

УДК 621.771.23

Сатонин А. В.
Присяжный А. Г.
Коренко М. Г.
Настоящая С. С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИЛЫ ПРОТИВОИЗГИБА РАБОЧИХ ВАЛКОВ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ТОНКИХ ПОЛОС

Расширение сортамента и ужесточение требований к показателям качества холоднокатаных полос обуславливают необходимость использования в процессе холодной прокатки на непрерывных и реверсивных станах систем автоматического регулирования профиля и формы (САРПФ) получаемого металлопроката [1, 2]. При этом, повышение эффективности указанных систем возможно за счет уточнения обеспечивающих их работу математических моделей, что позволит увеличить надежность прогнозирования таких показателей качества холоднокатаных тонких полос, как, например, поперечная разнотолщинность, а также степень плоскостности.

Для регулирования степени плоскостности тонколистовой стали при холодной прокатке на непрерывных и реверсивных станах наиболее широкое распространение в настоящее время получили системы, в которых применяется противоизгиб рабочих валков [1, 2]. Для обеспечения надлежащей работы этих систем целесообразна постановка и решение задачи по определению оптимальных значений силы противоизгиба, обеспечивающих постоянство или минимальное значение разностей суммарных упругих перемещений узла рабочих и опорных валков независимо от изменения силы прокатки, возникающего вследствие направленного или стохастического изменения исходных технологических параметров процесса холодной прокатки. Анализ представленных в работах [3–5] методов расчета упругих деформаций валковых узлов клетей «кварто» показал, что эти методы не в полной мере соответствуют реальным условиям холодной прокатки тонких полос. В частности, математическая модель А. И. Целикова [3, 4] предназначена для определения упругих деформаций прогиба только опорных валков рабочих клетей станов холодной тонколистовой прокатки и получена при условии равномерного распределения межвалковой погонной нагрузки, а также не учитывает влияние профилировки и сил противоизгиба рабочих валков. Инженерный метод В. П. Полухина [4, 5] лишен отмеченных недостатков, но в связи с характерными для последних лет изменениями технологии и оборудования станов холодной тонколистовой прокатки, а также широким применением САРПФ [1, 2] указанный метод требует дополнительного уточнения. Авторами работ [6, 7] предложен уточненный метод расчета упругих деформаций валковых узлов клетей «кварто», учитывающий неравномерность распределения межвалковой погонной нагрузки, а также профиль валков и позволяющий повысить точность определения оптимальных значений силы противоизгиба рабочих валков.

Целью работы является разработка и апробация метода расчета оптимальных значений силы противоизгиба рабочих валков, обеспечивающих повышение степени плоскостности холоднокатаных полос с учетом влияния неравномерности распределения межвалковой погонной нагрузки и профилировки валков.

Определение оптимальных значений силы противоизгиба рабочих валков осуществляли численно на основе метода целенаправленного перебора вариантов по следующей алгоритмической схеме:

$$Q_{np(t+1)} = Q_{npt} + A_{Q_{np}} \operatorname{sign} \{ \Delta \delta_t - \Delta \delta^* \}, \quad (1)$$

где t – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;
 $A_{Q_{np}}$ – шаг приращения силы противоизгиба, принятый равным $A_{Q_{np}} = 0,01P_H$;

$\text{sign}\{\Delta\delta_t - \Delta\delta^*\}$ – функция знака, соответствующая:

