

УДК 621.771.06

Сатонин А. В.
Бережной Н. Н.
Коренко М. Г.
Староста Н. В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ, ДЕФОРМАЦИЙ И ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ ПОЛОС И ЛЕНТ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЧИСТОВЫХ РАБОЧИХ КЛЕТЯХ

Дальнейшее развитие черной металлургии Украины неразрывно связано с расширением сортамента и повышением уровня потребительских свойств плоского металлопроката, к которому относятся полосы и ленты.

Промышленное производство горячекатаных лент, листов и полос, включающих в себя сортовые полосовые и ленточные заготовки, характеризующиеся высокими показателями точности и качества боковых кромок, является одним из наиболее динамично развивающихся направлений в черной и цветной металлургии. Именно сортамент и объемы производства плоского металлопроката в значительной мере характеризуют степень индустриализации и развития научно-технического прогресса в стране.

Благодаря достаточно высокой степени развития научных подходов на период середины 60-х годов прошлого века на территории СНГ к концу 80-х годов были созданы и освоены сортовые полосовые (штрипсовые) станы 300, которые практически полностью обеспечили горячекатаными полосовыми и ленточными заготовками потребности машиностроения, строительной индустрии, трубной, горнодобывающей, химической и других отраслей промышленности.

Расчетной базой для проектирования технологий и оборудования в то время служили инженерные методы расчета их параметров, для которых характерно было принятие ряда серьезных допущений и упрощений, а само проектирование выполнялось практически «в ручном» режиме с ограниченным применением вычислительной техники [1–4].

Поскольку требования к качеству прокатной продукции постоянно повышаются, а переход на рыночные отношения диктует необходимость высокой конкурентоспособности предприятий с точки зрения и экономических показателей, то для создания новых и совершенствования действующих технологий и оборудования потребовалась разработка более высокого уровня научного обеспечения этих процессов и переход на автоматизированный расчет и проектирование их параметров.

Целью работы является развитие методов расчета и разработка новых конструктивных решений механического оборудования сортовых прокатных станов, обеспечивающих повышение качества металлопроката при обязательном выполнении условий ресурсосбережения.

Используя наиболее общие признаки, всевозможные технологические и конструктивные схемы по созданию предварительно напряженных рабочих клеток прокатных станов, обеспечивающих повышение точности геометрических характеристик готового металлопроката [5, 6], можно условно подразделить на две основные, а именно, на схемы создания предварительного напряжения по подушкам (рис. 1, а) и схемы создания предварительного напряжения по буртам бочек рабочих валков (рис. 1, б). С точки зрения более детального анализа конструкции механизмов по созданию предварительного напряжения могут иметь самые различные исполнения. В частности, создание предварительного напряжения по подушкам рабочих валков является возможным за счет использования гидроприводов, клиновых пар, передач винт-гайка и так далее, а основным преимуществом в этом случае является отсутствие дополнительных нагрузок непосредственно на рабочие валки и их подшипниковые опоры.

