

УДК 621.771

Кривцова О. Н.  
Ибатов М. К.  
Самодурова М.  
Лежнев С. Н.  
Панин Е. А.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Моделирование напряженно-деформированного состояния валков с использованием активного и пассивного экспериментов необходимо для определения напряжений, деформаций и перемещений валков чистовых клетей НШПС-1700, используемых для построения формы активной образующей профилированных рабочих валков, и необходимо для улучшения профиля и плоскостности полосы на станах горячей прокатки. Основной деформацией валков четырехвалковых систем являются прогиб и упругое сжатие опорных и рабочих валков. Ключевое влияние на качество проката оказывает величина стрелы прогиба рабочего валка [1–3].

Целью работы является моделирование напряженно-деформированного состояния прокатных валков чистовых клетей НШПС-1700 с постановкой следующих частных задач: определение значений стрелы прогиба для рабочих валков различных исполнений; построение математических моделей, описывающих прогиб валка при влиянии на него различных факторов; проведение анализа напряженно-деформированного состояния в программе Deform-3D путем выполнения активного и пассивного экспериментов.

Объектом исследований являются прокатные валки чистовых клетей НШПС-1700 АО «АрселорМиттал Темиртау». Для расчета использовались механические свойства валков различных исполнений: ЛПХНд-63, ЛПХНд-74, NiCr, ICDP, AS1180xx, HVS80. Для валков указанных марок были собраны и статистически обработаны данные их механических свойств, представленные в табл. 1 [4, 5].

Таблица 1

Механические свойства рабочих валков НШПС-1700

Исполнение	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$E_{pn}$ , МПа	$Hsh$ , ед. Шора
ЛПХНд-63	500/360	370/320	$1,23 \cdot 10^5$	63-70
ЛПХНд-74	470/350	350/300	$1,34 \cdot 10^5$	73-85
NiCr	2400/1800	1600/1000	$1,54 \cdot 10^5$	68-78/60
ICDP	2300/1800	1200/1000	$1,48 \cdot 10^5$	78-83/60
AS1180xx	2500/2000	1600/1200	$1,88 \cdot 10^5$	60-85/60-70
HVS80	2600/2100	1800/1300	$2,02 \cdot 10^5$	75-95/60-70

Примечание: числитель – данные для поверхности валка; знаменатель – данные для сердцевины валка;  $\sigma_s$  – временное сопротивление разрыву, МПа;  $\sigma_m$  – предел текучести, МПа;  $E_{pn}$  – приведённый модуль упругости, МПа;  $Hsh$  – твердость по Шору.

Для определения влияния усилий прокатки, противоизгиба и других факторов на стрелу прогиба валка и построения на основе этих данных математических моделей, описывающих прогиб валка, были собраны и также статистически обработаны данные технологических параметров прокатки. Технологические параметры определяли по протоколам прокатки Электронно-вычислительного центра (ЭВЦ) НШПС-1700. Протоколы ЭВЦ НШПС-1700 позволили сформировать выборку следующих параметров прокатки: температуру, ширину и толщину полосы за клетью № 12; усилия прокатки и усилия противоизгиба в клетях № 10–12; марки сталей прокатанных полос; количество тонких (до 4 мм) и узких (до 1100 мм) полос. Учитывались технологические параметры прокатки следующих марок сталей: Ст. 3пс, Ст. 3сп [6].

На основе статистической обработки собранных данных, для валков клетей № 10–12 (как клетей, формирующих геометрическое качество готовой полосы) и при условиях прокатки наиболее проблемного сортамента  $2 \times 1250$  мм, построено уравнение множественной линейной регрессии, описывающее влияние следующих факторов на прогиб валка:  $X_1$  – усилие противоизгиба  $Q$ , тс;  $X_2$  – усилие прокатки  $P$ , тс;  $X_3$  – ширина прокатываемой полосы  $b$ , мм;  $X_4$  – количество прокатанного металла  $m$ , т;  $X_5$  – диаметр рабочих валков  $D$ , мм;  $X_6$  – толщина прокатываемой полосы  $h$ , мм;  $X_7$  – профилировка рабочих валков  $W$ , мм.

После необходимых проверок были отброшены незначимые факторы, и уравнение приняло окончательный вид  $V = 0,119 - 0,059Q + 1,026P - 0,07B$ .

