

УДК 621.771.23:621.982

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ СТАЛЬНОГО ЛИСТА И РЕАКЦИЙ РАБОЧИХ РОЛИКОВ В МНОГОРОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ

Шинкин В.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики (shinkin-korolev@yandex.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4)

Аннотация. Главной задачей технологии правки стального листа является вычисление оптимальных обжатий стальной заготовки рабочими роликами листопрямительных машин таким образом, чтобы лист на выходе из машины имел минимальные остаточные напряжения и кривизну. При математическом и численном моделировании процесса правки стального листа в многороликовых правильных машинах вначале вычисляют кривизну и изгибающие моменты стального листа в точках касания с рабочими роликами машины, а затем рассчитывают энергосиловые параметры правки листа. Вычисление энергосиловых параметров многороликовых листопрямительных машин является важным технологическим расчетом при правке стального листа. В основу энергосилового расчета входит вычисление реакций опор рабочих роликов и усилий верхней и нижней кассет рабочих роликов правильной машины при правке. При недостаточном изгибающем моменте стального листа невозможно устранить вредные остаточные напряжения в стенке листа и поверхностные дефекты листа. При недостаточном усилии верхней кассеты роликов невозможно достигнуть требуемого обжатия листа для качественной правки. Чрезмерные значения крутящих моментов роликов и усилий кассет роликов часто приводят к дефектам листа, поломке рабочих и опорных роликов и поломке всей листопрямительной машины. В настоящей работе предложен приближенный метод расчета оптимальных технологических параметров холодной правки стального листа на многороликовой листопрямительной машине. Расчеты позволяют определить вид и кривизну нейтральной плоскости стального листа при правке, остаточную кривизну листа после правки, изгибающие моменты листа и реакции опор рабочих роликов, остаточные напряжения в стенке стального листа, долю пластической деформации по толщине листа и относительную деформацию продольных поверхностных волокон листа при правке в зависимости от радиуса рабочих роликов, шага между роликами листопрямительной машины, величины обжатия листа верхними роликами, толщины листа, а также модуля Юнга, предела текучести и модуля упрочнения металла листа. Результаты исследований могут быть широко использованы на машиностроительных и металлургических заводах.

Ключевые слова: стальной лист, многороликовые листопрямительные машины, рабочие и опорные ролики, кривизна листа, знакопеременный изгиб, изгибающие моменты листа, упругопластическая среда с линейным упрочнением.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-777-784

Прокатные станы и многороликовые правильные машины широко используются при производстве стального листа в российской и зарубежной металлургической промышленности [1 – 40]. Например, на металлургическом комплексе стан-5000 используются пяти- и девятироликовые листопрямительные машины фирмы SMS Siemag, а на металлургической линии поперечной резки листовой стали фирмы Fagor Arrasate – пяти-, шести-, одиннадцати- и пятнадцатирроликовые машины.

После горячей прокатки стальные листы деформируются при охлаждении из-за остаточных напряжений и часто имеют поверхностные дефекты в холодном состоянии (например, коробоватость, волнистость, конусность и так далее). Поэтому стальные листы правят в многороликовых листопрямительных машинах. Процесс правки листа в таких машинах является обязательной операцией технологических процессов в металлургическом производстве. Правка листа широко используется российскими металлургическими заводами в Выксе, Челябинске, Магнитогорске, Ижоре и зарубежными металлургическими заводами в США, Германии, Испании, Китае, Индии и так далее. На рис. 1 показана пят-

надцатирроликовая листопрямительная машина испанской фирмы Fagor Arrasate.

Ранее [21 – 24] была разработана точная математическая модель расчета технологических параметров многороликовой листопрямительной машины, основанная на кубическом приближении продольной линии листа между соседними правильными роликами. Однако при этом необходимо численно решать трансцендентную систему нелинейных уравнений (которую нельзя решить аналитически) с большим числом неизвестных (число неизвестных равно числу правильных роликов машины). Технологи металлургических заводов было высказано пожелание максимально упростить вышеуказанную модель таким образом, чтобы при расчете технологических параметров правильной машины не приходилось численно решать сложную нелинейную систему уравнений, а было достаточно выполнить простейшие арифметические операции – сложение, вычитание, умножение, деление, возведение в степень и извлечение корня. При этом точность такой упрощенной арифметической модели должна быть достаточной для практических расчетов на металлургическом заво-

