

## РАСЧЕТ ПРОГИБА РАБОЧИХ И ОПОРНЫХ ВАЛКОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНОГО СТАНА

*Рассчитывается прогиб рабочих и опорных валков клетей нового прокатного стана с использованием программы MSC.visualNastran 4D. При прокатке на новом стане в результате снижения давления прокатки уменьшается упругий прогиб валков и, как следствие, снижается поперечная разнотолщинность и улучшается планшетность прокатываемых полос.*

**Ключевые слова:** разнотолщинность полосы, планшетность полосы, прокатный стан, рабочая клеть, рабочие валки, опорные валки, усилие прокатки.

На современном этапе развития прокатного производства основной тенденцией следует считать освоение и внедрение в производство принципиально новой техники и технологии, обеспечивающей наряду с увеличением объема производства – повышения качества листовой стали.

Одним из основных направлений повышения качества прокатанных полос является обеспечение минимальной поперечной разнотолщинности и планшетности [1].

Основным фактором, определяющим продольную разнотолщинность холоднокатаного листа, является разнотолщинность исходного горячекатаного листа [1]. Для получения высокоточных холоднокатаных листов продольная разнотолщинность подката не должна превышать 0,08-0,10мм.

Исследованиями установлено [1], что если коэффициент выравнивания (отношение относительных разнотолщинностей до и после прокатки) больше единицы, то относительная разнотолщинность полосы до прокатки больше, чем после прокатки. Следовательно, полоса при холодной прокатке выравнивается. В противном случае качество полосы ухудшается, ее продольная разнотолщинность увеличивается.

На существующих прокатных станах холодной прокатки коэффициент выравнивания изменяется в пределах от 1,6 до

0,6, т. е. полоса при холодной прокатке может как выравниваться, так и увеличивать продольную разнотолщинность [1].

Важнейшими параметрами прокатки, которые определяют коэффициент выравнивания, являются обжатие  $\Delta h = H - h$  ( $H, h$  – высота полосы до и после прокатки), натяжения  $\sigma_i$  между  $i$ -й и  $(i - 1)$ -й клетями, а также между крайними клетями и моталками  $\sigma_0$  и  $\sigma_k$  [1]. Однако на коэффициент выравнивания влияют также другие факторы, прежде всего все те, которые снижают давление металла на валки и силу прокатки (коэффициент трения, состояние поверхности валков, скорость прокатки и т. д.).

Экспериментально установлено [1], что повышение обжатия полосы способствует ее выравниванию. Это связано с тем, что с ростом обжатия  $\Delta h$  доля неровностей  $\delta h$  и их влияние на колебание давления ослабевают.

Натяжение полосы между клетями снижает давление и, следовательно, способствует выравниванию полосы, хотя колебания натяжений увеличивают продольную разнотолщинность [1]. Стабильное и высокое напряжение натяжения на уровне  $(0,3-0,5)\sigma_{si}$  считается оптимальным на непрерывных станах; более высокие натяжения опасны, так как увеличивается обрывность листа между клетями, особенно при наличии динамических эффектов, связанных с прокаткой швов. С другой стороны, для обеспечения качест-

\* - автор, с которым следует вести переписку.

ва поверхности листа к концу прокатки натяжения снижают. Обеспечить стабильное заданное натяжение можно только с использованием системы автоматизированного регулирования натяжения.

Выравниванию полосы способствуют также другие технологические факторы, снижающие силу прокатки. Применение эффективных эмульсий снижает силу прокатки, расход энергии на прокатку, а также уменьшает продольную разнотолщинность и улучшает планшетность полосы.

Одним из направлений в технологии холодной прокатки является несимметричная прокатка, т. е. прокатка в валках, имеющих разную окружную скорость вращения [1]. При холодной несимметричной прокатке увеличивается точность и уменьшается продольная и поперечная разнотолщинность листа на 25-30 %. Кроме того, кинематика, при которой в очаге деформации существует зона с противоположным направлением сил трения, обеспечивает выравнивание механических свойств по сечению проката, снижение упрочнения стали, улучшение чистоты поверхности листа.

Для выравнивания продольной разнотолщинности весьма эффективен ПВ-процесс или решения, использующие идеи этого процесса [1]. Основные идеи ПВ-процесса сводятся к созданию очага деформации, в котором, во-первых, снижается давление металла на валки и сила прокатки за счет рассогласования скоростей валков и, во-вторых, образуется резерв сил трения на участке охвата, обеспечивающий саморегулирование процесса прокатки. На основе этого предложено несколько конструктивных решений. Например, при прокате на стане кварто рабочие валки смещают относительно линии центров опорных валков на величину до 5 мм по направлению прокатки. При этом увеличивается длина контакта металла с валками и образуются дополнительные (резервные) силы трения, которые способствуют меньшему колебанию толщины полосы при колебаниях силы

прокатки. При смещении рабочих валков они плотнее прижимаются к подушкам и станинам, поэтому устраняется вибрация полосы при прокатке на высоких скоростях.

К поперечной разнотолщинности холоднокатаной полосы предъявляются очень высокие требования [1]. Допуск по ширине по разнотолщинности некоторых полос находится на уровне  $\pm 0,03$  мм. Основная причина заключается в том, что поперечная разнотолщинность определяет планшетность полосы [1], а требования по планшетности для многих видов холоднокатаного листа очень высоки.

