

УДК 621.771.23

Переходченко В. А.
Настоящая С. С.
Чуруканов А. С.
Сатонин А. А.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА УПРУГО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ УЗЛОВ РАБОЧИХ КЛЕТЕЙ ЛИСТОВЫХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Большинство рабочих клеток листовых станов горячей и холодной прокатки имеют четырехвалковые узлы, включающие в себя рабочие и опорные валки с подушками [1, 2]. Методы расчета упруго-деформированного состояния данных валковых узлов, знание которого необходимо для выбора рациональных конструктивных параметров и назначения эффективных профилировок, рассмотрены в работах [1–3] и других. Вместе с тем авторы данных работ исходили из допущения о равномерном распределении межвалковых погонных нагрузок q_{MZ} (рис. 1), что снижает степень достоверности получаемых результатов и не позволяет учесть влияние силы противоизгиба Q_{np} рабочих валков.

Целью работы является расширение и повышение степени достоверности методов расчета упруго-деформированного состояния узлов рабочих и опорных валков листовых прокатных станов.

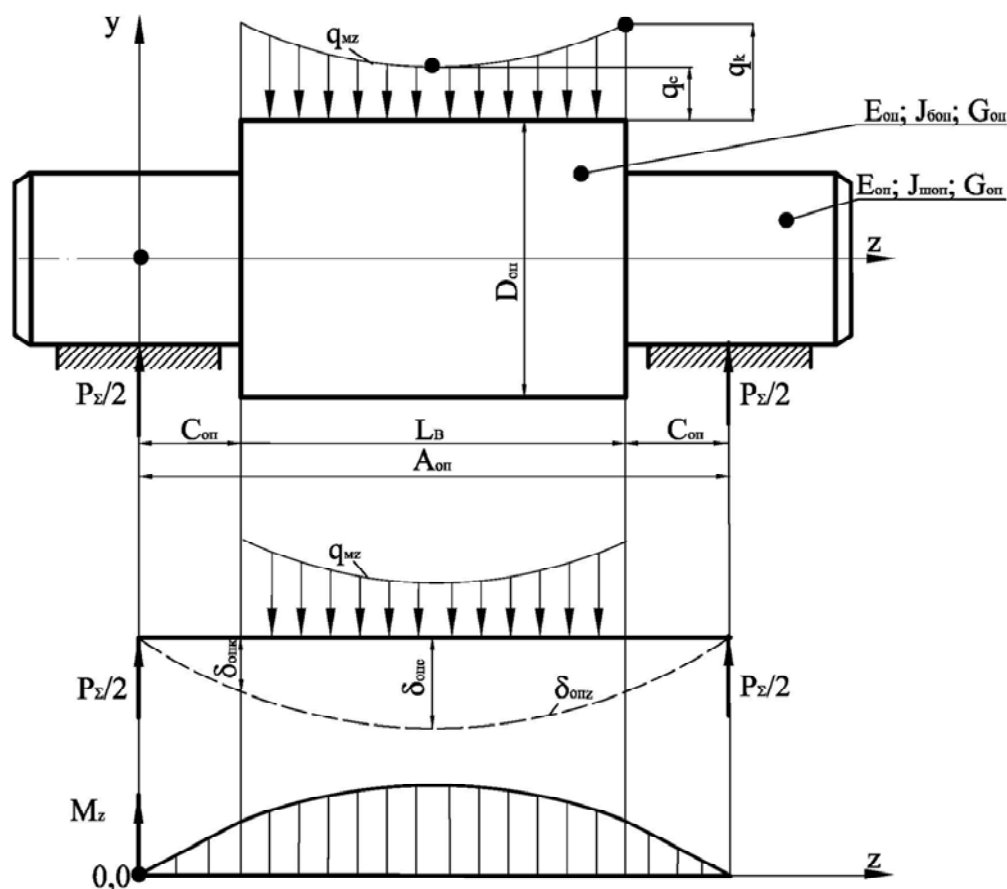


Рис. 1. Расчетная схема к определению упругих деформаций опорного валка четырехвалковых листовых прокатных станов

