчет  $F_{дин. i}$  (допуская, что РВ нагружены одинаково), что позволит избежать преждевременного износа контактных поверхностей деталей и узлов 4-х валковой прокатной клетки.



**Рис. 3.** График теоретической зависимости силы горизонтального удара подушки НРВ о станину от скорости задачи раската в зев РВ при его захвате РВ в рассматриваемой 4-х валковой толстолистовой реверсивной прокатной клетки



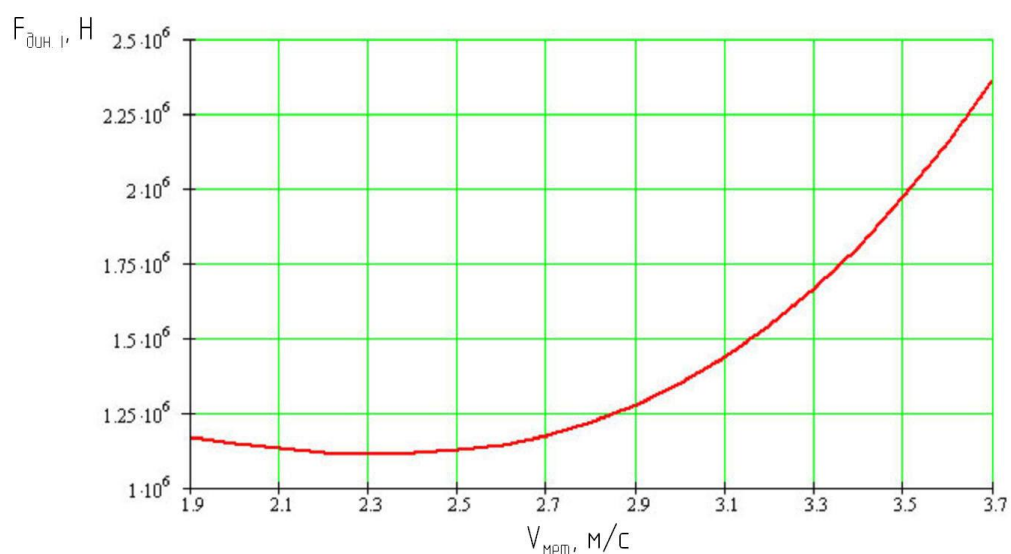
**Рис. 4.** График теоретической зависимости силы горизонтального удара подушки НРВ о станину от скорости задачи раската в зев РВ при его захвате РВ в рассматриваемой 4-х валковой толстолистовой реверсивной прокатной клетки

Полученная зависимость  $F_{дин. i}$  от  $V_{мет}$  (м/с) в диапазоне (1,9 м/с – 3,7 м/с) имеет вид:

$$F_{дин. i} = 0,2 \cdot V_{мет}^3 - V_{мет}^2 + 1,4 \cdot V_{мет} + 0,75, \text{ МН} \quad (2)$$

