

мени становится невозможным, т. к. не ясно, как интерпретировать с физической точки зрения то или иное состояние.

Очевидно, при увеличении числа состояний автомата  $E$  качество работы системы будет только возрастать.

Реализованный программный модуль в совокупности с вышеописанным алгоритмом позволяют с высокой точностью смоделировать поведение числовых характеристик степени открытости глаза, и, как следствие, могут заменить проведение повторных экспериментов.

Применить модель с автоматом  $\mathfrak{Z}$ , у которого 4 состояния для распознавания морганий, не представляется эффективным из-за большого числа ошибок, выдаваемых автоматом.

Автор статьи выражает благодарность своему научному руководителю профессору Дмитрию Николаевичу Бабину и сотрудникам кафедры МАТИС механико-математического факультета МГУ Ивану Леонидовичу Мазуренко, Александру Борисовичу Холоденко за помощь и ценные советы, за работу, часть которой была освещена в этой статье.

#### Список литературы

1. Rabiner, L. Fundamentals of Speech Recognition / L. Rabiner, B.H. Juang. – Prentice Hall, 1995.
2. Huang, X. D. Hidden Markov Models for Speech Recognition / X. D. Huang, Y. Ariki, M. A. Jack. – Edinburgh University Press, 1990.
3. Manning, C. D. Foundations of Statistical Natural Language Processing / C. D. Manning, H. Schutze. – MIT Press, 1999.
4. ТИИЭР, 1985. – Т. 73. – № 11.
5. Бухараев, P. Г. Основы теории вероятностных автоматов, 1985.

УДК 621.771.09

*Б. Н. Поляков*, доктор технических наук, профессор  
Российский государственный профессионально-педагогический университет, г. Екатеринбург

#### К СОЗДАНИЮ САПР ТЕХНОЛОГИИ ПРАВКИ И ОБОРУДОВАНИЯ РОЛИКОПРАВИЛЬНЫХ МАШИН

*Предлагаются математическая модель и основные положения современной научной методологии расчета и оптимизации на ЭВМ технологического процесса деформации металла сортового (или листового) проката при правке на роликотправильной машине (РПМ). Приводятся некоторые результаты применения созданной методологии для условий производства рельсов на НТМК с целью совершенствования технологии и оптимизации режимов правки и обоснования конструктивных параметров РПМ с позиции минимума конечной кривизны и уровня остаточных напряжений.*

Заключительным этапом производства горячекатаных профилей является процесс правки. Данную технологию относят к числу отделочных операций основного производства. Необходимость правки объясняется тем, что во многих случаях предупредить искривление и нарушение требуемой формы изделия не удастся. Веро-

ятны также случаи, когда предупреждение искривлений принципиально возможно, но неэффективно по технико-экономическим соображениям. Известно, что правка оказывает большое влияние и на формирование потребительских свойств проката, таких как конечная кривизна и остаточные напряжения, которые, например, применительно к рельсам определяют их контактно-усталостные свойства, а следовательно, срок службы. Указанные обстоятельства делают правку одной из ответственных операций в технологии изготовления прокатных изделий.

Наиболее широко распространенным способом правки в настоящее время является правка знакопеременным упругопластическим изгибом на роликотправильных машинах (РПМ).

В данной статье показаны определяющие положения современной научной методологии\* расчета деформации металла при правке на РПМ и некоторые полученные на ее основе практические рекомендации [1]. Конкретные расчеты и сравнение с экспериментальными данными выполнены для правки рельсов в холодном состоянии на 6-роликовых РПМ Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК).

Правке на НТМК подвергают закаленные и незакаленные рельсы. Закаленные рельсы проходят последовательно правку в плоскостях максимальной и минимальной жесткости. Незакаленные рельсы правят лишь в плоскости максимальной жесткости.

Под настройкой РПМ понимают задание величин вертикальных перемещений роликов относительно «нулевого» положения. При различных отклонениях в физико-механических свойствах материала профиля (предел текучести, модуль упругости, структура и т. д.), при колебаниях начальной искривленности, биении бандажей и т. д. режимы настройки РПМ изменяются. Поэтому на практике для одинаковых профилей, изготовленных из одного и того же материала, но с различными свойствами, необходимо каждый раз подбирать настройку РПМ. Это связано со значительными затратами, т. к. при эмпирическом подборе настройки несколько профилей бракуются (правку в холодном состоянии можно проводить только один раз). Следовательно, возникает задача выбора рациональных режимов правки для различных профилей.