Таким образом, перечисленные факторы принимаются как основные для дальнейшего моделирования, проведения пассивного и активного экспериментов.

Для всех указанных выше валков различного исполнения, на основе собранных статистических данных по прокатываемой полосе стали марки Ст. 3сп, в приложении MS Excel, по методике В. П. Полухина были просчитаны величины стрел прогиба [1]. На основе расчетов выявлено, что рабочий валок сильнее изгибается при прокатке узких полос, следовательно, именно для этих условий и характерен в большей степени дефект полосы «неплоскостность». Эта тенденция прослеживается для валков всех исполнений, причем валки исполнения AS1180xx, используемые в первых чистовых клетях, и валки исполнения HVS80, используемые в последних чистовых клетях, имеют наименьшую стрелу прогиба при одинаковых условиях прокатки с приложением усилий противоизгиба и без них.

Моделирование напряженно-деформированного состояния системы валков НШПС-1700 выполнялось методом конечных элементов с применением программного комплекса Kompas-3D, а затем импортированных в Deform-3D. На их основе проведен пассивный эксперимент [7].

Для моделей были заданы механические свойства рабочих валков, используемых в клетях № 9–12, и опорных валков из стали марки 9ХФ (табл. 1). Полученные в ходе расчета данные представлены в виде рисунков системы валков с картинками распределения напряжений и деформаций (рис. 1).

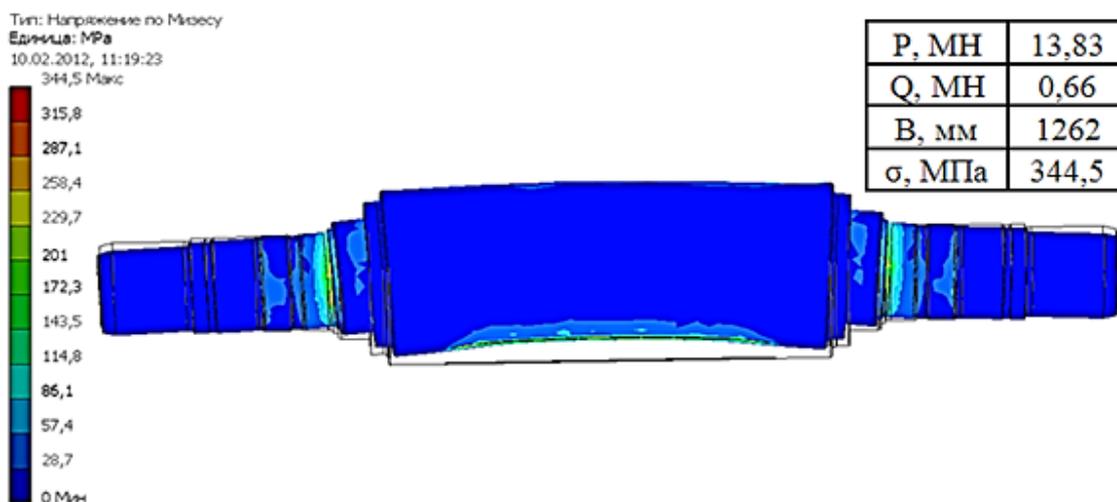


Рис. 1. Напряжения рабочего валка в клетей № 12 при прокатке полосы шириной 1262 мм

Максимальные значения эквивалентных напряжений, как видно из рис. 3, наблюдаются в середине рабочего валка 344,5 МПа и на шейках рабочих валков МПа [2, 3, 8].

По результатам моделирования также определены величины стрел прогибов валков, построены сравнительные графики. Получены уравнения, описывающие зависимость стрелы прогиба валка от ширины прокатываемой полосы (табл. 2) [9].

Результаты моделирования отличаются от расчетных данных в пределах 8–12 %. Это объясняется тем, что в процессе моделирования не учитывались такие факторы, как натяжение полосы, тепловое расширение валка и его профилировка.

Таблица 2

Зависимости стрел прогиба валка от ширины прокатываемой полосы

Уравнение	$R^2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$
$Y_p = -0,0004x^2 + 0,9931x - 627,95$	0,8627	16,095	9,2434
$Y_i = -0,0005x^2 + 1,2788x - 808,48$	0,878	21,549	9,2434

Для изучения многофакторных систем более эффективным является применение математических методов планирования эксперимента [10]. Для проведения эксперимента использовались три серии опытов (для 10, 11 и 12 клетки) с числом опытов в каждой серии  $N = 2^3$  при следующих факторах: усилие прокатки, усилие противоизгиба, ширина полосы.