Среди методов расчета распределений межвалковых погонных нагрузок q_{Mz} достаточно широкое распространение получила методика В. П. Полухина [1, 3], основанная на аналитическом обобщении широкого массива экспериментальных данных. При этом, как показали результаты предварительного анализа, расчетные распределения межвалковых погонных нагрузок в диапазоне $z = C_{on} \dots A_{on}/2$ могут быть обобщены в виде следующей степенной зависимости:

$$q_{Mz} = q_{Mk} + (q_{Mc} - q_{Mk})[(z - C)/(L_g/2)]^{a_q}, \quad (1)$$

где z – геометрическая координата, имеющая свое начало в плоскости опор и являющаяся параллельной оси опорного вала (см. рис. 1);

C_{on} , A_{on} – расстояние от опоры до торцевой поверхности бочки, а также расстояние по опорам опорного вала;

$q_{Mz} = q_{Mk} = q_{Mz}|_{z=A_{on}/2}$, $q_{Mk} = q_{Mz}|_{z=C_{on}}$ – количественные оценки межвалковых погонных нагрузок по середине и по торцевым поверхностям бочек опорных валков длиной L_g ; a_q – степенной показатель, учитывающий реальную форму распределений межвалковых погонных нагрузок q_{Mz} (см. рис. 1). Следуя рекомендациям работы [1], предполагающим использование теоремы Кастильяно, текущие по длине бочки значения упругих прогибов опорного вала от действия изгибающих моментов δ_{op1z} и перерезывающих сил δ_{op2z} могут быть определены, соответственно, как:

$$\delta_{op1z} = \{1/(2E_{on}J_{on})\} \int_0^z M_{uz} z dz; \quad (2)$$

$$\delta_{op2z} = \{1/(2G_{on}F_{on})\} \int_0^z N_{nz} dz, \quad (3)$$

где J_{on} , F_{on} – момент инерции и площадь поперечного сечения опорного вала;

M_{uz} , N_{nz} – количественные оценки текущих значений изгибающих моментов и перерезывающих сил;

G_{on} – модуль сдвига материала опорного вала.

Учитывая неравномерный, то есть более реальный характер распределений межвалковых погонных нагрузок q_{Mz} (см. рис. 1), выражение (2) применительно к бочке опорного вала можно представить в виде:

$$\delta_{on1z} = \frac{1}{2E_{on}J_{uon}} \int_0^{C_{on}} \frac{P_{\Sigma}}{2} z z dz + \frac{1}{2E_{on}J_{\beta on}} \int_{C_{on}}^z \left\{ \frac{P_{\Sigma}}{2} z - M_{uq_{Mz}} \right\} z dz, \quad (4)$$

где J_{uon} , $J_{\beta on}$ – моменты инерции поперечных сечений, соответственно, шейки и бочки опорного вала (см. рис. 1);

$M_{uq_{Mz}}$ – текущее значение изгибающего момента от действия межвалковых погонных нагрузок q_{Mz} .

Аналитически величину изгибающего момента $M_{uq_{Mz}}$ зависимости (1) можно определить на основе дополнительного интегрирования по следующей схеме:

$$\begin{aligned}
 M_{uq_{mz}} &= \int_{C_{on}}^{Z_L} q_{mz} (Z_L - z) dz = \int_{C_{on}}^{Z_L} \left[q_{mk} + (q_{mc} - q_{mk}) \left\{ \frac{z - C_{on}}{A_{on}/2 - C_{on}} \right\}^{a_q} \right] (Z_L - z) dz = \\
 &= q_{mk} \int_{C_{on}}^{Z_L} (Z_L - z) dz + \frac{(q_{mc} - q_{mk})}{(A_{on}/2 - C_{on})^{a_q}} \int_{C_{on}}^{Z_L} (z - C_{on})^{a_q} (Z_L - z) dz, \quad (5)
 \end{aligned}$$

где Z_L – текущая по длине бочки опорного вала геометрическая координата точки, по отношению к которой рассматривается его упруго-деформированное состояние.