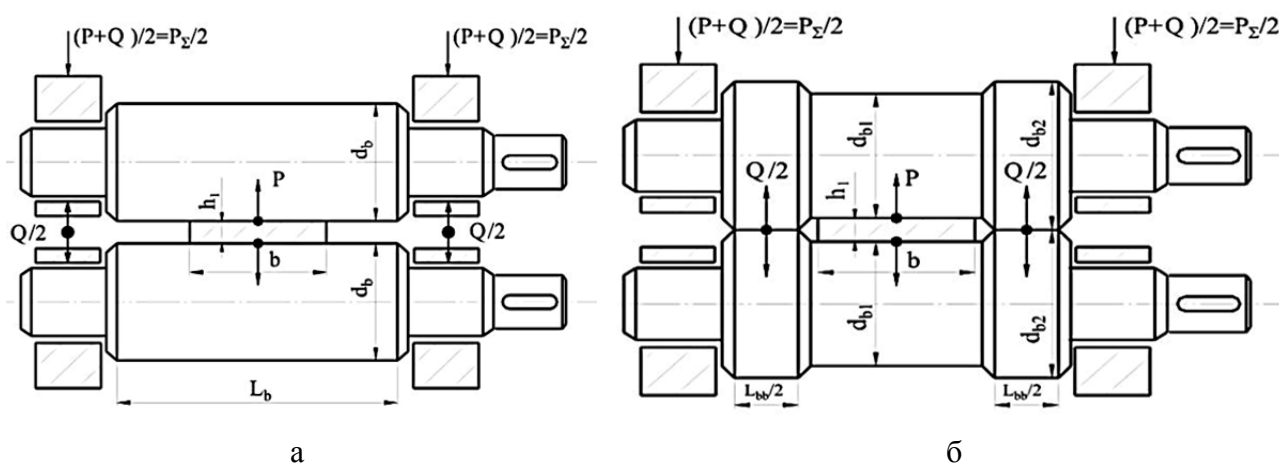


Рис. 1. Расчетные схемы чистовых рабочих клеток штрипсовых и ленточных станов горячей прокатки, являющихся предварительно напряженными по подушкам (а) и по буртам (б) рабочих валков

Возможности создания предварительного напряжения по буртам рабочих валков конструктивно более ограничены, кроме того, к недостаткам данного технического решения следует отнести наличие дополнительных нагрузок на рабочие валки, а также наличие дополнительных ограничений на сортамент готового металлопроката по его толщине и ширине. Вместе с тем, точность, результирующих геометрических характеристик в этом случае в силу ряда причин является более высокой. Отмеченное выше свидетельствует о целесообразности проведения сопоставительного анализа рассмотренных (рис. 1) и традиционных схем процесса горячей прокатки полос и лент, направленного на повышение степени научной обоснованности принимаемых в каждом конкретном случае технических решений.

Расчетные схемы, предполагающие использование инженерных методов расчета точности результирующих геометрических характеристик при горячей прокатке лент в предварительно напряженных рабочих клетях, представлены на рис. 2 и 3, при этом в качестве основных факторов влияния рассматривали исходную разнотолщинность δh_0 , а также размах стохастического изменения величины предварительного межвалкового зазора δS_0 , определяемого радиальными биениями рабочих валков. С учетом аналитических форм записи поставленных в этом случае задач и их последующих решений, основанных на использовании общей концепции метода предельных оценок [7, 8], величина результирующей продольной разнотолщинности δh_1 горячекатаных лент, полученных при создании предварительного напряжения по подушкам рабочих валков (рис. 1, а; 2 и 3), в окончательном виде может быть определена как:

$$\delta h_1 = \frac{\delta h_0 G_{пл} (G_{vy} G_{ст} + G_{пн} G_{кл}) + \delta S_0 G_{кл} G_{vy} (G_{ст} + G_{пн})}{(G_{пл} + G_{кл}) G_{vy} G_{ст} + (G_{пл} + G_{vy}) G_{пн} G_{кл}}, \quad (1)$$

где $G_{пл}$ – модуль жесткости прокатываемых лент при их пластическом формоизменении, определяемый как отношение приращения силы прокатки к величине приращения абсолютного обжатия [8];

G_{vy} – модуль жесткости валкового узла, характеризуемый величиной упругих деформаций по отношению к осям нажимных механизмов;

$G_{ст}$ – обобщенное значение модуля жесткости подушек рабочих валков, нажимного механизма и узла станин;

$G_{пн}$ – модуль жесткости механизма предварительного напряжения рабочей клетки по подушкам рабочих валков (см. рис. 1, а; 2, 3).