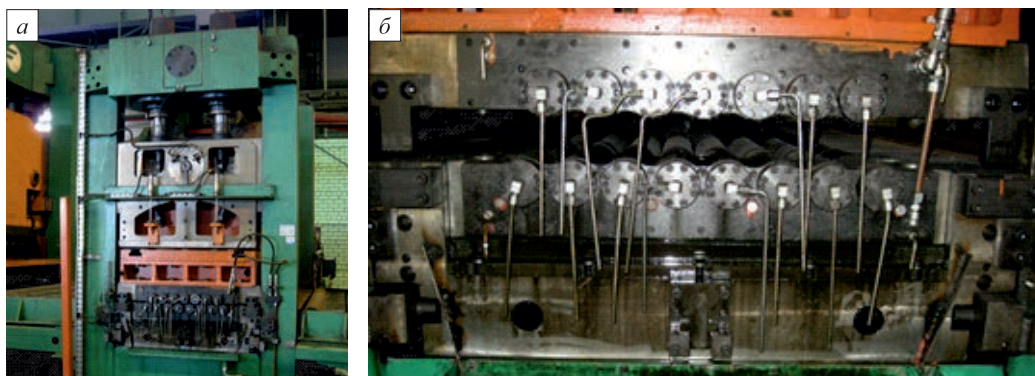


Рис. 1. Пятнадцатироликовая листопрямлящая машина Fagor Arrasate:
 а – общий вид; б – пятнадцать рабочих роликов

Fig. 1. The fifteen-roller sheet-straightening machine by Fagor Arrasate:
 а – general form; б – fifteen working rollers

де и несильно уступать точной математической модели. Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

Изгибающий момент и коэффициент пружинения листа

Пусть h и b – толщина и ширина стального листа, σ_T , E , Π_p и Π_c – предел текучести стали, модуль Юнга, модули упрочнения стали при растяжении и сжатии.

При пластическом изгибе $\left(\rho < \rho_T = \frac{hE}{2\sigma_T}\right)$ изгибающий момент стального листа равен [21 – 27]

$$M(\rho) = \frac{bh^2\sigma_T}{12} \left[3 - 4 \left(\frac{\sigma_T\rho}{Eh} \right)^2 \right] + \frac{bh^3(\Pi_p + \Pi_c)}{24\rho} \times \left(1 - 2 \frac{\sigma_T\rho}{Eh} \right)^2 \left(1 + \frac{\sigma_T\rho}{Eh} \right),$$

где ρ – радиус кривизны продольной нейтральной линии листа.

При упругом изгибе $\left(\rho \geq \rho_T = \frac{hE}{2\sigma_T}\right)$ изгибающий момент стального листа равен [1, 21 – 27]

$$M(\rho) = \frac{bh^3E}{12\rho}.$$

Для высокопрочных сталей модули упрочнения при растяжении и сжатии практически равны друг другу: $\Pi_c \approx \Pi_p = \Pi$.

При пластическом изгибе $\left(\rho < \rho_T = \frac{hE}{2\sigma_T}\right)$ коэффициент пружинения стального листа равен [21 – 27]

$$\beta(\rho) = \frac{1}{\left(1 - \frac{\Pi_p + \Pi_c}{2E}\right) \left(1 - 2 \frac{\rho\sigma_T}{hE}\right)^2 \left(1 + \frac{\rho\sigma_T}{hE}\right)}.$$

При упругом изгибе стального листа $\left(\rho \geq \rho_T = \frac{hE}{2\sigma_T}\right)$

коэффициент пружинения $\beta(\rho) = \infty$.

Доля пластической деформации по толщине стального листа (степень проникновения пластической деформации в глубину листа) составит

$$\eta = \begin{cases} 1 - \frac{2\sigma_T\rho}{Eh}, & \text{если } \rho \leq \frac{Eh}{2\sigma_T}; \\ 0, & \text{если } \rho > \frac{Eh}{2\sigma_T}. \end{cases}$$

Относительная деформация продольных поверхностных волокон листа равна

$$\eta_{прв} = \frac{h}{2|\rho|}.$$

Правка листа на (2N + 1)-роликовой правильной машине

Правка стального листа осуществляется (2N + 1) приводными рабочими правильными роликами – N верхними правильными роликами и (N + 1) нижними правильными роликами. Правильные ролики снабжены отдельными системами настройки их вертикального положения с помощью клиновых пар и гидроцилиндров [1, 21 – 24].

Пусть t – шаг между нижними правильными роликами; H_i – величина обжатия нейтральной поверхности стального листа на i -ом правильном ролике; N_i – реакции рабочих роликов в точках касания с листом; R – радиус рабочих роликов; $R_0 = R + h/2$; ρ_i и $\varepsilon_i = 1/\rho_i$ – радиусы кривизны и кривизна продольной нейтральной линии листа в точках его касания с рабочими роликами, φ_i – углы точек касания листа и роликов ($i = 1, \dots, 2N + 1$) (рис. 2).

Замечание 1. Связь между реальным обжатием $H_{реал}$ и обжатием нейтральной поверхности стального листа H имеет вид

$$H = H_{\text{реал}} + h.$$

Максимальная величина обжатия H составит

$$H_{\text{max}} = 2R_0 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{t}{4R_0} \right)^2} \right).$$

Не ограничивая общности, далее будем считать, что нижние (нечетные) рабочие ролики лежат на одном горизонтальном уровне

$$H_{2j+1} = 0, j = 0, \dots, N,$$

а верхние рабочие ролики имеют независимые вертикальные перемещения (обжатия).