Чтобы полоса при холодной прокатке выходила из валков планшетной, необходимо обеспечить в поперечном направлении коэффициент выравнивания  $K = 1$  [1]. Относительная разнотолщинность полосы при холодной прокатке должна сохраняться такой, какую получили при горячей прокатке [1]. Всякая попытка исправить поперечную разнотолщинность начальной полосы путем перераспределения обжатия по ширине приведет к потере планшетности. И наоборот, если требуется исправить исходную непланшетность подката, то при холодной прокатке этого нельзя добиться только путем неравномерного обжатия по ширине. Таким образом, планшетность холоднокатаной полосы формируется в основном при горячей прокатке подката.

Поперечная разнотолщинность холоднокатаной полосы в допустимых пределах неопасна [1]. Наоборот, если подкат имеет несколько большую толщину в середине (до 0,08 мм), чем по кромкам, т. е. имеет чечевицеобразную форму, то процесс холодной прокатки протекает более устойчиво, чем при идеально ровной форме подката. При этом при прокатке возникают поперечные силы, удерживающие полосу на середине бочки валков. Таким образом, при горячей прокатке стремятся сформировать, а при холодной – поддержать определенную поперечную разнотолщинность в пределах заданного допуска. Но условие планшет-

ности полосы  $K = 1$  должно выполняться строго. Нарушение его приводит к волнистости и коробоватости, к серповидности полосы, к телескопичности рулона при смотке, к высоким остаточным напряжениям в готовом листе и т. д.

Следует отметить, что и продольная разнотолщинность полосы так же не очень опасна. Гораздо опаснее ее неравномерность по ширине листа [1]. При этом на листе образуются те же виды брака. Поэтому многие мероприятия, направленные на улучшение планшетности листа, в комплексе решают проблемы и продольной, и поперечной разнотолщинности.

Итак, поперечная разнотолщинность холоднокатаного листа в идеальном случае повторяет разнотолщинность подката [1]. При холодной прокатке она будет изменяться в ту или иную сторону за счет воздействия факторов, которые имеют место при холодной прокатке. Это будет сопровождаться потерей планшетности.

Необходимо отметить, что на поперечную разнотолщинность при холодной прокатке влияют те же факторы, что и при горячей прокатке, но значимость каждого из них различна [1].

Прогиб рабочих и опорных валков вносит наибольший вклад в поперечную разнотолщинность листа [1]. Ось рабочего валка принимает вид выпуклой кривой. Соответственно, для ее компенсации по такой же кривой необходимо шлифовать бочку рабочего валка. На всех станах холодной прокатки один рабочий валок имеет станочную профилировку выпуклой формы. Поскольку прогиб зависит от силы прокатки, то на стане необходимо иметь автоматизированную систему противоизгиба. На станочную профилировку валков, рассчитанную при базовой силе прокатки  $P_0$ , накладывается дополнительный изгиб валков при фактической силе прокатки  $P$ . Системы противоизгиба применяются также на станах горячей прокатки, но при холодной прокатке требования к ним гораздо выше, так как регулировки ведутся в пределах более

жестких допусков. Кроме того, при холодной прокатке кривая прогиба валка в большей мере, чем при горячей, зависит от эпюры распределения давления на валки вдоль оси валка.

В работе [1] отмечается, что при холодной прокатке узких листов эпюра давления по ширине имеет купол в середине полосы, а при прокатке широких полос, наоборот, по кромкам давление выше, чем в середине. Кроме того, станочная профилировка валков влияет на распределение давления по ширине полосы, увеличивая его к середине. Таким образом, вид кривой прогиба может изменяться в широких пределах, что накладывает определенные требования как на формирование станочного профиля, так и на работу системы противоизгиба.

Существенное влияние на плоскостность полосы оказывает натяжение [1]. Оно выполняет роль стабилизирующего фактора, способствующего выравниванию вытяжек по ширине полосы. Удельные натяжения (на 1 мм ширины) распределяются по ширине неравномерно: они больше на тех участках, которые имеют меньшую вытяжку. Из литературы известно [1], что даже при отсутствии натяжения при идеально ровном обжати по ширине скорость течения металла в очаге деформации по ширине полосы распределяется неравномерно. При неравномерной деформации по ширине неравномерность скоростей течения усугубляется. На том участке полосы, на котором высотная деформация по каким-то причинам уменьшается, т. е. высота щели увеличивается, вытяжка снижается. При натяжении этот участок полосы получает дополнительное растяжение. Контактное давление снижается, упругое сплющивание уменьшается, профиль полосы и контактное давление по ширине полосы выравниваются. Таким образом, при наличии натяжения очаг деформации имеет дополнительную возможность самовыравнивания неравномерности удельных натяжений по ширине полосы и толщины полосы.

Установлено, что эффект самовыравнивания толщины полосы по ширине определяется не только неравномерностью натяжений и упругого сплющивания [1]. Большое влияние оказывает жесткость клетки и полосы. Самовыравнивание поперечного профиля возрастает с увеличением жесткости полосы, т. е. с уменьшением ее толщины и увеличением ширины, обжатия и степени наклепа. Отсюда можно сделать вывод о целесообразности увеличения обжатий в последних клетках стана, так как это позволит полнее использовать их выравнивающее действие.