С учетом использования вспомогательных переменных $U_1 = Z_L - z$, $dU_1 = -dz$ по отношению к первому и $U_2 = z - C_{on}$, $dU_2 = dz$ по отношению ко второму интегралу выражения (5) получим:

$$\begin{aligned}
 M_{uq_{mz}} &= -q_{mk} \int_{Z_L - C_{on}}^0 U_1 dU_1 + \frac{(q_{mc} - q_{mk})}{(A_{on}/2 - C_{on})^{a_q}} Z_L \int_0^{Z_L - C_{on}} U_2^{a_q} dU_2 - \\
 &\quad - \frac{(q_{mc} - q_{mk})}{(A_{on}/2 - C_{on})^{a_q}} \int_0^{Z_L - C_{on}} U_2^{a_q} (U_2 + C_{on}) dU_2. \quad (6)
 \end{aligned}$$

В результате интегрирования и последующих математических преобразований по отношению к текущему по длине бочки опорного вала значению изгибающего момента $M_{uq_{mz}}$ от действия межвалковой погонной нагрузки q_{mz} в окончательном виде имеем:

$$M_{uq_{mz}} = \frac{q_{mk} (z - C_{on})^2}{2} + \frac{(q_{mc} - q_{mk}) (z - C_{on})^{(a_q + 2)}}{(A_{on}/2 - C_{on})^{a_q} (a_q + 1)(a_q + 2)}. \quad (7)$$

Подставив выражение (7) в условие (4) можно записать:

$$\begin{aligned}
 \delta_{on1z} &= \frac{P_\Sigma}{4E_{on}J_{\omega on}} \int_0^{C_{on}} z^2 dz + \frac{P_\Sigma}{4E_{on}J_{\delta on} C_{on}} \int_{C_{on}}^z z^2 dz - \frac{q_{mk}}{4E_{on}J_{\delta on} C_{on}} \int_{C_{on}}^z (z - C_{on})^2 z dz - \\
 &\quad - \frac{(q_{mc} - q_{mk})}{2E_{on}J_{\delta on} (A_{on}/2 - C_{on})^{a_q} (a_q + 1)(a_q + 2) C_{on}} \int_{C_{on}}^z (z - C_{on})^{(a_q + 2)} z dz, \quad (8)
 \end{aligned}$$

где P_Σ – суммарная сила, действующая на опорные валки, включающая в себя силу прокатки, а также силу противоизгиба или переуравновешивания рабочих валков.

По отношению к интегралам $\frac{P_\Sigma}{4E_{on}J_{\omega on}} \int_0^{C_{on}} z^2 dz + \frac{P_\Sigma}{4E_{on}J_{\delta on} C_{on}} \int_{C_{on}}^z z^2 dz$ имеем:

$$\frac{P_\Sigma}{4E_{on}J_{\omega on}} \int_0^{C_{on}} z^2 dz + \frac{P_\Sigma}{4E_{on}J_{\delta on} C_{on}} \int_{C_{on}}^z z^2 dz = \frac{P_\Sigma}{12E_{on}} \left\{ \frac{C_{on}^3}{J_{\omega on}} + \frac{z^3 - C_{on}^3}{J_{\delta on}} \right\}. \quad (9)$$

Аналогично по отношению к интегралам $\int_{C_{on}}^z (z - C_{on})^2 z dz$ и $\int_{C_{on}}^z (z - C_{on})^{(a_q + 2)} z dz$