При правке стального листа на металлургических заводах реальные углы касания листа с рабочими роликами листопрямильной машины, начиная со второго ролика до последнего, имеют малые значения (до $1 - 3^\circ$). Поэтому далее будем считать, что все углы касания рабочих роликов со стальным листом равны нулю:

$$\varphi_i = 0, i = 0, \dots, 2N + 1.$$

Приближенные радиусы кривизны продольной нейтральной линии стального листа в точках его касания с четными и с нечетными рабочими роликами листопрямильной машины положим равными

$$\rho_{2k} = \frac{t^2}{24H_{2k}}, k = 1, \dots, N;$$

$$\rho_{2k+1} = \frac{t^2}{12(H_{2k} + H_{2k+2})}, k = 1, \dots, N - 1.$$

Приближенное значение радиуса кривизны на последнем рабочем ролике составит

$$\rho_{2N+1} = \beta(\rho_{2N})\rho_{2N}.$$

Замечание 2. Если обжатие

$$H_{2k} \geq \frac{t^2}{24R_0},$$

то поверхность листа обтекает поверхность рабочего ролика. Следовательно, $\rho_{2k} = R_0$. Аналогично, если

$$H_{2k} + H_{2k+2} \geq \frac{t^2}{12R_0},$$

то $\rho_{2k+1} = -R_0$.

Замечание 3. Можно также положить приближенные нечетные радиусы кривизны равными

$$\rho_{2k+1} = -\frac{t^2}{48} \left(\frac{1}{H_{2k}} + \frac{1}{H_{2k+2}} \right), k = 1, \dots, N - 1.$$

Однако точность вычисления нечетных радиусов кривизны в этом случае аппроксимации падает (особенно на последних нечетных роликах, где радиусы кривизны листа принимают большие значения).

Замечание 4. Отметим, что $\frac{2H_{2k}}{t} \ll 1$. Поэтому

$$\begin{aligned} \rho_{2k} &= \frac{t^2}{24H_{2k}} \approx \frac{t^2}{24H_{2k}} \left[1 + \left(\frac{2H_{2k}}{t} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{\sqrt{\left(\frac{t}{2} \right)^2 + H_{2k}^2}}{6 \cos \left[\arctg \left(\frac{t}{2H_{2k}} \right) \right]}. \end{aligned}$$

В точках касания стального листа с рабочими роликами правильной машины изгибающие моменты листа определяются по формулам

$$M_1 = 0; M_{2k} = M(\rho_{2k}), k = 1, \dots, N;$$

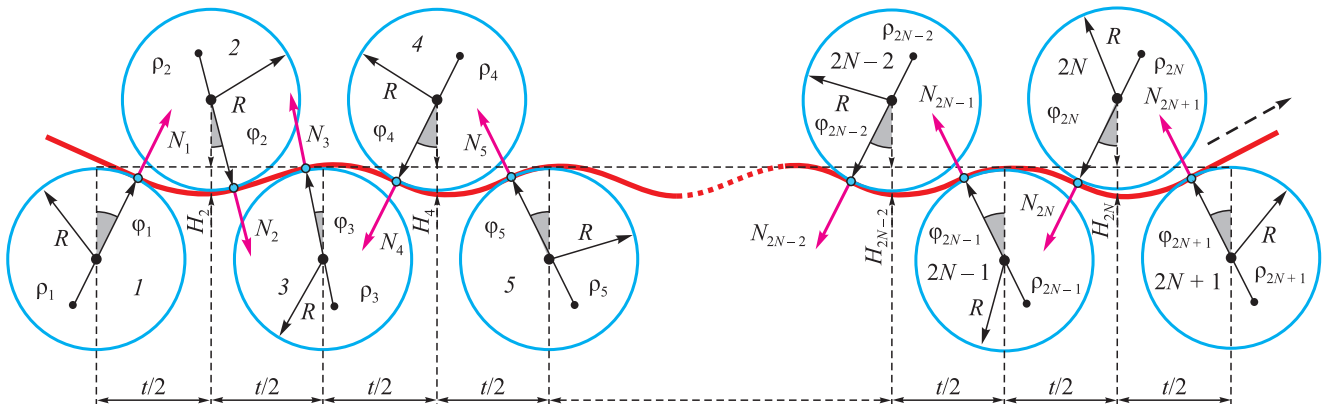


Рис. 2. Правка стального листа $2N + 1$ рабочими роликами

Fig. 2. Flattening of steel sheet by $2N + 1$ working rollers

$$M_{2k+1} = -M(|\rho_{2k+1}|), k = 1, \dots, N-1; M_{2N+1} = 0.$$

Реакции рабочих роликов в точках их касания с листом составят

$$N_1 = \frac{2}{t} M_2; N_2 = \frac{2}{t} (-M_3 + 2M_2),$$

$$N_{2k-1} = \frac{2}{t} (M_{2k} - 2M_{2k-1} + M_{2k-2}), k = 2, \dots, N;$$

$$N_{2k-2} = \frac{2}{t} (-M_{2k-1} + 2M_{2k-2} - M_{2k-3}), k = 3, \dots, N;$$

$$N_{2N} = \frac{2}{t} (2M_{2N} - M_{2N-1}), N_{2N+1} = \frac{2}{t} M_{2N}.$$

Вертикальная сила давления верхних и нижних роликов на лист соответственно составит

$$F_{\text{верх}} = \sum_{k=1}^N N_{2k} = \frac{4}{t} \sum_{k=2}^{2N} (-1)^k M_k;$$

$$F_{\text{нижн}} = \sum_{k=1}^N N_{2k+1} = \frac{4}{t} \sum_{k=2}^{2N} (-1)^k M_k = F_{\text{верх}}.$$