Для увеличения эффекта самовыравнивания полезно увеличение диаметра валков стана [1]. При этом возрастает упругое сплющивание валков, и оно более чутко реагирует на рассмотренные воздействия.

Рассогласование скоростей валков также способствует выравниванию полосы [1]. Установлено, что наилучшая плоскостность достигается за счет эффекта саморегулирования, при котором по одному валку полностью исчезает зона опережения, т. е. при рассогласовании скоростей на 6-8 %.

Известно [1], что давление металла на валки неравномерно распределяется по ширине очага деформации, и при холодной прокатке реализуются практически любые эпюры распределения. Таким же образом распределяется по ширине упругое сплющивание валков. При горячей прокатке упругое сплющивание невелико, и его необходимо принимать во внимание только при толщинах менее 2 мм. При холодной прокатке доля, вносимая упругим сплющиванием валков в общую поперечную разнотолщинность полосы, очень велика.

Упругое сплющивание происходит как на контакте рабочих валков с металлом, так и между валками [1]. При расчетном давлении на валки упругое сплющивание можно рассчитать и учесть при станочной профилировке валков. Однако если фактическая эпюра давлений отличается от расчетной, то появляется дополни-

тельная продольная разнотолщинность и неплоскостность полосы. Устранить ее удастся частично с помощью системы противоизгиба или иным путем, но полностью ликвидировать невозможно.

Действенным средством регулирования поперечного профиля и плоскостности полосы может служить контролируемое распределение удельных натяжений по ширине полосы [1]. Существуют контактные роликовые тензометры, которые позволяют достаточно точно измерять удельные натяжения по ширине. Однако технических средств, которые позволяли бы непосредственно управлять удельными натяжениями при прокатке, не существует. Удельные натяжения можно изменять косвенным образом, путем изменения общего натяжения в комплексе с работой системы противоизгиба. Регулирование теплового профиля валка слишком инерционно и применяется на очень тонких полосах.

Следует заметить, что изменение удельных натяжений только в определенных пределах положительно влияет на плоскостность. При натяжениях меньше предельных есть опасность повысить коробчатость полосы, а при натяжениях выше верхнего предела увеличивается опасность образования волны по кромкам.

На станах холодной и горячей прокатки разработаны системы, которые позволяют изменять профилировку валка в процессе прокатки [1]. Так, в шестивалковой клетке, которая содержит пару промежуточных валков, расположенных между рабочими и опорными валками, валки имеют возможность перемещаться в осевом направлении. При изменении ширины прокатываемой полосы промежуточные валки устанавливаются всегда так, чтобы их торцы соответствовали новой ширине полосы. Таким образом, поперечный профиль полосы стабилизируется на всех ширинах полос.

Известен четырехвалковый стан с перемещающимися рабочими валками [1]. В данном стане рабочие валки имеют

скосы по краям бочки. При перемещении рабочих валков вдоль оси изменяется эпюра распределения давления металла по ширине полосы. В развитие этой идеи фирма «Шлеман-Зимаг» разработала систему SVC (бесступенчатая регулируемая бочкообразность) [1]. Рабочие валки стана кварто имеют S-образную форму. В нормальном положении валков щель между ними имеет равную толщину по всей ширине полосы, обжатие по ширине полосы будет постоянным. Если сместить валки, то обжатие увеличится в середине по ширине, а при обратном осевом перемещении валков – на кромках листа. Система SVC на станах холодной прокатки предназначена для регулирования планшетности, а на станах горячей прокатки она позволяет формировать профиль поперечного сечения для последующей холодной прокатки.

Таким образом, в настоящее время для прокатки полос с заданными толщиной, профилем и планшетной формой ведутся работы, направленные на совершенствование прокатного оборудования, создание новых конструкций прокатных станов и валковых систем, разработку автоматических систем управления толщиной, профилем и планшетностью прокатываемых полос, создание новых способов прокатки и валковых систем для их реализации.

По нашему мнению, лучшим методом регулирования поперечной разнотолщинности и планшетности является уменьшения усилия прокатки от одной клетки к другой в направлении прокатки. С этой целью, для регулирования продольной и поперечной разнотолщинности и планшетности и уменьшения усилия прокатки от одной клетки к другой в направлении прокатки, нами разработана конструкция нового прокатного стана [2].