Также с учетом того, что живучесть рельса, его контактно-усталостные свойства в значительной степени определяются фоном, уровнем и распределением по сечению остаточных напряжений, необходимо, чтобы математическая постановка задачи обоснования режимов правки отражала и этот важный технологический фактор. Кроме того, на металлургических заводах, например на НТМК, сохраняется определенный уровень брака при правке, в частности, появляются трещины на рельсах и наблюдается их поломка, поэтому остается актуальной и экономически обоснованной задача дальнейшего совершенствования существующей технологии правки.

Перечисленные выше соображения приводят к необходимости создания современной математической модели процесса правки и разработки методики поиска оптимальных режимов процесса. В данном случае (при пренебрежении концевыми

---

\* Работа выполнялась сотрудниками инженерно-конструкторской лаборатории станов горячей прокатки НИИТяжмаша ОАО «Уралмаш» совместно с сотрудниками кафедры «Теоретической механики» Пермского государственного технического университета под руководством доктора технических наук, профессора Ю. И. Няшина. Автор выражает им искреннюю признательность и благодарность за многолетнее плодотворное творческое сотрудничество и дружеские взаимоотношения.

эффектами) задача исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе правки сводится к стационарной задаче упругопластичности. Следует особое внимание обратить на сложность создания современной методологии теоретического исследования НДС профиля при правке, идентификации граничных условий и исходных параметров процесса (с позиции минимума конечной кривизны и остаточных напряжений). Это усугубляется тем, что в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствует экспериментальная информация по дифференциальным характеристикам (изменение напряжений, деформаций, кривизны и т. п.), известны лишь единичные замеры интегральных параметров (изгибающих усилий, крутящих моментов и т. п.) процесса правки сортовых профилей.

Таким образом, цели теоретических исследований процесса правки сортовых профилей заключались в рационализации технологии и конструкций правильных машин, в оценке целесообразности их автоматизации. Для достижения этих целей была создана методика и программа расчета на ЭВМ НДС профилей в стационарной стадии процесса правки.

Исследованиям процесса правки сортовых профилей посвящено достаточно большое количество интересных теоретических и экспериментальных работ [2]. Необходимо отметить особую сложность теоретического описания процесса деформации металла при правке, связанную с решением соответствующей задачи механики деформируемого твердого тела. Поэтому обычно это вынуждает исследователей принимать различные упрощения, часто довольно грубые, существенно влияющие на результаты, что и содержится во многих ранее выполненных теоретических разработках [2]. Ниже предлагается новая постановка задачи исследования НДС металла при правке на РПМ, позволяющая избежать некоторых существенных недостатков.

Исследование НДС сводится в данном случае к решению объемной стационарной изотермической задачи упругопластичности. При постановке задачи здесь и далее будем использовать прямоугольные декартовы системы координат, а также соглашение о суммировании по повторяющимся индексам (правило Эйнштейна). Индекс после запятой означает дифференцирование по соответствующей координате.

Обозначим исследуемую область через  $\Omega$ , ее границу через  $S$ . Предположим, что на части границы  $S_u$  заданы перемещения, на части  $S_p$  – усилия. Объединение области  $\Omega$  и границы  $S$  обозначим как  $\bar{\Omega}$ . Задача заключается в определении перемещений, напряжений и деформаций в области  $\Omega$ .

В систему уравнений, записанную для удобства последующего решения в приращениях, входят [3]:

- уравнения равновесия  $d\sigma_{ij,j} + dF_i = 0, \quad \tilde{x} \in \Omega; \quad i = \overline{1,3};$  (1)

- определяющие уравнения, объединяющие теории упругости и пластического течения:

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} d\varepsilon_{kl}, \quad \tilde{x} \in \bar{\Omega}; \quad i = \overline{1,3};$$
 (2)

- геометрические соотношения

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^l + d\varepsilon_{ij}^p = \frac{1}{2}(dU_{ij} + dU_{ji}), \quad \tilde{x} \in \Omega; \quad i, j = \overline{1,3}.$$
 (3)

Начальные условия (задача – стационарна, однако нужно задать условия на поверхности  $\Gamma$  входа частиц металла в область  $\Omega$ ):