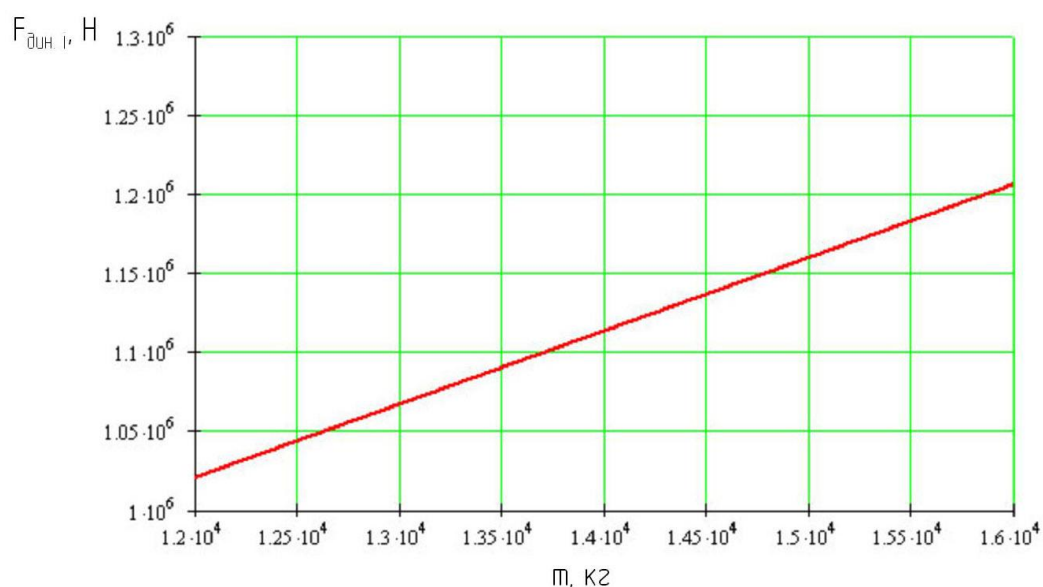
График полученной зависимости (2) показан на рис. 5, погрешность расчета не более 9%. Ее применение возможно для других 4-х валковых прокатных клеток при массах прокатываемого раската 12...18 т из сталей АР1 Х60...Х80, 10Г2ФБ, 09Г2С, 10ХСНД и др.

сталей повышенной прочности, скоростей  $V_{\text{прок}} = 1,8 \dots 2,4$  м/с и  $V_{\text{мет}} = 1,7 \dots 4,0$  м/с при зазоре  $\Delta = 0,001 \dots 0,002$  м между наделкой подушки РВ и лицевой планкой станины.



**Рис. 5.** График зависимости силы горизонтального удара подушки РВ о станину от скорости задачи раската в зеве РВ согласно зависимости (2) в рассматриваемой 4-х валковой толстолистовой реверсивной прокатной клетки

Следующий важный параметр, влияющий на технологию процесса прокатки – масса раската  $m$ . При этом масса  $m$  строго регламентируется для получения годной продукции и может быть уменьшена только в исключительных случаях. На рис. 6 показан график зависимости силы горизонтального удара подушки РВ о станину от массы раската для рассматриваемой 4-х валковой толстолистовой реверсивной прокатной клетки, расчет которой выполнен с использованием ранее указанных ММ.



**Рис. 6.** График зависимости силы горизонтального удара подушки РВ о станину от массы раската

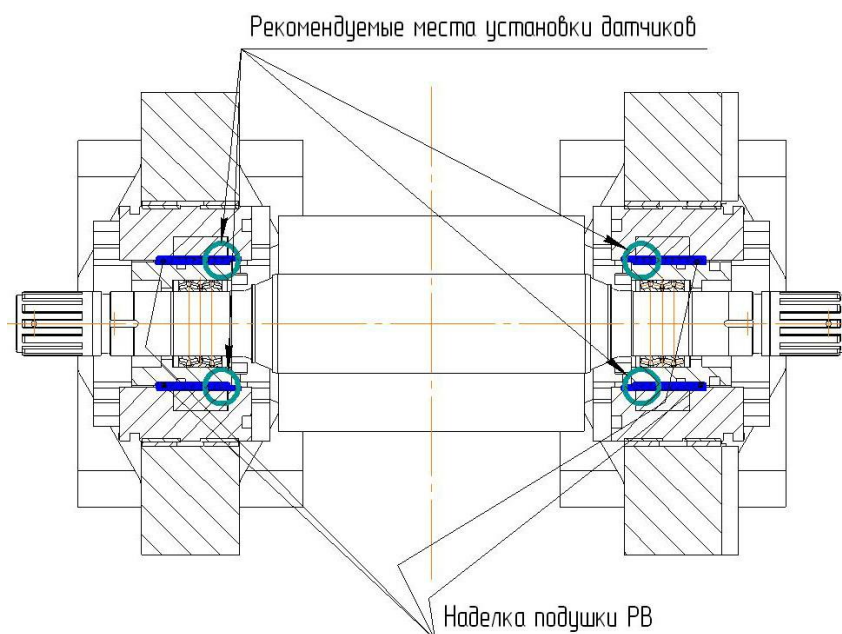
Техническое состояние основного прокатного оборудования должно соответствовать рекомендуемым значениям износа контактных поверхностей, которые устанавливаются его изготовителем и практикой эксплуатации прокатной клетки [18]. Рост силы горизонтального удара подушки РВ о станину от зазора  $\Delta$  (см. рис. 2) проанализирован и показан в [12].