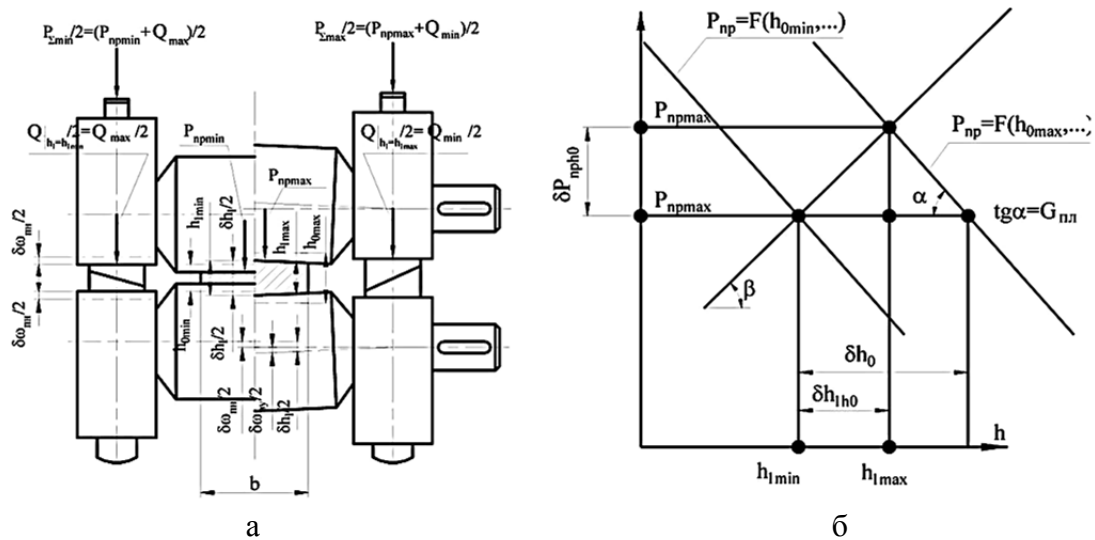


Рис. 2. Расчетные схемы по определению наследственной составляющей δh_{1h_0} продольной разнотолщинности горячекатаных лент и полос, полученных при прокатке в предварительно напряженных по подушкам рабочих валков чистовых рабочих клетях (см. рис. 1, а)

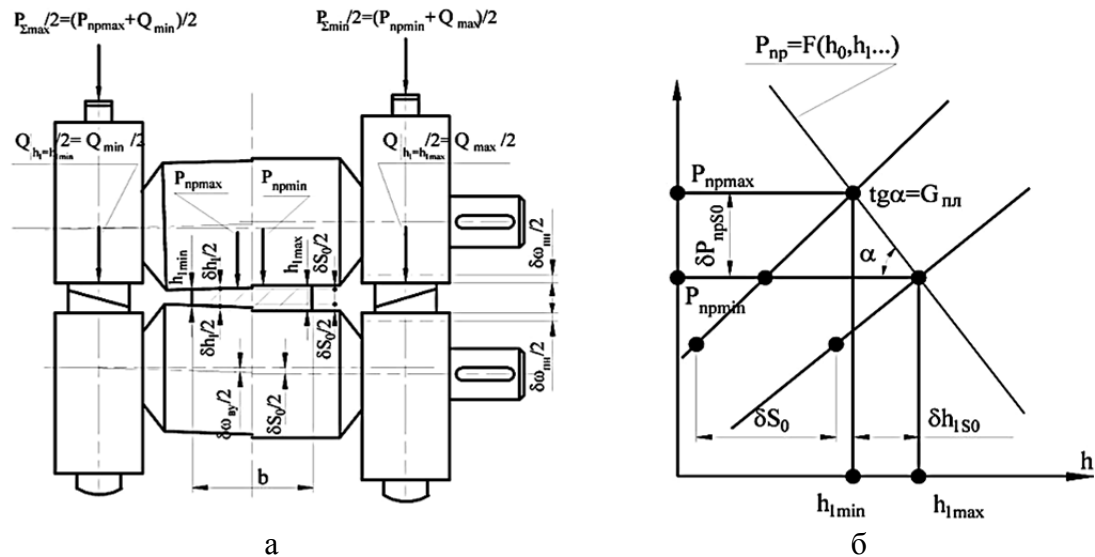


Рис. 3. Расчетные схемы по определению вносимой составляющей δh_{1s_0} продольной разнотолщинности горячекатаных лент и полос, полученных при прокатке в предварительно напряженных по подушкам рабочих валков чистовых рабочих клетях (см. рис. 1, а)