Предлагаемый стан содержит рабочие клетки, электродвигатель, муфту, опорные неприводные валки, рабочие приводные валки, станину, опорную плиту, анкерные болты. Клетки, имеющие привод от одного двигателя переменного тока, содержат рабочие и опорные валки постоянного

диаметра, а в последовательно расположенных клетях диаметр рабочих валков уменьшается в направлении прокатки. Соответственно, диаметр опорных валков увеличивается. При этом вращение валков осуществляют через общую цепную передачу, индивидуальную муфту, одинаковые диаметром накрест лежащие колеса и шестерни, имеющие зубчатую передачу, а диаметры рабочих и опорных валков определяют по формуле, соответственно:

$$D_{i+1} = \frac{h_i \cdot D_i \cdot n_i (1 + s_i)}{h_{i+1} \cdot n_{i+1} (1 + s_{i+1})}; \quad (1)$$

$$D_{j-1} = \frac{h_j \cdot D_j \cdot n_j (1 + s_j)}{h_{j-1} \cdot n_{j-1} (1 + s_{j-1})};$$

где  $h_i, h_j$  – толщина прокатываемой полосы в  $i$  или  $j$  клетки;  $n_i$  и  $n_j$  – частота вращения валков  $i$  или  $j$  клетки;  $N$  – порядковый номер клетки;  $s_i$  и  $s_j$  – опережение на выходе из валков  $i$  или  $j$  клетки ( $i = 1, 2, \dots, N; j = N, \dots, 2, 1$ ).

В предлагаемом стане горизонтальные оси верхних и нижних валков первых трех клеток без нажимного механизма смещены от оси прокатки в вертикальном направлении на величину:

$$\Delta x_i = 0,25 \cdot k_n \cdot D_{pi} \cdot \alpha_i^2, \quad (2)$$

где  $D_{pi}$  – диаметр новых рабочих валков  $i$ -той клетки, мм;  $k_n$  – коэффициент переточки;  $\alpha_i$  – допускаемый угол захвата для валков  $i$ -той клетки.

Необходимо отметить, что диаметр делительной окружности колес каждой клетки равен диаметру рабочих валков соответствующей клетки, а заданное расстояние между рабочими валками от одной клетки к другой увеличено на величину опережения.

Необходимо отметить, что выполнение диаметров рабочих валков уменьшающим, а опорных валков увеличивающим в направлении прокатки, позволяет значительно уменьшить давление металла на валки в клетях, расположенных в конце прокатного стана. При этом использование рабочих и опорных валков, диаметры которых определяются по формуле (1),

позволяет уменьшить до заданной величины межклетевое натяжение. Это достигается за счет строгого выполнения постоянства секундных объемов при прокатке в различных клетях и уменьшения диаметра рабочих валков. Отсутствие в первых трех клетях нажимного механизма повышает жесткость стана. Снижение усилия, действующего на валки, а так же повышение жесткости стана позволяют уменьшить размеры клетей и мощность привода, с одной стороны, и повысить точность прокатываемой полосы, с другой стороны. Уменьшение межклетевого натяжения до заданной величины позволяет избежать разрыва полос в процессе прокатки и уменьшить энергосиловые параметры прокатки.

Увеличение заданного расстояния между рабочими валками от одной клетки к другой на величину опережения также уменьшает межклетевое натяжение.

Смещение горизонтальных осей верхних и нижних валков первых трех клетей от оси прокатки в вертикальном направлении на величину, определяемую по формуле (2), позволяет без нажимного механизма, с максимальным или минимальным углом захвата в первых трех клетях прокатывать определенный сортмент тонких листов. Тем самым появляется возможность назначать нужный режим обжатия при прокатке в данном стане.

Осуществление вращения валков от одного двигателя переменного тока через общую цепную передачу, индивидуальную муфту и зубчатую передачу, в которой накрест лежащие колеса и шестерни имеют одинаковые диаметры, позволяет при прокатке в различных клетях строго соблюдать постоянство секундных объемов, и тем самым без разрыва полос произвести прокатку в данном стане. Этому также способствует равенство диаметров делительной окружности колес и диаметров рабочих валков каждой клетки.

Таким образом, использование предлагаемого непрерывного стана для прокатки полос позволяет повысить качество

получаемых полос.

Выше было отмечено, что прогиб рабочих и опорных валков и упругое сплющивание в наибольшей степени влияют на продольную и поперечную разнотолщинность и планшетность [1]. Поэтому в данной работе были рассчитаны прогиб и упругое сплющивание рабочих валков нового прокатного стана, имеющего клеть «дуо» или «кварто».

Рабочая клеть предлагаемого прокатного стана представляет собой многокомпонентную машину, включающую вращающиеся прокатные валки, подшипники, станину, установочные механизмы валков, устройства крепления и другие узлы и детали. Произвести расчет прогиба и упругого сплющивания рабочих валков такой машины является весьма сложным и трудоемким процессом, требующим проведения большого объема расчетных и графических работ.

Учитывая вышесказанное, методику расчета прогиба и упругого сплющивания реализовали с использованием программы конечно-элементного анализа MSC.visual Nastran 4D. Система компьютерного моделирования MSC.visual Nastran 4D позволяет исследовать кинематику, динамику механизмов с возможностью расчета напряженно-деформированного и теплового состояния как отдельных звеньев, так и механизма в целом.

При расчете прогиба и упругого сплющивание рабочих клетей в среде MSC.visualNastran 4D нами было выполнено следующие операции:

- создание геометрической модели каждой детали и сборка узлов клетей;
- выбор материалов деталей, их механических и физических свойств (модуль упругости, плотность, коэффициент Пуассона, предел прочности и т. п.);
- формирование кинематических и статических граничных условий;
- создание сетки конечных элементов детали;
- определение напряженно-деформированного состояния;

• оценка уровня полученных упругих деформаций и напряжений в объеме каждой детали относительно требуемых критериев жесткости и прочности и введение соответствующих изменений в конструкцию стана.