с использованием вспомогательной переменной $U_2 = (z - C_{on})$ и ее дифференциала $dU_2 = dz$ получим:

$$\int_{C_{on}}^z (z - C_{on})^2 z dz = \int_0^{z-C_{on}} U_2^2 (U_2 + C_{on}) dU_2 = \left(\frac{U_2^4}{4} + \frac{U_2^3 C_{on}}{3} \right) \Big|_0^{z-C_{on}} =$$

$$= \frac{(z - C_{on})^4}{4} + \frac{(z - C_{on})^3 C_{on}}{3}; \quad (10)$$

$$\int_{C_{on}}^z (z - C_{on})^{(a_q+2)} z dz = \int_0^{z-C_{on}} U_2^{(a_q+2)} (U_2 + C_{on}) dU_2 = \frac{U_2^{(a_q+4)}}{(a_q+4)} \Big|_0^{z-C_{on}} +$$

$$+ \frac{U_2^{(a_q+3)} C_{on}}{(a_q+3)} \Big|_0^{z-C_{on}} = \frac{(z - C_{on})^{(a_q+4)}}{(a_q+4)} + \frac{(z - C_{on})^{(a_q+3)} C_{on}}{(a_q+3)}. \quad (11)$$

Подставив выражения (9)–(11) в уравнение (8) по отношению к текущему значению упругих прогибов опорного вала от действия изгибающих моментов в окончательном виде имеем:

$$\delta_{on1z} = \frac{P_\Sigma}{12E_{on}} \left\{ \frac{C_{on}^3}{J_{uon}} + \frac{z^3 - C_{on}^3}{J_{\delta on}} \right\} - \frac{q_{mk}}{4E_{on}J_{\delta on}} \left\{ \frac{(z - C_{on})^4}{4} + \frac{(z - C_{on})^3 C_{on}}{3} \right\} -$$

$$- \frac{(q_{mc} - q_{mk})}{2E_{on}J_{\delta on} (A_{on}/2 - C_{on})^{a_q} (a_q + 1)(a_q + 2)} \left\{ \frac{(z - C_{on})^{(a_q+4)}}{(a_q + 4)} + \frac{(z - C_{on})^{(a_q+3)} C_{on}}{(a_q + 3)} \right\}. \quad (12)$$

Аналогично и по отношению к текущим по длине бочки значениям упругих прогибов опорного вала от действия перерезывающих сил δ_{on2z} , то есть по отношению к зависимости (3):

$$\delta_{on2z} = \frac{1}{2G_{on}F_{uon}} \int_0^{C_{on}} \frac{P_\Sigma}{2} dz + \frac{1}{2G_{on}F_{\delta on}} \int_{C_{on}}^z \left(\frac{P_\Sigma}{2} - N_{nq_{mz}} \right) dz, \quad (13)$$

где $F_{uon}, F_{\delta on}$ – площади поперечных сечений, соответственно, шейки и бочки опорного вала (см. рис. 1); $N_{nq_{mz}}$ – текущее значение перерезывающей силы от действия межвалковых погонных нагрузок q_{mz} (см. рис. 1).

С учетом зависимости (1) текущее значение перерезывающей силы $N_{nq_{mz}}$ может быть определено как:

$$N_{nq_{mz}} = \int_{C_{on}}^z q_{mz} dz = \int_{C_{on}}^z \left\{ q_{mk} + (q_{mc} - q_{mk}) \left(\frac{z - C_{on}}{A_{on}/2 - C_{on}} \right)^{a_q} \right\} dz =$$

$$= q_{mk} (z - C_{on}) + \frac{(q_{mc} - q_{mk})}{(A_{on}/2 - C_{on})^{a_q}} \frac{(z - C_{on})^{(a_q+1)}}{(a_q + 1)}. \quad (14)$$

Подставив выражение (14) в условие (13), получим:

$$\delta_{on2z} = \frac{P_{\Sigma} C_{on}}{4G_{on} F_{uon}} + \frac{P_{\Sigma} (z - C_{on})}{4G_{on} F_{\delta on}} - \frac{q_{mk}}{2G_{on} F_{\delta on} C_{on}} \int_{C_{on}}^z (z - C_{on}) dz - \frac{(q_{mc} - q_{mk})}{2G_{on} F_{\delta on} (A_{on} / 2 - C_{on})^{a_q} (a_q + 1) C_{on}} \int_{C_{on}}^z (z - C_{on})^{(a_q + 1)} dz. \quad (15)$$