В случае создания предварительного напряжения чистой рабочей клетки по буртам калиброванных рабочих валков (см. рис. 1, б) аналогичный показатель результирующей разнотолщинности соответствует:

$$\delta h_1 = \frac{\delta h_0 G_{пл} (G_{вуб} G_{стб} + G_{пн} G_{кл}) + \delta s_0 G_{кл} G_{вуб} (G_{стб} + G_{пн})}{(G_{пл} + G_{кл}) G_{вуб} G_{стб} + (G_{пл} + G_{вуб}) G_{пн} G_{кл}}, \quad (2)$$

где $G_{стб}$ – обобщенное значение модуля жесткости узла станин, учитывающее дополнительно упругую деформацию на участке от буртов рабочих валков до оси их подшипниковых опор;

$G_{вуб}$ – модуль жесткости валкового узла, определяемый через разность упругих перемещений по середине бочки и буртов механизма предварительного напряжения.

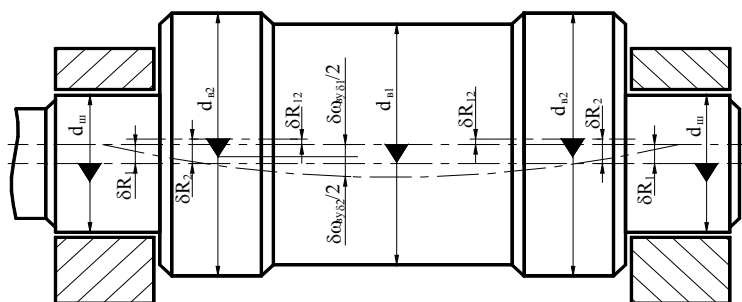


Рис. 4. Расчетная схема предварительно напряженного по буртам рабочего вала чистовой рабочей клетки штрипового или сортового стана горячей прокатки

В качестве примера результатов численной реализации полученных теоретических решений на рис. 5 представлены расчетные распределения отдельных составляющих δh_{1h0} , δh_{1S0} определяемых влиянием, соответственно, исходной толщины δh_0 и величины предварительного межвалкового зазора δS_0 , а также результирующей разнотолщинности δh_1 горячекатаных лент, имеющих место при прокатке в предварительно напряженных по различным схемам чистовых рабочих клетях (см. рис. 1). Из анализа представленных результатов следует, что с увеличением модуля жесткости прокатываемых лент при их пластическом формоизменении $G_{пл}$ наследственная составляющая δh_{1h0} возрастает, а вносимая δh_{1S0} – снижается. Аналогичный эффект в обоих рассматриваемых случаях имеет место при уменьшении модуля жесткости $G_{кл}$ чистовых рабочих клетей.

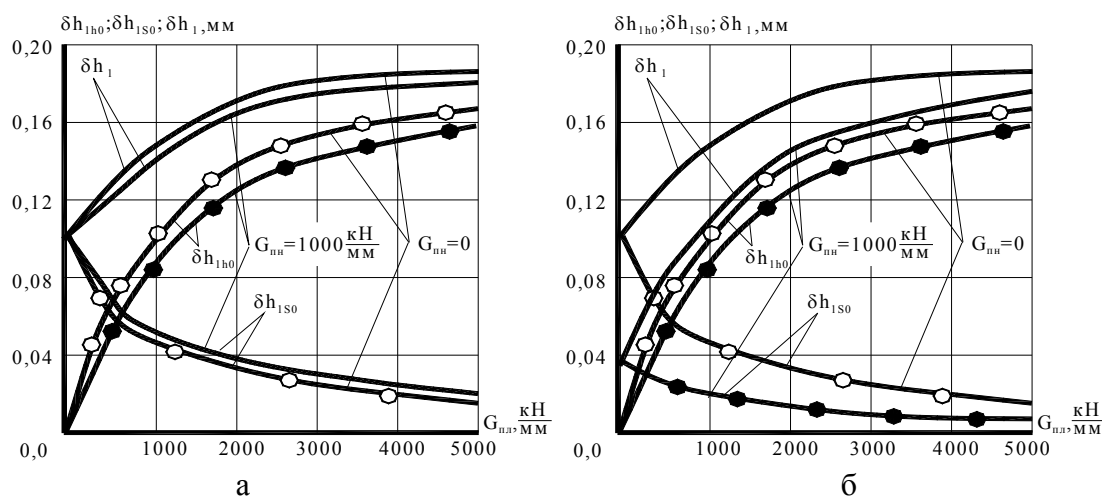


Рис. 5. Расчетные распределения составляющих δh_{1h0} , δh_{1S0} и результирующей разнотолщинности δh_1 горячекатаных лент, полученных при прокатке в чистовых рабочих клетях, являющихся предварительно напряженными (а) – по подушкам (см. рис. 1, а) и (б) – по буртам (см. рис. 1, б) рабочих валков