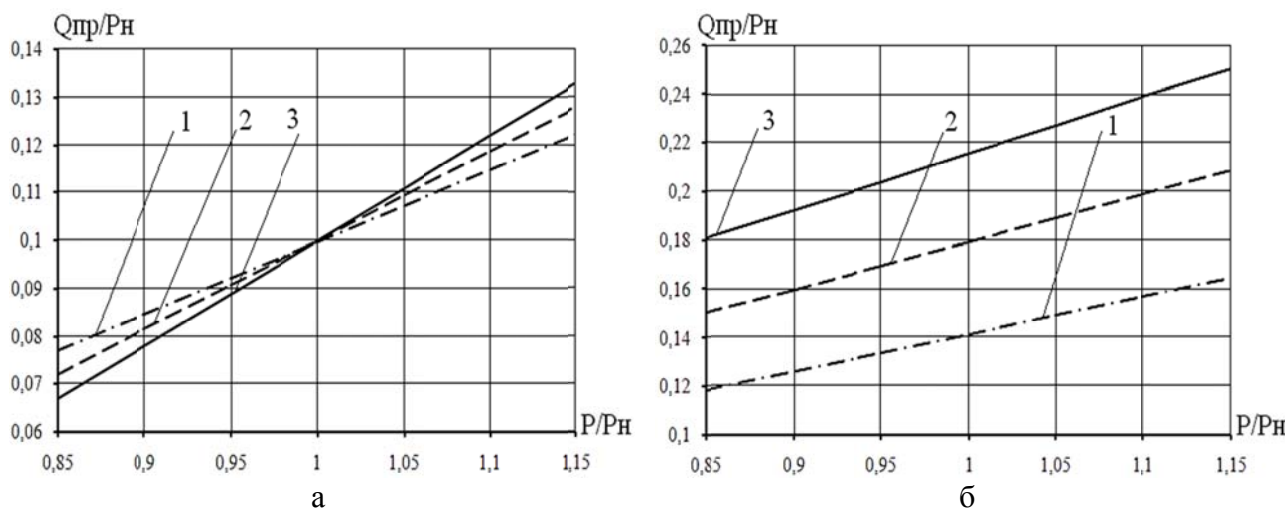
$$\text{sign}\{\Delta\delta_t - \Delta\delta^*\} = \begin{cases} 1 \text{ при } \Delta\delta_t > \Delta\delta^*; \\ -1 \text{ при } \Delta\delta_t < \Delta\delta^*, \end{cases}$$

$\Delta\delta_t$ – расчетные значения разностей суммарных упругих перемещений по середине и по краям бочек рабочих и опорных валков, определяемые в рамках t -го цикла итерационной процедуры решения в зависимости от соответствующих значений силы прокатки P и силы противоизгиба Q_{npt} ;

$\Delta\delta^*$ – максимально допустимые или номинальные значения разностей суммарных упругих перемещений, определяемые при номинальных значениях силы прокатки P_n и силы противоизгиба $Q_{nрн}$, принятой равной $Q_{nрн} = 0,1P_n$.

Расчет значений разностей суммарных упругих перемещений узла рабочих и опорных валков производили согласно рекомендациям авторов работ [6, 7] с учетом неравномерности распределения межвалковой погонной нагрузки и профилировки рабочих валков. Расчетное определение значений силы прокатки осуществляли в соответствии с усовершенствованной численной одномерной математической моделью [8], учитывающей реальный характер распределений по длине очага деформации механических свойств металла, а также геометрических параметров и коэффициента внешнего контактного трения. При этом, в первом цикле итерационной процедуры решения ($t=1$) исходное значение силы противоизгиба $Q_{npt}|_{t=1}$ принимали равным его номинальному значению, то есть $Q_{npt}|_{t=1} = Q_{nрн}$. Потом производили расчет значения $\Delta\delta_t$ разности суммарных упругих перемещений узла рабочих и опорных валков и сравнивали его с заданным значением величины $\Delta\delta^*$, после чего согласно выражению (1) осуществляли приращение силы противоизгиба $Q_{np(t+1)}$ и переходили к последующему ($t+1$) циклу итерационной процедуры решения. Выход из данной процедуры производили в случае изменения знака первоначального значения разности $\Delta\delta_t - \Delta\delta^*$. Полученные значения силы противоизгиба не должны превышать значений, допустимых условиями прочности шеек, а также подшипниковых узлов рабочих валков.

В качестве примера численной реализации алгоритмической схемы (1) на рис. 1, а представлены полученные применительно к одной из рабочих клеток непрерывного четырехклетевого стана 1700 цеха холодной прокатки ПАО «ММК им. Ильича» расчетные распределения приведенных значений Q_{np}/P_n силы противоизгиба, обеспечивающих постоянство разности суммарных упругих перемещений по середине и по краям бочек рабочих и опорных валков независимо от изменения силы прокатки. При этом, диапазон изменения данной силы был принят равным $P = 0,85 P_n - 1,15 P_n$ ($P/P_n = 0,85 - 1,15$), а номинальные значения $\Delta\delta^*$ разности суммарных упругих перемещений $\Delta\delta_t$ определяли согласно рекомендациям авторов работ [6, 7] дифференцированно в зависимости от ширины прокатываемой полосы B при номинальных значениях силы прокатки P_n и силы противоизгиба $Q_{nрн} = 0,1P_n$. Аналогичные расчетные распределения (см. рис. 1, б) получили также исходя из условия минимизации разности суммарных упругих перемещений по середине и по краям бочек рабочих и опорных валков, что обеспечивает получение холоднокатаных полос с минимальной поперечной разнотолщиной.