На основании вышеизложенного о важности получения данных по величинам горизонтальных ударов подушек РВ о станины (подушки ОВ) предлагается осуществлять их замеры в режиме реального времени, контроль и запись системами АСУТП прокатных цехов. Многочисленные эксперименты по определению горизонтальных сил, перемещений подушек РВ, их горизонтальных ускорений и т.д. [6, 17 и 19] подтверждают необходимость наличия специальной дорогостоящей измерительной аппаратуры (работающей при неблагоприятных условиях окружающей среды), ПО, обученного персонала и соблюдения правил ТБ при выполнении замеров на работающем оборудовании. Поэтому предлагается устанавливать прямоугольные тензочувствительные датчики нагрузки (rectangular load cells) в специальные пазы подушек РВ в местах их ударов со станинами (проемами подушек ОВ) или в пазы станин (см. рис. 7). Размеры пазов зависят от габаритов датчиков и для большинства производителей номинальная нагрузка  $N$  определяется:

$$N = D \cdot Ш \cdot 0,0001, \text{ МН} \quad (3)$$

где  $D$  – длина датчика, мм;  
 $Ш$  – ширина датчика, мм.

При этом изначально необходимо ориентироваться на величины измеряемых горизонтальных нагрузок, которые могут быть в широком интервале от 0,5 МН до 10 МН, длины  $D$  выбираются от 120 мм до 600 мм, ширины  $Ш$  допускаются от 70 мм до 300 мм при постоянной толщине датчиков от 50 мм до 75 мм и величине сжатия от 0,05 мм до 0,1 мм при номинальной нагрузке  $N$  (в зависимости от производителя).



**Рис. 7.** Схема расположения мест установки датчиков горизонтальных сил

Рекомендуется устанавливать минимум по два датчика для каждого РВ со стороны привода и завалки и выводить контакты подключения на внешнюю сторону подушек РВ.

## ВЫВОДЫ

1. Показана зависимость расчета горизонтальных сил ударов подушек РВ о станины (подушки ОВ) прокатных клетей при известных моментах прокатки и геометрических характеристиках самой клетки.
2. Предложено использовать горизонтальную силу при прокатке как показатель технологичности процесса самой прокатки. Приведены примеры зависимости величин горизонтальных сил от скоростей задачи раската в зев РВ при его захвате РВ, что подтверждает необходимость контроля технологических параметров прокатки, рациональное снижение которых способно уменьшить величины горизонтальных сил. Например, для рассматриваемой 4-х валковой толстолистовой реверсивной прокатной клетки, при скорости прокатки  $V_{\text{прок}} = 2,1$  м/с, снижение скорости задачи раската в зев РВ  $V_{\text{мет}}$  на 19% с 3,7 м/с до 3 м/с теоретически обеспечит снижение горизонтальных сил  $F_{\text{дин. i}}$  на 40% с 2,26 МН до 1,35 МН. Расчет теоретических зависимостей выполнен на разработанных ММ, погрешность расчета составляет не более 9%. Возможно их использование для выполнения подобных расчетов для других толстолистовых / листовых прокатных клетей (черновых и чистовых).
3. Целесообразно использование записи контроля величин горизонтальных сил ударов подушек РВ о станины (проемы подушек ОВ) для оценки технического состояния основного прокатного оборудования. Показана возможность и последовательность выбора габаритных размеров датчиков горизонтальных сил. Приведенная схема расположения мест установки датчиков является предварительной и должна согласовываться с эксплуатационным персоналом (механики, электрики и инженеры АСУТП).
4. Наличие записанных величин горизонтальных сил позволит более детально устанавливать причины аварийных поломок деталей и узлов основного прокатного оборудования. Кроме этого, показатель роста горизонтальных нагрузок со временем эксплуатации клетки (с момента последнего капремонта) может быть использован для прогнозирования дат проведения ремонтов оборудования.