Использование предварительного напряжения рабочих валков по их подушкам (см. рис. 1, а) приводит к снижению наследственной δh_{1h0} и увеличению вносимой δh_{1S0} составляющих (см. рис. 5, а), при этом интенсивность указанных изменений с увеличением модуля жесткости механизма предварительного напряжения $G_{пл}$ возрастает. Создание же предварительного напряжения по буртам рабочих валков (см. рис. 1, б) обуславливает снижение и наследственной δh_{1h0} , и вносимой δh_{1S0} составляющих, а это, в свою очередь, приводит и к довольно существенному уменьшению результирующей разнотолщинности δh_1 готового металлопроката (см. рис. 5, б).

С точки зрения практического применения рассмотренных выше решений представляет интерес конструктивная схема предварительно напряженной чистой рабочей клетки, представленная на рис. 6 и 7, согласно которой данная клетка включает в себя рабочие валки 1, подушки которых 2 размещены в окнах станин открытого типа 3, а также механизм предварительного напряжения рабочих валков по подушкам 4 и нажимной механизм гидравлического типа 5. Привод данной рабочей клетки выполнен индивидуальным, что позволит использовать процесс асимметричной прокатки, обеспечивающий повышение качества готовой металлопродукции.

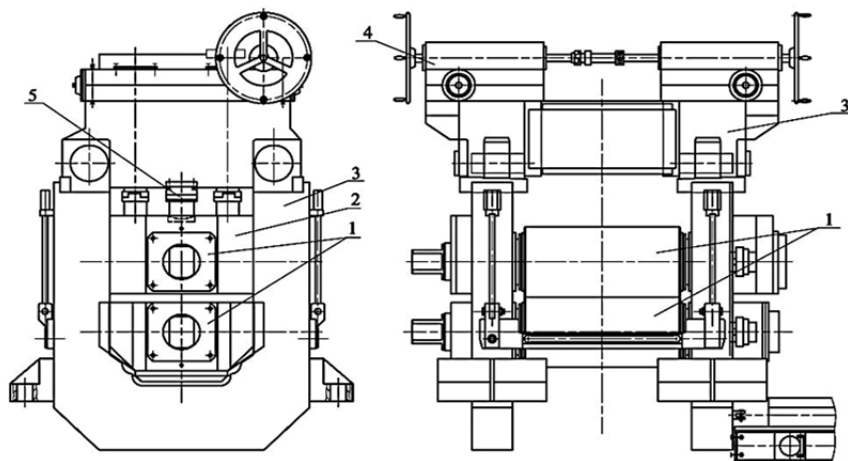


Рис. 6. Состав и конструктивные особенности механического оборудования предварительно напряженных чистовых рабочих клеток станов для горячей прокатки полос и лент

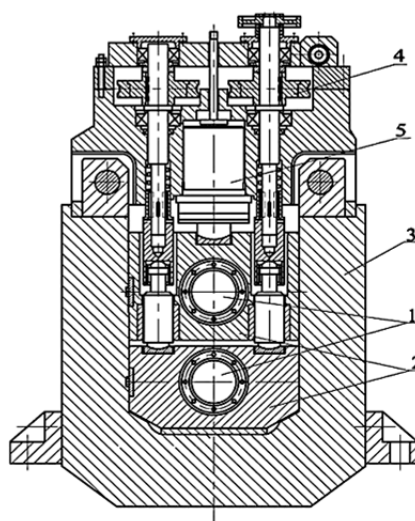


Рис. 7. Конструктивная схема предварительно напряженных чистовых рабочих клеток станов для горячей прокатки полос и лент