Суммарное давление всех верхних и нижних роликов на лист равно

$$F_{\text{сум}} = F_{\text{верх}} + F_{\text{нижн}} = \sum_{k=1}^{2N+1} N_i = \frac{8}{t} \sum_{k=2}^{2N} (-1)^k M_k.$$

Численный расчет для пятнадцатирولیковой листопрямительной машины Fagor Arrasate

Для пятнадцатирولیковой листопрямительной машины фирмы Fagor Arrasate $N = 7$ ($2_{N+1} = 15$), $t = 0,245/3 = 0,08167$ м, $R = 0,0375$ м. Результаты расчетов правки стального листа при $h = 0,004$ м, $b = 1,8$ м, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\sigma_T = 500 \cdot 10^6$ Па, $\Pi_p = \Pi_c = 8,8 \cdot 10^9$ Па, $H_2 = 0,006$ м,

$H_4 = 0,00502$ м, $H_6 = 0,00403$ м, $H_8 = 0,00305$ м, $H_{10} = 0,00207$ м, $H_{12} = 0,00108$ м, $H_{14} = 0,0001$ м (расположение верхних роликов на верхней плоской кассете) и $\rho_1 = -1$ м показаны на рис. 3 – 6.

Силы давления верхних и нижних рабочих роликов на стальной лист при точном решении равны: $F_{\text{верх}} = F_{\text{нижн}} = 2634$ кН. Предложенный выше упрощенный метод дает значение $F_{\text{верх}} = F_{\text{нижн}} = 2612$ кН (отличие от точного решения 0,8 % или 22 кН), а метод Королева [1] дает значение $F_{\text{верх}} = F_{\text{нижн}} = 1952$ кН (отличие от точного решения 25,9 % или 682 кН).

На рис. 3 левый столбец соответствует точному решению задачи, а правый – приближенному решению настоящей работы. Видно, что в случае расположения верхних роликов на плоской верхней кассете модуль кривизны листа в точках касания с рабочими роликами меняется почти по прямолинейному закону от третьего ролика к предпоследнему. Если верхние рабочие ролики имеют индивидуальные настройки их обжатия, то модуль кривизны листа в точках касания с рабочими роликами может меняться по нелинейному закону.

Сравнительный анализ различных методов расчета

Одним из методов расчета изгибающих моментов листа и усилий листопрямительных машин является метод Королева [1]. В этом методе изгибающие моменты листа рассчитываются с помощью коэффициента проникновения пластической деформации в глубь стального листа и предположения о том, что «степень пластической деформации поверхностных слоев листа от второго ролика к предпоследнему (первый и последний ролики не изгибают лист) изменяется по прямолинейному закону», что явно не соответствует действительности (см. рис. 4). На рис. 4 левый столбец соответству-