Исходными данными для расчета являются твердотельная геометрическая форма конструкции стана, силы и условия закрепления, приложенные к ним, а также условия сопряжения кинематических пар конструкции клетей.

Сборочная трехмерная геометрическая модель стана была построена в CAD программе Inventor и посредством встроенного транслятора импортирована в среду MSC.visualNastran 4D с принятыми кинематическими связями. Данный подход позволяет улучшить связь этапов автоматизированного проектирования сложных механизмов. Для возможности автоматической коррекции геометрии модели стана был использован метод параметризации геометрических размеров конструкции. Данный метод позволяет по результатам расчета на прочность вносить соответствующие изменения в конструкцию стана.

В ходе предварительного анализа работы стана, исходя из условия симметрии работы элементов конструкции, а также для упрощения расчетной схемы, были приняты к расчету наиболее нагруженные силовые элементы конструкции, такие, как валки, нажимные механизмы,

клетки и шейки валков. На рис. 1 приведена картина распределения суммарных перемещений в валках стана новой конструкции.

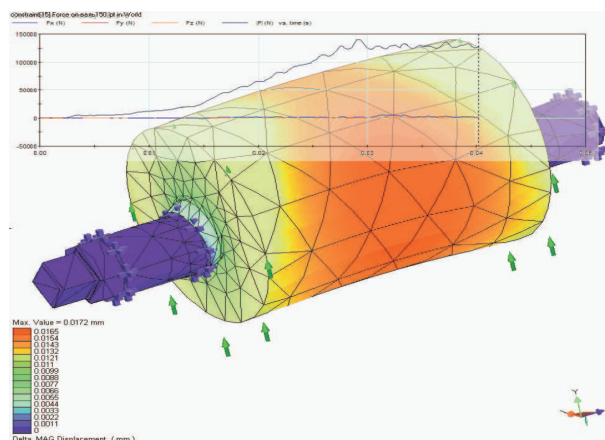


Рис. 1. Картина распределения суммарных перемещений в валках стана новой конструкции.

Кинематические связи между элементами моделировались кинематическими парами вращения и скольжения для общих поверхностей сопряжения. При этом учитывались соударения и трение в валках, клетях и т. д.

Рассмотрим основные результаты расчета энергосиловых параметров, прогиба и упругого сплющивания, возникающих в валках клетей нового стана. Технические характеристики рабочих клетей укрупненного лабораторного стана приведены в таблице 1.

Таблица 1

Техническая характеристика рабочих клетей

Параметры	Номер клетки					
	I	II	III	IV	V	
Расстояние между клетями, м	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Диаметр валков *, $D_p$ , мм	150	125	100	75	50	
Диаметр валков **	$D_p$ , мм	150	125	100	75	50
	$D_{оп}$ , мм		150	150	150	150
Скорость прокатки, $v_{пр}$ , м/с	0,5	0,67	0,92	1,45	2,03	
Толщина до прокатки, $h_0$ , мм	4	2,5	1,75	1,15	0,9	
После прокатки, $h_1$ , мм	2,5	1,75	1,15	0,9	0,7	
Абсолютное обжатие, $\Delta h$ , мм	1,5	0,75	0,6	0,25	0,2	
Относительное обжатие:						
$\varepsilon = \Delta h / h_0$	0,375	0,3	0,34	0,22	0,22	

Примечания: \* – вариант, в котором в клетях было установлены только рабочие вал-

ки;

\*\* – вариант, в котором в клетях были установлены рабочие и опорные валки.

В MSC.SuperForge инструменты принимаются абсолютно жесткими и обеспечивают свойства теплопроводности и теплопередачи, т. е. удельная теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность приняты во внимание. Из базы данных материалов назначаем материал инструмента H13. Для этого материала плотность и тепловые свойства программа назначила по умолчанию.

Взаимодействие между жестким валком и деформируемым материалом заготовки моделируется с помощью контактных поверхностей, которые описывают контактные условия между поверхностями валков и поверхностью 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 толстым листом смоделирован трением по Кулону, коэффициент трения был принят 0,5. Из базы данных материалов назначали материал S20C (сталь Ст.08кп по стандарту стран СНГ) прокатываемой полосе.

Для того, чтобы рассчитать прогиб и упругие сплющивания валков, необходимо рассчитать усилия прокатки на новом стане.

Результаты расчета усилий прокатки, возникающих в клетях нового стана, представлены на рис. 2.

На рис. 3 – 7 представлены результаты расчета прогиба и упругого сплющивания валков от первой до последней клетки.

При прокатке в клетях нового стана, благодаря уменьшению длины дуги захвата, т. е. длины очага деформации, процесс прокатки имеет преимущества перед обычным процессом прокатки, заключающиеся в следующем.

Значительное (от 2 до 10 раз) снижение давления металла на валки (рис. 3). Это позволяет значительно снизить металлоемкость прокатного оборудования при проектировании и запуске в работу прокатных станов новой конструкции.