Механизм уравнивания рабочих валков с ручным приводом, он же механизм предварительного напряжения 4 (см. рис. 6, 7) рабочей клетки состоит из червячной передачи, передающей крутящий момент на вал посредством шпонки. С другого конца вала на шпонку посажена кулачковая полумуфта, которая входит в зацепление с втулкой, имеющей зубчатое зацепление с проставкой. При вращении всей этой конструкции проставка тоже начинает вращаться, вкручиваясь в гайку и поднимая при этом верхний валковый узел. Непосредственно же настройка межвалкового зазора на требуемую величину осуществляется при помощи гидравлического нажимного механизма 5 (см. рис. 6, 7), обеспечивающего одновременно и создание предварительного напряжения за счет разности зазоров при соответствующей настройке механического механизма 4. Как показали результаты расчетов, выполненные

в соответствии с разработанной методикой, использование данного технического решения позволит повысить модуль жесткости рабочей клетки на $30 \div 50 \%$, а это, в свою очередь, будет способствовать снижению продольной разнотолщинности готового металлопроката на $15 \div 25 \%$.

Следует отметить, что использование рассмотренной (см. рис. 6, 7) конструкции предварительно напряженных чистовых рабочих клеток является возможным только при создании нового или коренной реконструкции оборудования станов для горячей прокатки лент и полос. По отношению же к действующему оборудованию чистовых рабочих клеток, оснащенных либо механическими нажимными механизмами с ручным приводом, либо маломощными электромеханическими нажимными механизмами, создание предварительного напряжения требуемой величины является невозможным.

В данном случае перспективной представляется конструкция чистовой рабочей клетки (рис. 8), включающая в себя рабочие валки 1, шейки которых посредством подшипниковых опор 2 размещены в подушках 3, фиксируемых в вертикальном положении нажимными винтами 4, которые, в свою очередь, сопряжены с гайками 5, размещенными неподвижно в верхних поперечинах узла станин 6. Кроме того, рассматриваемая конструкция содержит клиновую пару 7, регулируемую по высоте $h_{пр}$ при помощи, например, винтовой передачи 8. Непосредственно сила предварительного напряжения требуемой величины Q_n создается в этом случае гидровставкой 9, корпус которой размещен на подушке 3 верхнего рабочего валка 1, а плунжера 10 данной гидровставки сопряжены с опорными поверхностями верхней поперечины узла станин 6.

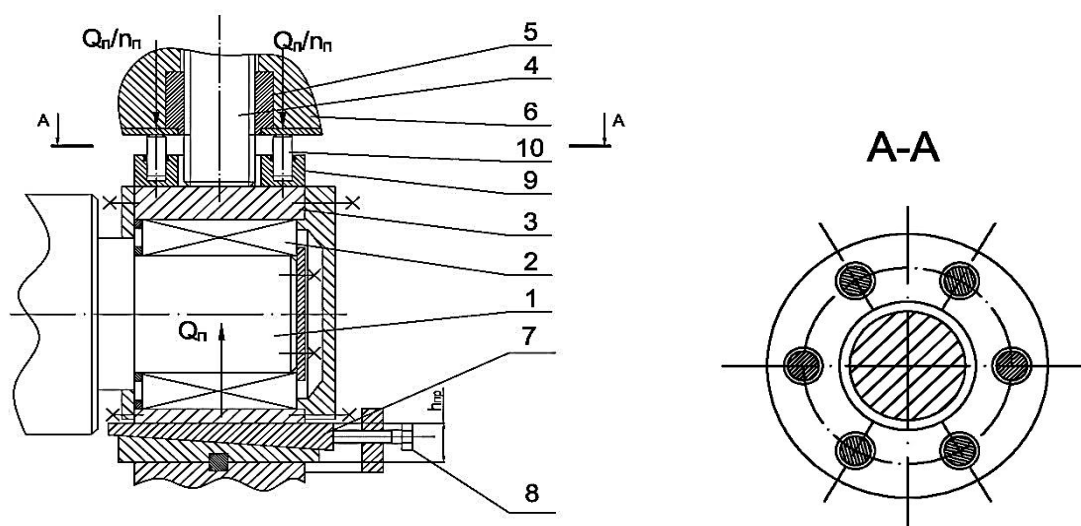


Рис. 8. Предлагаемая конструкция комбинированного гидромеханического нажимного механизма чистовых рабочих клеток станов для горячей прокатки полосовых и ленточных заготовок