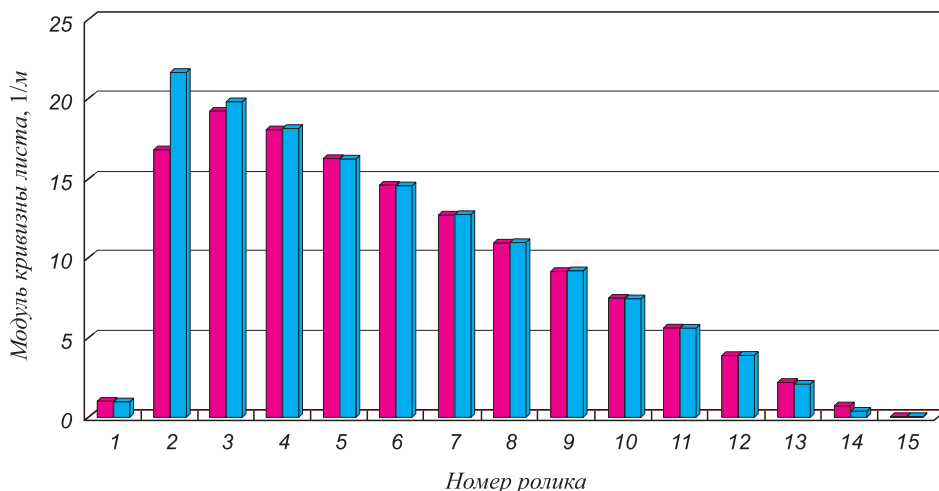


Рис. 3. Модуль кривизны листа при правке

Fig. 3. Module of sheet's curvature at leveling

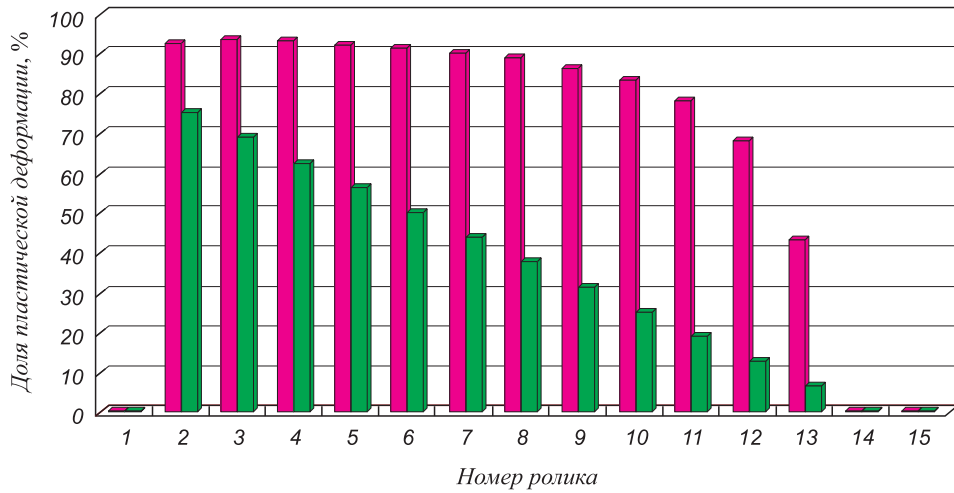


Рис. 4. Доля пластической деформации по толщине листа

Fig. 4. Proportion of plastic deformation on the sheet's thickness

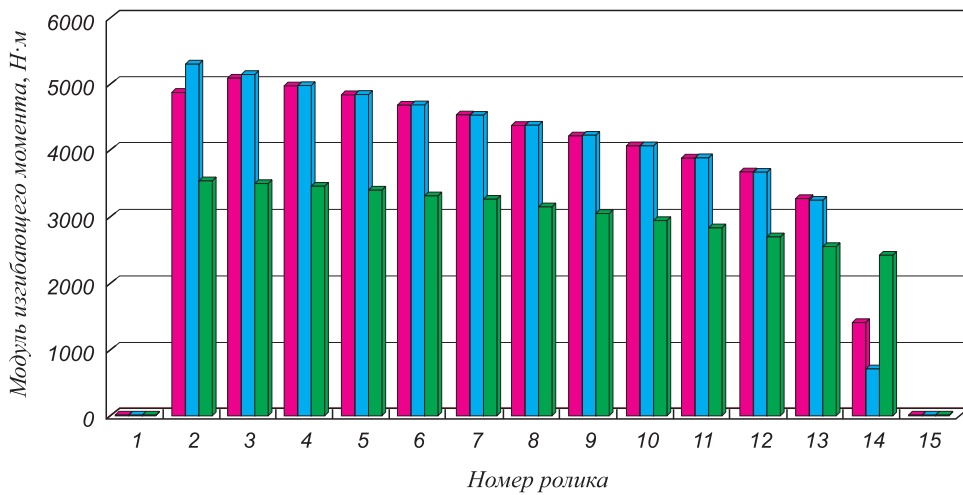


Рис. 5. Модуль изгибающего момента листа при правке

Fig. 5. Module of bending moments of sheet at leveling

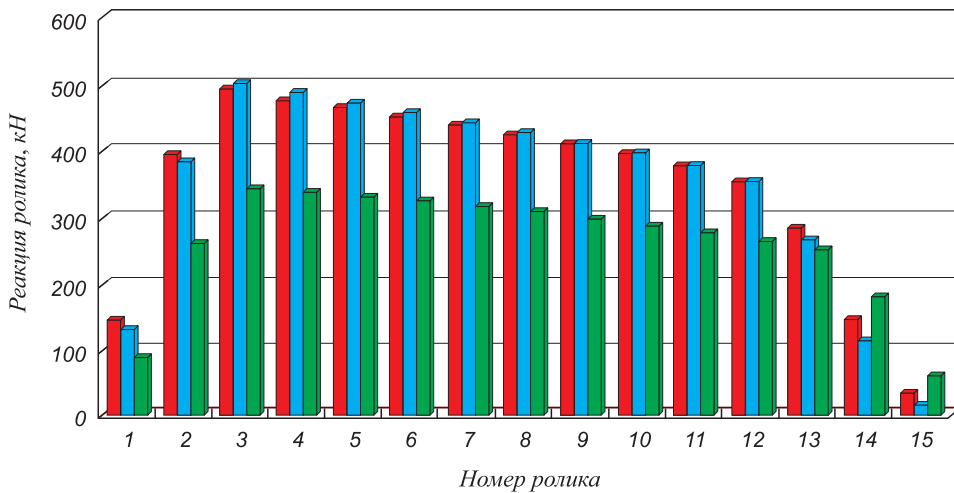


Рис. 6. Нормальные реакции рабочих роликов

Fig. 6. Normal reactions of working rollers

ет точному решению задачи, правый – решению метода Королева.