При прокатке на новом стане в результате снижения давления прокатки уменьшается упругий прогиб валков и, как следствие, снижается поперечная разнотолщинность и улучшается планшетность прокатываемых полос (рис. 3 – 7).

Однако максимальный прогиб и упругое сплющивание рабочего валка при прокатке в новом стане, в клетях которого отсутствуют опорные валки, до десяти раз больше по сравнению с клетями, где имеются опорные валки (рис. 3 – 7).



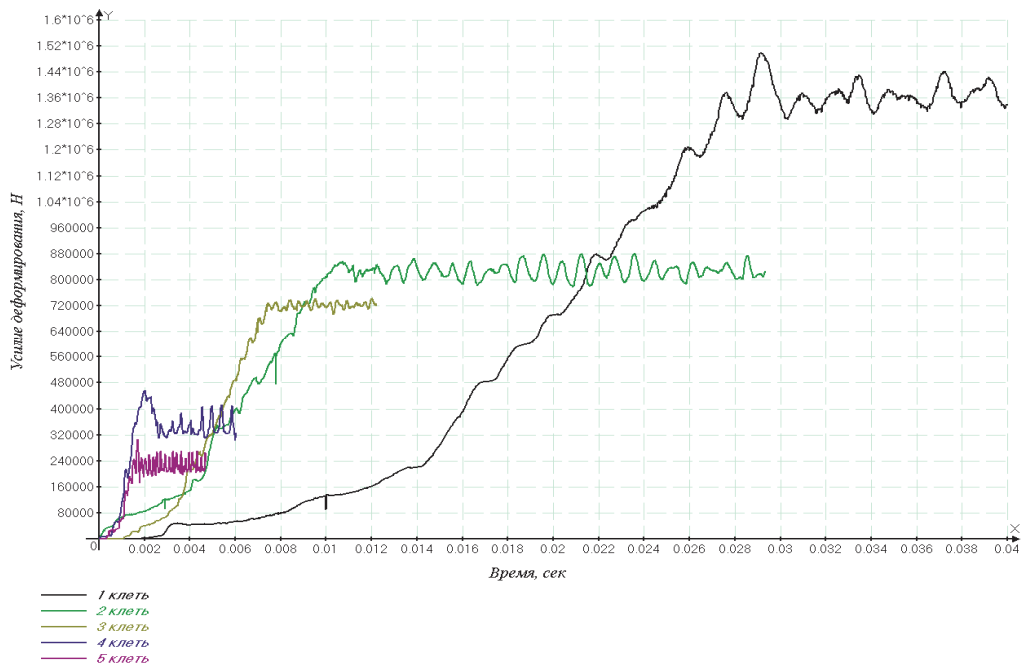


Рис. 2. Распределение усилия прокатки на новом пяти клетевом стане.

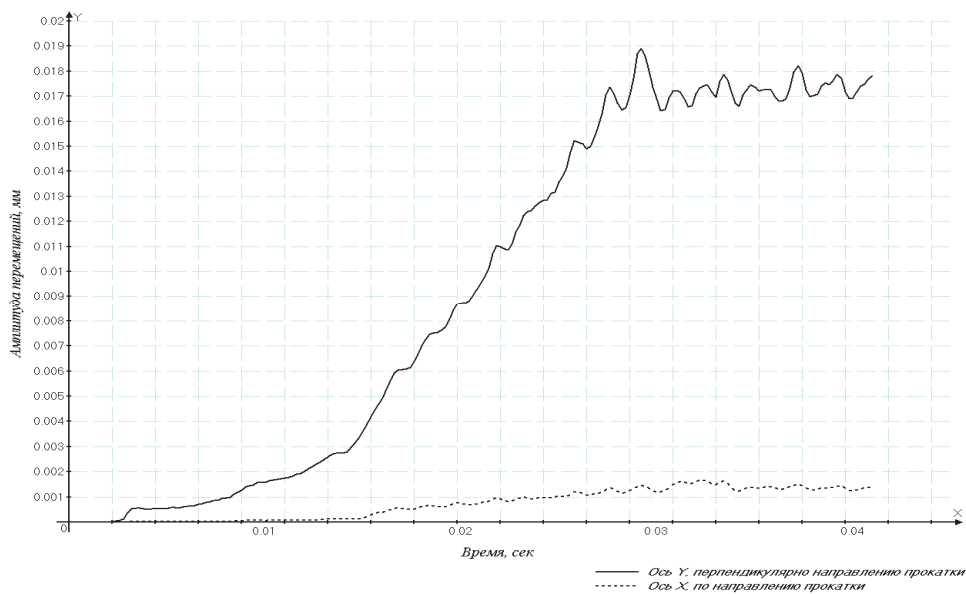


Рис. 3. Максимальный прогиб и упругое сплющивание рабочего вала при прокатке в первой клет.