В процессе моделирования была приложена следующая нагрузка: на бочку валка – усилие прокатки, на шейки валка – усилия противоизгиба, также регулировалась ширина прокатываемой полосы. Для каждого из факторов были выбраны максимальные и минимальные данные, значения которых взяты из технологических инструкций, паспортов приборов, используемых для замера необходимых параметров.

На рис. 2 при прокатке в условиях с максимальными значениями, варьируемых на двух уровнях факторов полосы шириной 1524 мм, с усилием прокатки 15 МН и усилием противоизгиба 1,5 МН максимальная величина стрелы прогиба рабочего валка 12 клетки составила 0,01 мм.

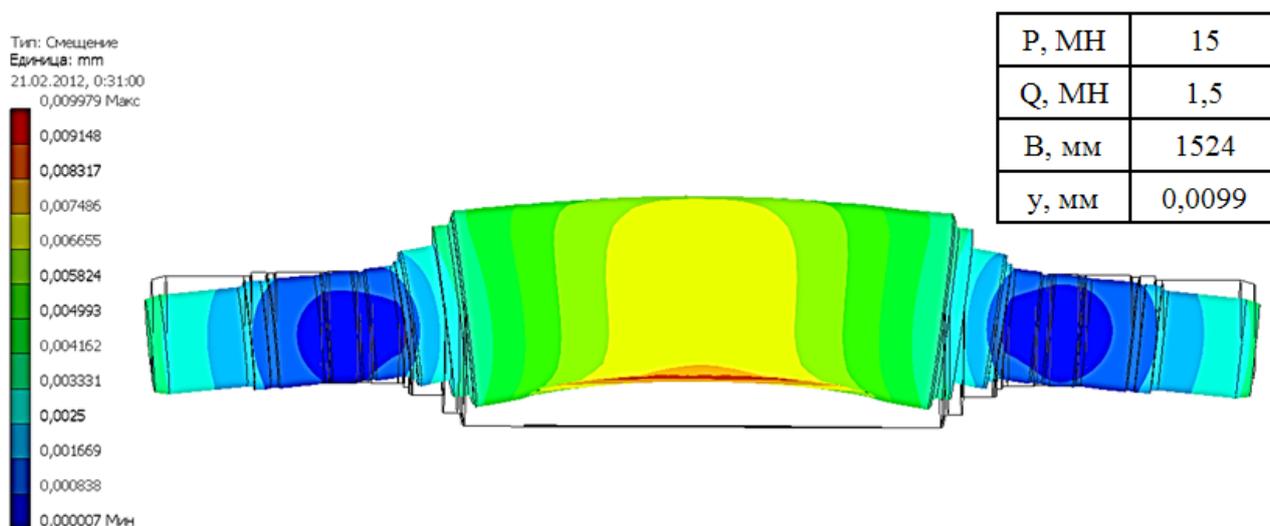


Рис. 2. Стрела прогиба рабочего валка клетки № 12 при прокатке полосы шириной 1524 мм

Для каждой клетки получены уравнения регрессии, описывающие влияние усилий прокатки и противоизгиба, а также ширины прокатываемой полосы на прогиб рабочего валка (табл. 3).

Таблица 3

Зависимости стрелы прогиба валка от усилий прокатки и противоизгиба, ширины прокатываемой полосы

№ клетки	Уравнение	$R^2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$
10	$Y = 0,015 - 0,0003 \cdot X_1 - 0,012 \cdot X_2 - 0,0002 \cdot X_3$	0,82	1,4	3,05
11	$Y = 0,047 - 0,001 \cdot X_1 - 0,007 \cdot X_2$	0,86	1,92	3,05
12	$Y = 0,056 - 0,001 \cdot X_1 - 0,009 \cdot X_2$	0,88	2,48	3,05

Полученные уравнения регрессии, описывающие влияние усилий прокатки и противоизгиба, а также ширины прокатываемой полосы на прогиб рабочего валка проверены на значимость и адекватность, что говорит о возможности использования их на производстве в технологическом процессе ЛПЦ-1 АО «АрселорМиттал Темиртау» [11].