### Перечень ссылок

1. Обзор повреждений в приводах прокатных станов / *Мюллер В.* // Черные металлы. – 1981. – №25–26, С. 9–14.
2. *Артюх Г.В., Артюх В.Г., Артюх В.С.* К вопросу защиты от поломок непрерывных широкополосных станов // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1997. – Вып. 2 – С. 58–68.
3. Progress in Equipment Diagnosis Techniques at Kawasaki Steel Corporation / *Akira Ichihara, Satoshi Kasai, Hiromasa Yamamoto and others* // Kawasaki Steel Giho. – 1990. – №22, Р. 69–73.
4. *Крисанов А.Ф., Кузрман В.Ф. и др.* Анализ причин аварий оборудования листопркатных станов и меры по их предупреждению. – М., 1985. – 36 с. – (Черная металлургия: обзорная информация / Институт «Черметинформация»).
5. *Артюх В.Г.* Особенности нагружения листовых прокатных станов // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2005. – Вып. 8 – С. 24–30.
6. Влияние крутильных колебаний в линии привода на горизонтальные усилия в четырехвалковой прокатной клетки / *Гарцман С.Д., Рубанович Ю.А., Сафронов К.К. 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.
7. Проблемы защиты металлургических машин от поломок / *Большаков В.И., Цанко В.К.* // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1998. – №3, С. 89–91.

8. Методика исследования динамики приводов металлургических машин / *Большаков В.И.* // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – №3, С. 72–78.
9. *Артюх В.Г., Артюх Г.В., Мазур В.О.* Горизонтальные силы при прокатке // Вестник Приазовского Государственного Технического Университета. – Мариуполь, 2009. – Вып. №19. – С. 128–132.
10. *Артюх В.Г., Казанцев С.В., Мазур В.О.* Влияние времени захвата раската рабочими валками на динамические нагрузки в листовых прокатных клетях // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2010. – Вып. 12 – С. 163–171.
11. *Адамия Р.Ш.* Оптимизация динамических нагрузок прокатных станов. – М.: Металлургия, 1978. – 232 с.
12. Конструктивные меры уменьшения горизонтальных сил в клетях прокатных станов / *Артюх В.Г., Артюх Г.В., Мазур О.В. и др.* // Сталь. – 2011. – № 7, С. 64–66.
13. SMS SIEMAG, SMS group. HEAVY-PLATE MILLS, References // SMS SIEMAG AG. Hot Rolling Mills Division. – Hilchenbach (Германия), 2012. – 60 с.
14. SIEMENS VAI, Metals Technologies. Reference, Dongkuk Steel Mill Co. Ltd: No. 2 Plate Mill // Siemens VAI, Metals Technologies Ltd. – Sheffield (Великобритания), 2007. – 6 с.
15. *Поваляев В.Д.* Динамика главного привода рабочих валков в условиях нестационарного процесса асимметричной прокатки // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1997. – Вып. 2 – С. 39–49.
16. *Артюх В.Г., Мазур В.О.* Возможность горячей прокатки стального листового проката большей массы // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2011. – Вып. 13 – С. 148–153.
17. 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.
18. Влияние износа элементов клетей четырехвалкового стана на точность горячекатаной полосы / *Комаров А.Н.* // Обработка металлов давлением. – 1980. – № 60, С. 117–121.
19. Снижение динамических нагрузок при захвате полосы на широкополосных станах / *Плахтин В.Д., Симочкин Б.В., Москвитин С.А. и др.* // Черная металлургия: Бюллетень ин – та «Черметинформация». – 1983. – №10. – С. 36–37.

Рецензент: д.т.н., проф.

Статья поступила 03.12.2013.