Реально (в случае расположения верхних роликов на плоской верхней кассете) доля пластической деформации по толщине стального листа от третьего к предпоследнему рабочему ролику напоминает перевернутую параболу с вершиной (максимумом) на третьем ролике (рис. 4).

Кривизна и радиусы кривизны стального листа в методе Королева не вычисляются, что не позволяет более или менее точно оценить изгибающие моменты листа, которые зависят от кривизны листа.

Для современных многороликовых листопрямительных машин с независимыми обжатиями рабочих роликов метод Королева не применим, так как в нем изначально предполагается, что верхние и нижние ролики принадлежат соответственно верхней и нижней плоским кассетам роликов.

Главным недостатком метода Королева является то, что модуль упрочнения металла листа при изгибе полагается равным нулю (диаграмма Прандтля), что приводит к очень существенным погрешностям (до 26 %) при расчетах силовых параметров правильной машины (см. рис. 5 и 6), а это может привести к поломке правильной машины.

На рис. 5, 6 левый столбец соответствует точному решению задачи, средний – приближенному решению данной работы, а правый – решению метода Королева.

Выводы. Предложен приближенный метод расчета кривизны продольной нейтральной линии листа, изгибающих моментов листа и реакций рабочих роликов при холодной правке стального листа на многороликовой листопрямительной машине. Показано, что предложенный упрощенный метод расчета значительно более точный, чем метод Королева. Результаты исследований могут быть использованы при производстве стального листа на металлургических заводах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов. – М.: Металлургия, 1987. – 480 с.
2. Calladine C.R. Plasticity for engineers. Theory and applications. – Woodhead Publishing, 2000. – 328 p.
3. Chakrabarty J. Theory of plasticity. – Butterworth-Heinemann, 2006. – 896 p.
4. Bhattacharyya D. Composite sheet forming. Vol. 11. – Elsevier Science, 1997. – 530 p.
5. Predeleanu M., Gilormini P. Advanced methods in materials processing defects. Vol. 45. – Elsevier Science, 1997. – 422 p.
6. Abe T., Tsuruta T. Advances in engineering plasticity and its applications (AEP '96). – Pergamon, 1996. – 938 p.
7. Klocke F. Manufacturing processes 4. Forming. – Springer, 2013. – 516 p.
8. Kang S.-J. Sintering. Densification, grain growth and microstructure. – Butterworth-Heinemann, 2004. – 280 p.
9. Banabic D. Multiscale modeling in sheet metal forming. – Springer, 2016. – 405 p.
10. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. Mechanics of Sheet Metal Forming. – Butterworth-Heinemann, 2002. – 211 p.
11. Belskij S.M., Yankova S., Mazur I.P., Stoyakin A.O. Influence of the transversal displacements of metal on the camber formation of hot-rolled strip // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 672 – 678.
12. Muhin U., Belskij S., Makarov E. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table // Frattura ed Integrita Strutturale. 2016. Vol. 37. P. 305 – 311.
13. Muhin U., Belskij S., Makarov E. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips // Frattura ed Integrita Strutturale. 2016. Vol. 37. P. 312 – 317.
14. Muhin U., Belskij S. Study of the influence between the strength of antibending of working rolls on the widening during hot rolling of thin sheet metal // Frattura ed Integrita Strutturale. 2016. Vol. 37. P. 318 – 324.
15. Mukhin Yu.A., Mazur I.P., Belskij S.M. Determining the boundaries of the St Venant zone for the self-balancing stress // Steel in Translation. 2007. Vol. 37. No. 9. P. 733 – 736.
16. Mazur I.P., Belskij S.M. The St Venant zone extent of the self-balancing longitudinal elastic stress // Materials Science Forum. 2012. Vol. 704-705. P. 33 – 39.
17. Shabalov I.P., Solov'ev D.M., Filippov G.A., Livanova O.V. Influence of UO shaping on the mechanical properties of large-diameter electrowelded pipe // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 4. P. 287 – 292.
18. Komkov N.A., Livanova O.V., Nikulin A.N., Filippov G.A. Manufacture of plane axisymmetric blanks by end rolling from round bar or thick-walled pipe // Steel in Translation. 2012. Vol. 42. No. 1. P. 73 – 77.
19. Manzhurin I.P., Sidorina E.A. Determination of the reduction in the thickness of strip during its shaping in the rolls of a roll-forming machine // Metallurgist. 2013. Vol. 56. No. 11-12. P. 941 – 945.
20. Punin V.I., Kokhan L.S., Morozov Yu.A. Reduction of the length of strip rolled on roll-forming machines // Metallurgist. 2013. Vol. 56. No. 11-12. P. 938 – 940.
21. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Massage 1. Curvature of sheet // CIS Iron and Steel Review. 2016. Vol. 12. P. 37 – 40.
22. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Massage 2. Forces and moments // CIS Iron and Steel Review. 2016. Vol. 12. P. 40 – 44.
23. Shinkin V.N. Geometry of steel sheet in a seven-roller straightening machine // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 11. P. 776 – 780.
24. Shinkin V.N. Preliminary straightening of thick steel sheet in a seven-roller machine // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 12. P. 836 – 840.
25. Shinkin V.N. Calculation of technological parameters of O-forming press for manufacture of large-diameter steel pipes // CIS Iron and Steel Review. 2017. Vol. 13. P. 33 – 37.
26. Shinkin V.N. Mathematical model of technological parameters' calculation of flanging press and the formation criterion of corrugation defect of steel sheet's edge // CIS Iron and Steel Review. 2017. Vol. 13. P. 44 – 47.
27. Shinkin V.N. Asymmetric three-roller sheet-bending systems in steel-pipe production // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 4. P. 235 – 240.
28. Shinkin V.N. Failure of large-diameter steel pipe with rolling scabs // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 6. P. 363 – 368.
29. Lenard J.G. Metal Forming Science and Practice. – Elsevier Science, 2002. – 378 p.
30. Hingole R.S. Advances in metal forming. Expert system for metal forming. – Springer, 2015. – 116 p.
31. Qin Y. Micromanufacturing engineering and technology. – William Andrew, 2015. – 858 p.
32. Predeleanu M., Ghosh S.K. Materials processing defects. Vol. 43. – Elsevier Science, 1995. – 434 p.
33. Groshkova A.L., Polulyakh L.A., Travyanov A.Ya., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Phosphorus distribution between phases in