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0, \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^0, \quad U_i = U_i^0, \quad \tilde{x} \in \Gamma; \quad i, j = \overline{1,3}. \quad (4)$$

Граничные условия:

$$dU_i = d\widehat{U}_i, \quad \tilde{x} \in S_u; \quad i = \overline{1,3}; \quad (5)$$

$$d\sigma_{ij} n_j = d\widehat{P}_i, \quad \tilde{x} \in S_p; \quad i = \overline{1,3}. \quad (6)$$

В уравнениях (1)–(6) приняты следующие обозначения:  $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$  – компоненты тензоров напряжений и деформаций;  $U_i, F_i, P_i$  – компоненты тензоров перемещений, массовых сил и поверхностных нагрузок;  $d\sigma_{ij} = D_{ijkl} d\varepsilon_{kl}$ ,  $\tilde{x} \in \overline{\Omega}$ ,  $i = \overline{1,3}$  – компоненты четырехвалентного тензора упругопластических свойств;  $n_j$  – направляющие косинусы внешней нормали к поверхности; индексы  $l$  и  $p$  в уравнении (3) и далее относятся к упругим и пластическим деформациям.

Перемещения  $\widehat{U}$  отсчитываются от недеформированного состояния. Однако в рамках геометрически линейной теории их можно отсчитывать и от значений  $\widehat{U}^0$  на границе  $\Gamma$  (4).

Для определения остаточных напряжений может быть использована теорема о разгрузке в изотермических условиях [4], в том числе в случае появления вторичных пластических деформаций [5]. При использовании теоремы предполагается, что разгрузка начинается во всех точках области одновременно, что в практических задачах редко имеет место. В общем случае произвольного НДС аналогичные теоремы отсутствуют, в силу чего остаточные напряжения будем находить с помощью решения задачи упругопластичности, соответствующей полному снятию силовой нагрузки.

Аналитическое решение поставленной задачи (1)–(6) представляет значительные математические трудности, а ее численное решение требует большого количества машинного времени и значительного объема памяти ЭВМ. Поэтому несколько изменим постановку задачи.

Введем неподвижную систему отсчета  $Ox_1x_2x_3$  и движущуюся как жесткое целое систему координат  $O_1\xi_1\xi_2\xi_3$  (рис. 1). Начало системы  $O_1\xi_1\xi_2\xi_3$  находится в центре тяжести рассматриваемого сечения, причем оси  $O_1\xi_1\xi_2\xi_3$  и  $O_1\xi_1\xi_2\xi_3$  лежат в плоскости поперечного сечения и система  $O_1\xi_1\xi_2\xi_3$  движется как жесткое целое так, что одна из осей ( $O_1\xi_1\xi_2\xi_3$  или  $O_1\xi_1\xi_2\xi_3$ ) остается параллельной оси  $Ox_1$  (при изгибе в плоскости  $Ox_2x_3$ ) или  $Ox_2$  (при изгибе в плоскости  $Ox_1x_3$ ).

Для определенности изложения будем считать, что изгиб происходит в плоскости  $Ox_2x_3$ . Для учета истории нагружения необходимо ввести также сопутствующую лагранжеву систему координат  $O_1\xi_1\xi_2\xi_3$  (для индивидуализации частиц сплошной среды).