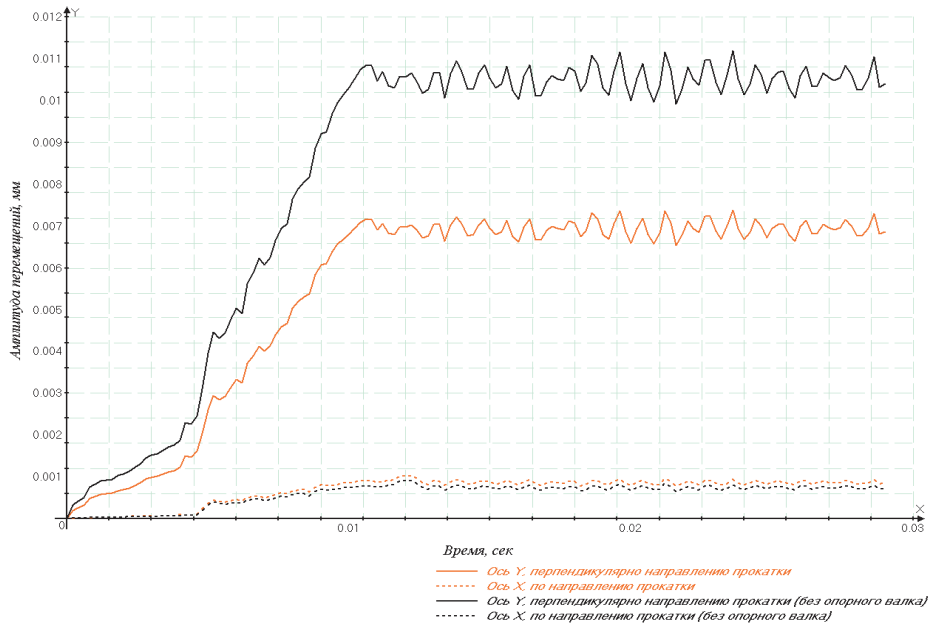


Рис. 4. Максимальный прогиб и упругое сплющивание рабочего вала при прокатке во второй клетке.

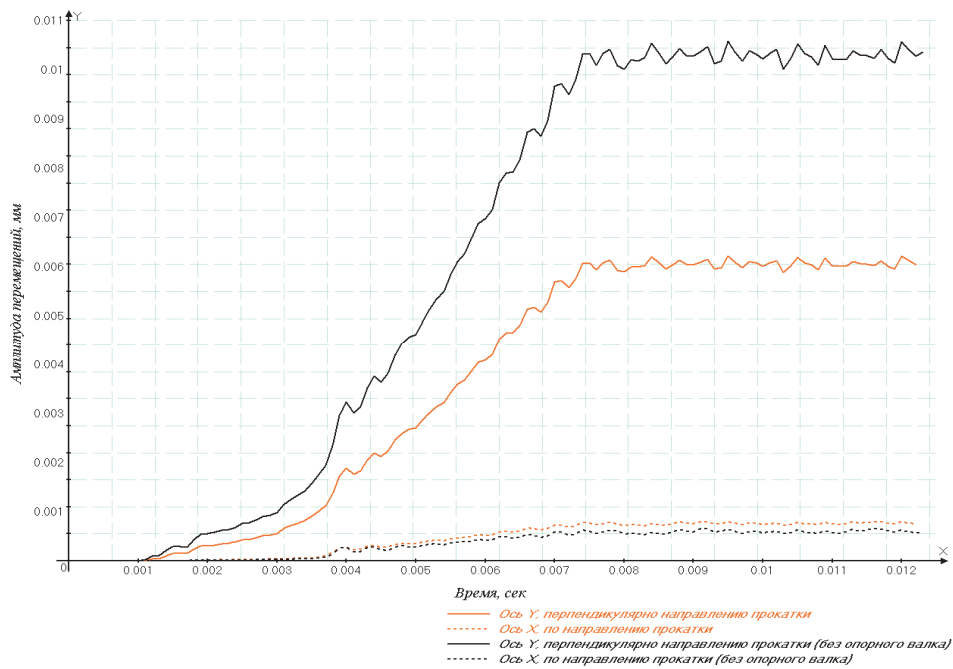
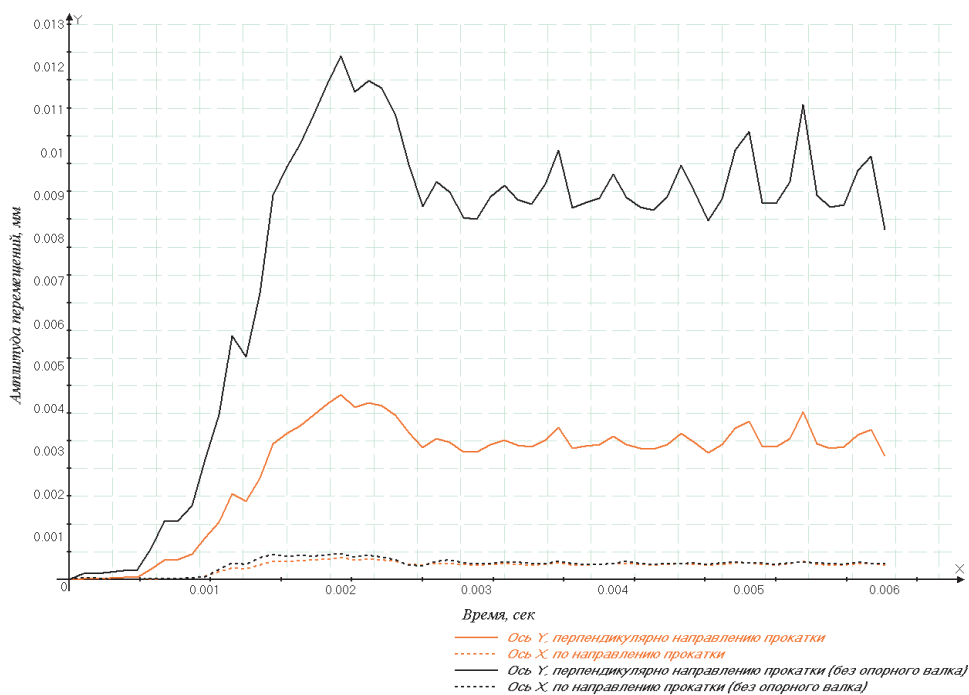
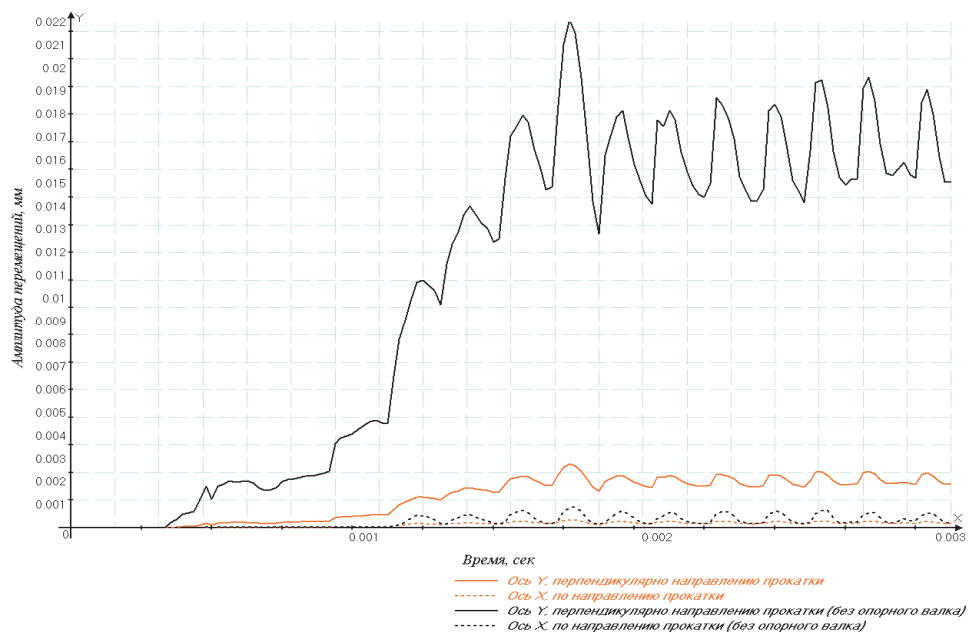