С учетом интегрирования по отношению к текущему значению упругого прогиба опорного вала от действия перерезывающих сил δ_{on2z} после соответствующих математических преобразований имеем:

$$\delta_{on2z} = \frac{P_{\Sigma} C_{on}}{4G_{on} F_{uon}} + \frac{P_{\Sigma} (z - C_{on})}{4G_{on} F_{\delta on}} - \frac{q_{mk}}{2G_{on} F_{\delta on}} \frac{(z - C_{on})^2}{2} \Big|_{C_{on}}^z - \frac{(q_{mc} - q_{mk})}{2G_{on} F_{\delta on} (A_{on} / 2 - C_{on})^{a_q} (a_q + 1)} \frac{(z - C_{on})^{(a_q + 2)}}{(a_q + 2)} \Big|_{C_{on}}^z \quad (16)$$

или в окончательном виде:

$$\delta_{on2z} = \frac{P_{\Sigma}}{4G_{on}} \left\{ \frac{C_{on}}{F_{uon}} + \frac{z - C_{on}}{F_{\delta on}} \right\} - \frac{q_{mk} (z - C_{on})^2}{4G_{on} F_{\delta on}} - \frac{(q_{mc} - q_{mk}) (z - C_{on})^{(a_q + 2)}}{2G_{on} F_{\delta on} (A_{on} / 2 - C_{on})^{a_q} (a_q + 1) (a_q + 2)}. \quad (17)$$

Еще одной составляющей упруго-деформированного состояния узла рабочих и опорных валков является величина сплющивания в месте их контакта $\delta_{mвz}$, количественную оценку которой, следуя решению Б. С. Ковальского [1], можно определить как

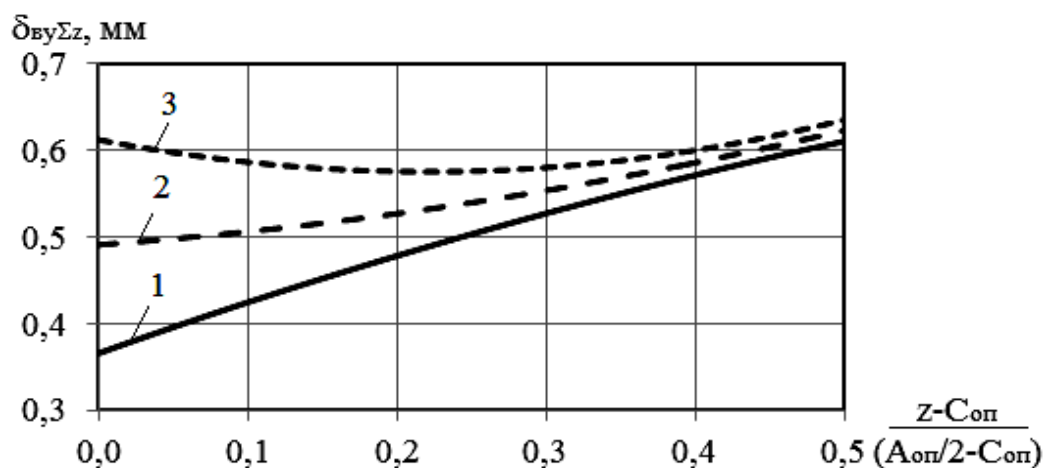
$$\delta_{mвz} = \frac{2q_{mз}}{\pi} \left[\frac{1 - \omega_{on}^2}{E_{on}} \left(\ln \frac{D_{on}}{b_{nлз}} + 0,407 \right) + \frac{1 - \omega_p^2}{E_p} \left(\ln \frac{D_p}{b_{nлз}} + 0,407 \right) \right], \quad (18)$$

где $b_{nлз}$ – полуширина площадки контакта рабочих и опорных валков диаметрами D_p и D_{on} , определяемая по формуле:

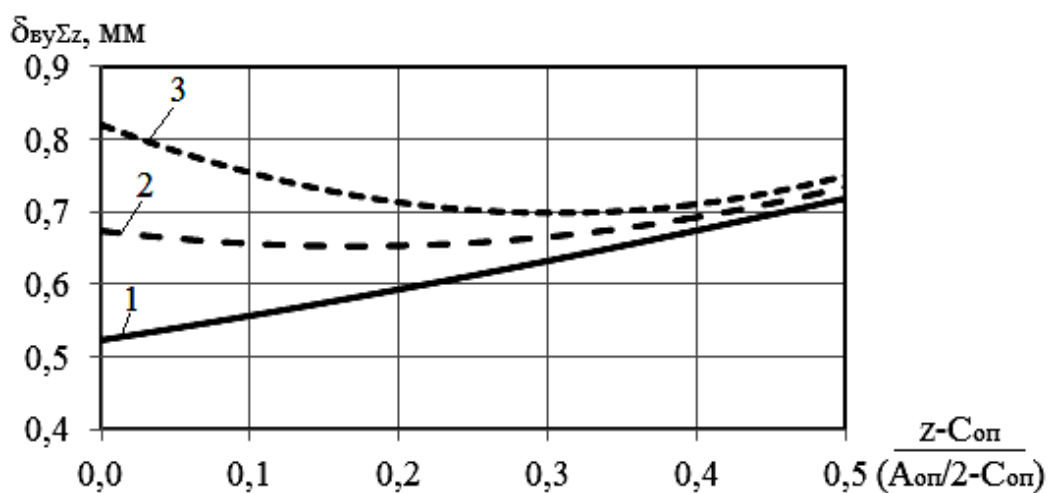
$$b_{nлз} = 1,128 \sqrt{\eta q_{mз} D_p D_{on} / \{2(D_p + D_{on})\}};$$

$\eta = (1 - \omega_p^2) / E_p + (1 - \omega_{on}^2) / E_{on}$ – вспомогательная переменная, характеризующая физико-механические свойства материалов контактирующих рабочих и опорных валков.

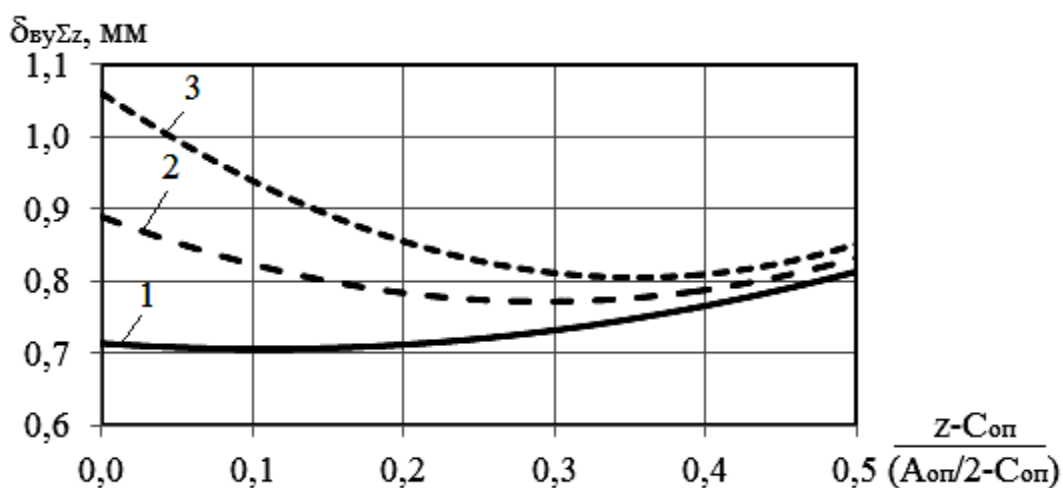
В качестве примеров результатов численной реализации, полученных применительно к последней чистой рабочей клети ШСП 1700 ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», на рис. 2 представлены расчетные распределения суммарных текущих показателей упругих деформаций узла рабочих и опорных валков $\delta_{\Sigma} = \delta_{mвz} + \delta_{on1z} + \delta_{on2z}$, учитывающих их упругое сплющивание $\delta_{mвz}$, а также упругие прогибы опорных валков от действия изгибающих моментов δ_{on1z} и перерезывающих сил δ_{on2z} .