1 – $P_n=16,2$ МН, $B=1350$ мм; 2 – $P_n=15$ МН, $B=1250$ мм; 3 – $P_n=13,8$ МН, $B=1150$ мм

Рис. 1. Расчетные распределения приведенных значений силы противоизгиба независимо от изменения силы прокатки:

а – обеспечивающей постоянство разности суммарных упругих перемещений по середине и по краям бочек рабочих и опорных валков; б – минимальную поперечную разнотолщинность холоднокатаных полос

Анализ полученных результатов показал, что требуемые значения силы противоизгиба рабочих валков существенно зависят от ширины прокатываемых полос и с увеличением силы прокатки возрастают практически линейно (см. рис. 1), что позволяет указанные расчетные распределения аппроксимировать линейными функциями вида:

$$Q_{пр} = Q_{прн} + k_{QP}(P - P_n), \quad (2)$$

где k_{QP} – передаточный коэффициент, характеризующий функциональную связь между приращениями силы противоизгиба $Q_{пр}$ и силы прокатки P и определенный исходя из условий обеспечения постоянства разности суммарных упругих перемещений по середине и по краям бочек рабочих и опорных валков или исходя из условий обеспечения минимальной поперечной разнотолщинности холоднокатаных полос.

Преимущество линейных функций (2) заключается в возможности их дальнейшего использования для определения в режиме реального времени значений силы противоизгиба рабочих валков, соответствующих минимальной поперечной разнотолщинности полос, а также требуемому для достижения минимальной продольной разнотолщинности металлопроката изменению межвалкового зазора непосредственно в процессе прокатки. В частности, применительно к рис. 1, а получили, что $k_{QP}=0,051$ при $B=1350$ мм, $k_{QP}=0,088$ при $B=1250$ мм и $k_{QP}=0,123$ при $B=1150$ мм, а применительно к рис. 1, б – $k_{QP}=0,151$ при $B=1350$ мм, $k_{QP}=0,186$ при $B=1250$ мм и $k_{QP}=0,221$ при $B=1150$ мм.

Следует указать на то, что, кроме САРПФ, современные станы оснащены системами автоматического регулирования толщины полос (САРТ) [1, 2]. Основным исполнительным элементом этих систем является гидравлическое нажимное устройство, обеспечивающее точную настройку требуемой величины предварительного межвалкового зазора и его высокочастотное регулирование в процессе прокатки. При этом, в процессе регулирования межвалкового зазора увеличивается размах изменения силы прокатки и, как следствие, увеличивается размах изменения формы активных образующих рабочих валков, что обуславливает увеличение поперечной разнотолщинности и повышение вероятности дефектообразования

по показателям степени плоскостности холоднокатаных полос. Это определяет необходимость в оперативном изменении силы противоизгиба рабочих валков. Таким образом, работу САРТ и САРПФ нельзя рассматривать обособленно друг от друга, то есть рассчитанные согласно алгоритмической схеме (1) значения величины Q_{np} должны быть учтены при проектировании технологического режима работы САРТ данного стана.