Рис. 5. Максимальный прогиб и упругое сплющивание рабочего вала при прокатке в третьей клетке.



**Рис. 6. Максимальный прогиб и упругое сплющивание рабочего вала при прокатке в четвертой клетки.**



**Рис. 7. Максимальный прогиб и упругое сплющивание рабочего вала при прокатке в пятой клетки.**

Максимальные усилия, возникающие в направлении оси  $y$ , т. е. в вертикальном направлении, приводят к возникновению максимальных прогибов и упругих сплющиваний в этом же направлении прокатки (рис. 3 – 7).

Небольшие усилия, возникающие в направлении оси прокатки, т. е. оси  $x$ , приводят к появлению небольших упругих перемещений материала валков в этом же направлении (рис. 3 – 7). При этом упругие перемещения материала

валков в направлении оси  $x$  при прокатке в клетях с опорными валками или без него примерно одинаковы (рис. 3 – 7).

При увеличении скорости прокатки на стане новой конструкции происходит сравнительно небольшой рост динамических нагрузок в основных узлах клетей и линии привода. Механические колебания узлов клетей и линий приводов при этом становятся причиной небольших по величине вибраций. Исследования показали, что небольшие по величине вибрации проявляются в последних клетях нового стана (рис. 3 – 7).

Давление прокатки при прокатке в новом стане не зависит от величины коэффициента трения. Это позволяет упростить конструкцию валковой системы прокатного стана, облегчить систему охлаждения и смазки.

Чем тоньше прокатываемая полоса, тем процесс прокатки на новом стане эффективнее по сравнению с обычной прокаткой с точки зрения повышения точно-

сти геометрических параметров – продольной разнотолщинности и планшетности.

Процесс прокатки на новом стане эффективен при прокатке сильно упрочняющихся и труднодеформируемых сталей и сплавов, так как усилие прокатки уменьшается в процессе прокатки.

Использование нового стана при прокатке тонких полос позволяет упростить систему автоматического регулирования толщины полосы (САРТ), а в ряде случаев – отказаться от их применения.

### *Литература*

1. Технология прокатного производства / С. А. Машков [и др.]. Алматы: Tetaprint, 2007. 334 с.
2. Непрерывный стан для прокатки полос из сталей и сплавов : пат. 20969 Республика Казахстан, заявка № 2007/0613; заявл. 11.05.2007; опубл. 16.03.09, Бюл. 3. 73 с.