- smelting high-carbon ferromanganese in the blast furnace // *Steel in Translation*. 2007. Vol. 37. No. 11. P. 904 – 907.
34. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Production of generator gas from solid fuels // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 6. P. 395 – 402.
 35. Orelkina O.A., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Distribution of secondary gas emissions around steel plants // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 11. P. 811 – 814.
 36. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Manganese-ferroalloy production from Russian manganese ore // *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. No. 9. P. 617 – 624.
 37. Davim J.P. *Materials Forming and Machining*. Research and Development. – Woodhead Publishing, 2015. – 202 p.
 38. Lin J., Balint D., Pietrzyk M. Microstructure evolution in metal forming processes. – Woodhead Publishing, 2012. – 416 p.
 39. Rees D. Basic engineering plasticity. An introduction with engineering and manufacturing applications. – Butterworth-Heinemann, 2006. – 528 p.
 40. Banabic D. Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation. – Springer, 2010. – 301 p.

Поступила 31 августа 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 10, pp. 777–784.

SIMPLIFIED METHOD FOR CALCULATION OF BENDING MOMENTS OF STEEL SHEET AND REACTIONS OF WORKING ROLLERS IN MULTIROLL STRAIGHTENING MACHINE

V.N. Shinkin

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. The main task of the technology of the steel sheet flattening is to calculate the optimal reduction of a sheet billet by the working rollers of straightening machines so that the sheet at the outlet from the machine has the minimum residual stress and curvature. In the mathematical and numerical modeling of the steel sheet flattening process in the multiroll straightening machines, in the beginning we calculate the curvature and bending moments of the steel sheet at the points of the tangency with the machine’s working rollers, and then we calculate the energy-power parameters of the sheet’s flattening. The calculation of energy-power parameters of the multiroll sheet-straightening machines is an important technological estimation at the steel sheet’s flattening. The basis of energy-power calculation includes the estimation of the support reactions of working rollers and the efforts of upper and lower rollers’ cassettes of straightening machine at the sheet flattening. When there is an insufficient bending moment of steel sheet, it is impossible to eliminate the harmful residual stresses in the sheet wall and the surface defects of the sheet. If the force of the upper cassette rollers is insufficient, then to achieve the required reduction of the sheet for the quality flattening is impossible. The excessive values of the rollers’ torque moments and the efforts of rollers’ cassettes often lead to the sheet defects, breakage of the working and supporting rollers and breakage of whole sheet-straightening machine. The approximate method for determining the optimal technological parameters of steel sheet cold flattening on multiroll sheet-straightening machine is proposed in this paper. The calculations allow us to determine the type and curvature of neutral plane of the steel sheet under flattening, residual curvature of the sheet after flattening, sheet’s bending moments, support reactions of working rollers, residual stresses in the wall of the steel sheet, proportion of plastic deformation on the sheet thickness and the relative deformation of the longitudinal surface fibers of the sheet under the flattening depending on the rollers’ radius, the pitch between the straightening machines’ working rolls, magnitude of the sheet reduction by the upper rollers, the sheet thickness, as well as the elastic modulus, yield stress and hardening modulus of the sheet metal. The research results can be widely used at the engineering and metallurgical plants.