ВЫВОДЫ

Разработан метод расчета оптимальных значений силы противоизгиба рабочих валков, обеспечивающих повышение степени плоскостности холоднокатаных полос с учетом влияния неравномерности распределения межвалковой погонной нагрузки, а также профилировки рабочих валков. На основе анализа результатов численной реализации указанного метода установлено существенное влияние ширины прокатываемых полос на оптимальное значение силы противоизгиба, а также предложено связать между приращениями силы противоизгиба и силы прокатки аппроксимировать линейными уравнениями, использование которых способствует повышению эффективности работы САРПФ станов холодной тонколистовой прокатки. Применительно к условиям цеха холодной прокатки ПАО «ММК им. Ильича» определены значения передаточных коэффициентов указанных уравнений в зависимости от ширины прокатываемых полос.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов Ю. В. *Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос* / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 669 с.
2. Гарбер Э. А. *Производство проката : Справочное издание. Том I. Книга 1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование)* / Э. А. Гарбер. – М. : Теплотехник, 2007. – 368 с.
3. Целиков А. И. *Теория продольной прокатки* / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
4. *Машины и агрегаты металлургических заводов : Учебник для вузов. В 3-х томах. Том 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката* / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребенник [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1988. – 600 с.
5. Полухин В. П. *Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов* / В. П. Полухин. – М. : Металлургия, 1972. – 512 с.
6. Присяжный А. Г. *Расчетное определение межвалковой погонной нагрузки в клетях «кварто» станов холодной прокатки с учетом влияния профилировки и противоизгиба рабочих валков* / А. Г. Присяжный // *Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. – № 47 (953). – С. 153–159.
7. Сатонин А. В. *Развитие инженерных методов расчета напряженно-деформированного состояния валкового узла четырехвалковых рабочих клеток широкополосных станов* / А. В. Сатонин, С. С. Настоящая, А. Г. Присяжный // *Обработка материалов давлением : сб. научн. трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 266–272.
8. Сатонин А. В. *Развитие численных одномерных математических моделей напряженно-деформированного состояния металла при холодной прокатке относительно тонких полос* / А. В. Сатонин, А. Г. Присяжный, А. М. Спасская, А. С. Чуруканов // *Обработка материалов давлением : сб. научн. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 2 (31). – С. 62–68.

REFERENCES

1. Konovalov Yu. V. *Spravochnik prokatchika. Spravochnoe izdanie v 2-h knigah. Kniga 2. Proizvodstvo holodnokatanih listov i polos* / Yu. V. Konovalov. – M. : Teplotehnik, 2008. – 669 s.
2. Garber E. A. *Proizvodstvo prokata : Spravochnoe izdanie. Tom I. Kniga 1. Proizvodstvo holodnokatanih polos i listov (sortament, teoriya, tehnologiya, oborudovanie)* / E. A. Garber. – M. : Teplotehnik, 2007. – 368 s.
3. Tselikov A.I. *Teoriya prodolnoy prokatki* / A. I. Tselikov, G. S. Nikitin, S. E. Rokotiyani. – M. : Metallurgiya, 1980. – 320 s.
4. *Mashini i agregati metallurgicheskikh zavodov : Uchebnik dlya vuzov. V 3-h tomah. Tom 3. Mashini i agregati dlya proizvodstva i odelki prokata* / A. I. Tselikov, P. I. Poluhin, V. M. Grebennik [i dr.] – 2-e izd., pererab i dop. – M. : Metallurgiya, 1988. – 600 s.

5. Poluhin V. P. *Matematicheskoe modelirovanie i raschet na EVM listovih prokatnih stanov* / V. P. Poluhin. – M. : Metallurgiya, 1972. – 512 s.
6. Prisyazhnyj A. G. *Raschetnoe opredelenie megvalkovoy pogonnoy nagruzki v kletyah «kvarto» stanov holodnoy prokatki s uchetom vliyaniya profilirovki i protivozgiba rabochih valkov* / A. G. Prisyazhnyj. // *Vestnik NTU «HPI». Seriya: Novie resheniya v sovremennih tehnologiyah.* – Harkov : NTU «HPI». – 2012. – № 4 (33). – S. 266–272.
7. Satonin A. V. *Razvitie inzhenernih metodov rascheta napryagenno-deformirovannogo sostoyaniya valkovogo uzla chetirehvalkovih rabochih kletey shirokopolosnih stanov* / A. V. Satonin, S. S. Nastoyaschaya, A. G. Prisyazhny // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauchn. tr.* – Kramatorsk : DGMA, 2012. – № 4 (33). – С. 266–272.
8. Satonin A. V. *Razvitie chislennih odnomernih matematicheskikh modeley napryagenno-deformirovannogo sostoyaniya metalla pri holodnoy prokatke odnositelno tonkih polos* / A. V. Satonin, A. G. Prisyazhny, A. M. Spaskaya, A. S. Churukanov // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauchn. tr.* – Kramatorsk : DGMA, 2012. – № 2 (31). – С. 62–68.

Сатонин А. В.	– д-р техн. наук, проф. ДГМА
Присяжный А. Г.	– ст. преп. ГВУЗ «ПГТУ»
Коренко М. Г.	– канд. техн. наук, доц. ГВУЗ «КНУ»
Настоящая С. С.	– канд. техн. наук, ассистент ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ГВУЗ «ПГТУ» – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

ГВУЗ «КНУ» – Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог.

E-mail: andrejprisyazhnyj@yandex.ru