С учетом данного технического решения (см. рис. 8) технология создания предварительного напряжения в чистовой рабочей клетке заключается в следующем:

- перед прокаткой нового типоразмера полос или лент клиновое соединение 7 при помощи болтового соединения 8 настраивается на требуемую толщину $h_{пр}$;
- после этого подают давление рабочей жидкости в плунжерные полости гидровставки 9, создавая тем самым при помощи плунжеров 10 количество n_n требуемую упругую деформацию клиновой пары 7 и, как следствие, требуемую величину предварительного напряжения Q_n ;
- по мере требуемого позиционирования подушек верхнего рабочего валка при помощи гидровставок 9 их фиксируют винтами механического нажимного механизма, после чего давление рабочей жидкости из рабочих полостей плунжеров 10 убирают и осуществляют непосредственно процесс горячей прокатки полосовых и ленточных заготовок.

ВЫВОДЫ

Следует указать на возможность более широкого использования рассмотренной конструкции комбинированного гидромеханического нажимного механизма. В частности, если непосредственно в процессе горячей прокатки гидравлическая часть данного механизма в виде корпуса с плунжерами будет развивать суммарную силу, составляющую 80÷90 % от силы прокатки, то сила, действующая на нажимные винты, будет соответствовать всего лишь 10÷20 %. Отмеченное позволит даже маломощным электромеханическим нажимным механизмам чистовых рабочих клетей работать в системе автоматического регулирования толщины, отработывая, в частности, низкочастотные составляющие стохастического изменения исходной толщины и температуры прокатываемых полос и лент.

Создание предварительного напряжения по подушкам валков становится возможным за счет использования гидроприводов, клиновых пар, передач винт-гайка и других деталей. Основным преимуществом такой конструкции является отсутствие дополнительных нагрузок непосредственно на рабочие валки и их подшипниковые опоры.

С целью замены действующих на мелкосортных станах Украины маломощных (или даже с ручным управлением) электромеханических нажимных устройств предложена конструкция комбинированного гидромеханического нажимного механизма рабочих клетей.

На базе этих технических решений возможно расширение сортамента мелкосортных станов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василев Я. Д. *Теорія поздовжньої прокатки: підручник / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.*
2. Полухин П. И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гунн, А. М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.*
3. Ефимов В. Н. *Сопротивление деформации в процессах прокатки / В. Н. Ефимов, М. Я. Бровман. – М.: Металлургия, 1996. – 253 с.*
4. Андreyuk Л. В. *Аналитические зависимости сопротивления деформации металла от температуры и степени деформации / Л. В. Андreyuk, Г. Г. Тюленев // Сталь. – 1972. – № 9. – С. 545–547.*
5. Мершин И. М. *Точность прокатки в предварительно напряженных клетях / И. М. Мершин. – Ижевск: Удмуртия, 1970. – 120 с.*
6. *Исследование точности прокатки в объемно-напряженных клетях стана 250 / А. М. Литвак, В. П. Полушкин, В. М. Беленко [и др.] // Сортопрокатное производство: сб. научн. тр. – Харьков: УкрНИИМет, 1975. – Вып. 3. – С. 136–141.*
7. Полухин В. П. *Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов / В. П. Полухин. – М.: Металлургия, 1972. – 512 с.*
8. Федоринов В. А. *Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос: монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск: ДГМА, 2010. – 243 с.*

Сатонин А. В. – д-р техн. наук, проф. кафедры АММ ДГМА;

Бережной Н. Н. – д-р техн. наук проф. КНУ;

Коренко М. Г. – ассистент КНУ;

Староста Н. В. – ассистент КНУ.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

КНУ – Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог.

E-mail: starosta-n@mail.ru; marinak2010@bk.ru

Статья поступила в редакцию 15.10.2012 г.