## ВЫВОДЫ

Определен объект исследования – прокатные валки НШПС-1700. Получены уравнения регрессии, связывающие стрелу прогиба рабочего валка с шириной прокатываемой полосы наиболее проблемного сортамента  $2 \times 1250$  мм с усилиями прокатки и противоизгиба в 10, 11, 12 клетях.

Выбрана методика расчета деформации валков, рассчитаны стрелы прогиба для рабочих валков различных исполнений. Выявлено, что при увеличении ширины прокатываемой полосы стрела прогиба уменьшается. При приложении усилия противоизгиба на шейки валков стрела прогиба снижается на 35–56%. При эксплуатации стальных валков исполнений AS1180xx и HVS80 стрела прогиба минимальна, что позволяет получать прокат более высокого качества. Проведено конечно-элементное моделирование процесса горячей прокатки в программном комплексе Deform-3D. На основе моделирования выполнены активный и пассивный эксперименты, получены результаты близкие к теоретическим. Получены уравнения регрессии, описывающие влияние усилий прокатки и противоизгиба, а также ширины прокатываемой полосы на прогиб рабочего валка для всего сортамента прокатываемой продукции.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полухин В. П. *Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов* / В. П. Полухин. – М. : Металлургия, 1972. – 512 с.
2. *Показатели деформации рабочих валков. 2013 International Conference of Applied Mechanics and Materials* / Кривцова О. Н., Вивенцев А. С., Талмазан В. А., Панин Е. А., Арбуз А. С. – Hong-Hong, 17–18 august 2013.
3. Кривцова О. Н. *Деформационные показатели валков различного исполнения* / О. Н. Кривцова, В. А. Талмазан, М. Самодурова // *Матер. Междунар. конф., посвященной 50-летию КГИУ, Темиртау, 11–12 октября 2013.* – С. 335–341.
4. Синнаве М. *Новые марки прокатных валков и тенденции их производства* / М. Синнаве // *Сталь.* – 2003. – № 7. – С. 48–52.
5. Сарычев И. С. *Влияние включения графита на долговечность литых и наплавленных валков горячей прокатки* / И. С. Сарычев // *Сталь.* – 2006. – № 2. – С. 41–44.
6. *Паспорт цеха ЛПЦ-1 АО «АрселорМиттал Темиртау».*
7. Львовский Е. Н. *Статистические методы построения эмпирических формул : учеб пособие для вузов* / Е. Н. Львовский. – М. : Высш. шк., 1988. – 239 с.
8. *Исследование показателей деформации валков различного исполнения* / Кривцова О. Н., Талмазан В. А., Кавалек А., Вивенцев А. С., Арбуз А. С., Горшков А. В. // 14 Межд. конф. «Новые технологии и достижения в металлургии и инженерии материалов и процессов», 6–7 июня 2013, Честоховский Политехнический университет, г. Честохов, Польша. – С. 379–383.
9. Гмурман В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособ. для вузов* / В. Е. Гмурман. – Изд. 7-е, стер. – М. : Высш. шк., 2001. – 479 с.
10. Гостев К. А. *Влияние напряжений в прокатных валках на их эксплуатационную надежность* / К. А. Гостев // *Сталь.* – 2008. – № 11. – С. 78–86.
11. *Study of Deformation Indexes of Rolls of Different Designs* / Krivtsova O. N., Viventsov A. S., Talmazan V. A., Arbuz A. S., Panin E. A. // *Applied Mechanics and Materials.* – 2013. – Vol. 378. – P. 394–396 (impact factor TR = 0.111).

Статья написана в рамках выполнения бюджетной темы: «Разработка технологических методов для улучшения профиля и плоскостности горячекатаной полосы».

Кривцова О. Н. – канд. техн. наук, доц. КГИУ;  
Ибатов М. К. – д-р техн. наук, проф. КГИУ;  
Самодурова М. – д-р техн. наук, проф. ЮрГУ;  
Лежнев С. Н. – канд. техн. наук, доц. КГИУ;  
Панин Е. А. – магистр КГИУ.

КГИУ – Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Республика Казахстан.

ЮрГУ – Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия.

E-mail: [krivcova60@mail.ru](mailto:krivcova60@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 11.03.2013 г.