Keywords: steel sheet, multiroll sheet-straightening machines, working and support rollers, sheet’s curvature, alternating bending, sheet’s bending moments, elastoplastic continuous medium with linear hardening.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-777-784

REFERENCES

1. Korolev A.A. *Mekhanicheskoe oborudovanie prokatnykh i trubnykh tsekhov* [Mechanical equipment of rolling and pipe shops]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 480 p. (In Russ.)
2. Calladine C.R. *Plasticity for engineers. Theory and applications*. Woodhead Publishing, 2000, 328 p.
3. Chakrabarty J. *Theory of plasticity*. Butterworth-Heinemann, 2006, 896 p.
4. Bhattacharyya D. *Composite sheet forming*. Vol. 11. Elsevier Science, 1997, 530 p.
5. Predeleanu M., Gilormini P. *Advanced methods in materials processing defects*. Vol. 45. Elsevier Science, 1997, 422 p.
6. Abe T., Tsuruta T. *Advances in engineering plasticity and its applications (AEPA '96)*. Pergamon, 1996, 938 p.
7. Klocke F. *Manufacturing processes 4. Forming*. Springer, 2013, 516 p.
8. Kang S.-J. *Sintering. Densification, grain growth and microstructure*. Butterworth-Heinemann, 2004, 280 p.
9. Banabic D. *Multiscale modeling in sheet metal forming*. Springer, 2016, 405 p.
10. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. *Mechanics of sheet metal forming*. Butterworth-Heinemann, 2002, 211 p.
11. Belskii S.M., Yankova S., Mazur I.P., Stoyakin A.O. Influence of the transversal displacements of metal on the camber formation of hot-rolled strip. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 4, pp. 672–678.
12. Muhin U., Belskij S., Makarov E. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 305–311.
13. Muhin U., Belskij S., Makarov E. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 312–317.
14. Muhin U., Belskij S. Study of the influence between the strength of antibending of working rolls on the widening during hot rolling of thin sheet metal. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 318–324.
15. Mukhin Yu.A., Mazur I.P., Belskii S.M. Determining the boundaries of the St Venant zone for the self-balancing stress. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 9, pp. 733–736.
16. Mazur I.P., Belskii S.M. The St Venant zone extent of the self-balancing longitudinal elastic stress. *Materials Science Forum*. 2012, vol. 704-705, pp. 33–39.
17. Shabalov I.P., Solov'ev D.M., Filippov G.A., Livanova O.V. Influence of UO shaping on the mechanical properties of large-diameter electrowelded pipe. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 4, pp. 287–292.
18. Komkov N.A., Livanova O.V., Nikulin A.N., Filippov G.A. Manufacture of plane axisymmetric blanks by end rolling from round bar or thick-walled pipe. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 1, pp. 73–77.
19. Manzhurin I.P., Sidorina E.A. Determination of the reduction in the thickness of strip during its shaping in the rolls of a roll-forming machine. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11-12, pp. 941–945.

20. Punin V.I., Kokhan L.S., Morozov Yu.A. Reduction of the length of strip rolled on roll-forming machines. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11-12, pp. 938–940.
21. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Massage 1. Curvature of sheet. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 37–40.
22. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Massage 2. Forces and moments. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 40–44.
23. Shinkin V.N. Geometry of steel sheet in a seven-roller straightening machine. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 11, pp. 776–780.
24. Shinkin V.N. Preliminary straightening of thick steel sheet in a seven-roller machine. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 12, pp. 836–840.
25. Shinkin V.N. Calculation of technological parameters of O-forming press for manufacture of large-diameter steel pipes. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 13, pp. 33–37.
26. Shinkin V.N. Mathematical model of technological parameters' calculation of flanging press and the formation criterion of corrugation defect of steel sheet's edge. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 13, pp. 44–47.
27. Shinkin V.N. Asymmetric three-roller sheet-bending systems in steel-pipe production. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 4, pp. 235–240.
28. Shinkin V.N. Failure of large-diameter steel pipe with rolling scabs. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 6, pp. 363–368.
29. Lenard J.G. *Metal forming science and practice*. Elsevier Science, 2002, 378 p.
30. Hingole R.S. *Advances in metal forming. Expert system for metal forming*. Springer, 2015, 116 p.
31. Qin Y. *Micromanufacturing engineering and technology*. William Andrew, 2015, 858 p.
32. Predeleanu M., Ghosh S.K. *Materials processing defects*. Vol. 43. Elsevier Science, 1995, 434 p.
33. Groshkova A.L., Polulyakh L.A., Travyanov A.Ya., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Phosphorus distribution between phases in smelting high-carbon ferromanganese in the blast furnace. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 11, pp. 904–907.
34. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Production of generator gas from solid fuels. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 6, pp. 395–402.
35. Orelkina O.A., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Distribution of secondary gas emissions around steel plants. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 11, pp. 811–814.
36. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Manganese-ferroalloy production from Russian manganese ore. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 9, pp. 617–624.
37. Davim J.P. *Materials forming and machining. Research and development*. Woodhead Publishing, 2015, 202 p.
38. Lin J., Balint D., Pietrzyk M. *Microstructure evolution in metal forming processes*. Woodhead Publishing, 2012, 416 p.
39. Rees D. Basic engineering plasticity. *An introduction with engineering and manufacturing applications*. Butterworth-Heinemann, 2006, 528 p.
40. Banabic D. *Sheet metal forming processes. Constitutive modeling and numerical simulation*. Springer, 2010, 301 p.

Information about the author:

V.N. Shinkin, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Chair of Physics (shinkin-korolev@yandex.ru)

Received August 31, 2017