а – $P = 13,3 \text{ МН}$, $B = 1000 \text{ мм}$



б – $P = 16,6 \text{ МН}$, $B = 1250 \text{ мм}$



в – $P = 20 \text{ МН}$, $B = 1500 \text{ мм}$

1 – $Q_{np}/P = 0$; 2 – $Q_{np}/P = 0,1$; 3 – $Q_{np}/P = 0,2$

Рис. 2. Расчетные распределения текущих показателей суммарных упругих деформаций $\delta_{vy\Sigma z}$ узла рабочих и опорных валков при различных значениях ширины полосы B , силы прокатки P и приведенного значения силы противоизгиба Q_{np}/P

Из анализа представленных результатов (см. рис. 2) следует, что на упруго-деформированное состояние четырехвалковых узлов рабочих клетей листовых прокатных станов существенное влияние оказывает целый ряд факторов. В частности, при изменении ширины полосы с $B = 1000$ мм до $B = 1500$ мм и соответствующем увеличении силы прокатки с $P = 13,3$ МН до $P = 20$ МН уровни упругих деформаций сплющивания δ_{M6Z} возрастают на 40...60 %. Существенно видоизменяется в этом случае и характер распределений данных упругих деформаций по длине межвалкового контакта. К значительно большему видоизменению данных распределений приводит создание и увеличение уровня приведенного значения силы противоизгиба, при этом максимум упругих деформаций сплющивания имеет место по торцевым поверхностям бочек рабочих и опорных валков, а их минимум – посередине межвалкового контакта. Значимое влияние уровней приведенных значений силы противоизгиба имеет место и по отношению к упругим деформациям прогибов опорных валков от действия изгибающих моментов δ_{on1z} (см. рис. 2) и перерезывающих сил δ_{on2z} , а также по отношению к текущим показателям суммарных упругих деформаций узла рабочих и опорных валков $\delta_{6y\Sigma z}$. При этом следует указать на достаточно существенное изменение характера распределений $\delta_{6y\Sigma z}$, что, в свою очередь, свидетельствует о наличии значительных возможностей по отношению к регулированию поперечной разнотолщинностью и степени плоскостности листов и полос, подвергаемых горячей или холодной прокатке.

ВЫВОДЫ

На основе аналитической аппроксимации реальных распределений межвалковых погонных нагрузок, использования теоремы Кастельяно и последующего интегрирования уточнена и расширена методика расчета текущих показателей упруго-деформированного состояния рабочих и опорных валков листовых прокатных станов. Показано влияние конструктивных параметров четырехвалкового узла, ширины, силы прокатки и величины противоизгиба рабочих валков. Выявлен диапазон изменения сил противоизгиба, обеспечивающих требуемые показатели по поперечной разнотолщинности и степени плоскостности получаемых листов и полос.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката* / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребенник [и др.]. – М. : Металлургия, 1988. – 680 с.
2. *Полухин В. П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов* / В. П. Полухин. – М. : Металлургия, 1972. – 512 с.
3. *Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке* / П. И. Полухин, В. А. Николаев, В. П. Полухин [и др.]. – М. : Металлургия, 1974. – 200 с.

Переходченко В. А. – ведущий инженер ПАО «НКМЗ»;
Настоящая С. С. – ассистент каф. АММ ДГМА;
Чуруканов А. С. – ассистент каф. АММ ДГМА;
Сатонин А. А. – инженер-конструктор ПАО «НКМЗ».

ПАО «НКМЗ» – Публичное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 15.01.2013 г.