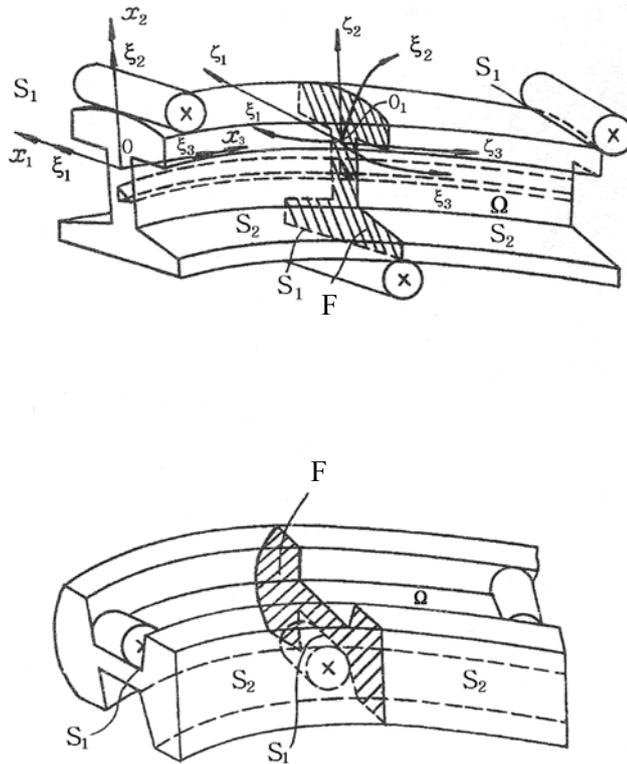


Рис. 1. Неподвижная система отсчета  $0x_1x_2x_3$  и движущаяся система координат  $0\xi_1\xi_2\xi_3$ , границы исследуемой области  $S_u$

Будем считать, что углы поворота при правке малы. В силу этого систему  $0_1\xi_1\xi_2\xi_3$  можно было бы не вводить, а изложение методики вести в системе  $0x_1x_2x_3$ .

Воспользуемся гипотезой плоских сечений, согласно которой (при изгибе в плоскости  $0x_2x_3$ ) продольная деформация  $\epsilon_{33}$  любого волокна равна

$$\epsilon_{33} = a_0 + a_2\xi_2, \quad (7)$$

где  $a_0$  – продольная деформация линии центров тяжести.

Величина  $a_2$  с точностью до знака равна кривизне проекции линии центров тяжести на плоскость изгиба  $0x_2x_3$  (рис. 1) [6]:

$$a_2 = -\kappa_2. \quad (8)$$

Найдем приращение продольной деформации  $\Delta\epsilon_{33}$  для любой точки поперечного сечения профиля:

$$\Delta\epsilon_{33} = -\xi_2\Delta\kappa_2 + \Delta a_0. \quad (9)$$

Из гипотезы плоских сечений следует

$$\Delta \varepsilon_{13} = \Delta \varepsilon_{23} = 0. \quad (10)$$

Введем предположение

$$\Delta \sigma_{13} = \Delta \sigma_{23} = 0. \quad (11)$$

Запишем определяющее соотношение для  $\Delta \sigma_{33}$ :

$$\Delta \sigma_{33} = D_{33ij} \Delta \varepsilon_{ij}, \quad i, j = \overline{1, 3}. \quad (12)$$

Соотношение (12) можно записать в виде

$$\Delta \sigma_{33} = D_{3333} \Delta \varepsilon_{33} + \Delta \sigma'_{33}, \quad (13)$$

где  $\Delta \sigma'_{33} = D_{33ij} \Delta \varepsilon_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, 2}$ .

Отметим, что  $\Delta \sigma_{33}$  удовлетворяет следующим интегральным уравнениям равновесия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_F \Delta \sigma_{33} \xi_2 dF = -\Delta M_2, \\ \int_F \Delta \sigma_{33} dF = 0. \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_F \Delta \sigma_{33} dF = 0. \end{array} \right. \quad (15)$$

При малых изгибах можно записать

$$\kappa_2 = \frac{d^2 U}{dx^2}, \quad (16)$$

где  $U$  – поперечное перемещение центра тяжести сечения.

Граничные условия имеют вид

$$U_i = \hat{U}_i, \quad \tilde{x} \in S_u; \quad M_2^0 = M_2^N = 0, \quad (17)$$

где  $U_i$  – заданные перемещения роликов РПМ;  $M_2^0$  и  $M_2^N$  – изгибающие моменты на первом и последнем роликах РПМ соответственно.

К граничным условиям необходимо также добавить условия сопряжения на промежуточных роликах РПМ [1].

Теперь при известных  $D_{33kl}$  и  $\Delta \varepsilon_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, 2}$ ) можно определить из решения задачи (9)–(17)  $\Delta \varepsilon_{33}$  и  $\Delta \sigma_{33}$ .

С другой стороны, при выполнении предположений (10) и (11) краевая задача (1)–(6) для определения НДС в области поперечного сечения  $F$  принимает следующий вид:

$$\Delta \sigma_{ij,j} + \Delta F_i = 0, \quad \tilde{x} \in F; \quad i, j = \overline{1, 2}; \quad (18)$$

$$\Delta \sigma_{ij} = D_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} + D_{ij33} \Delta \varepsilon_{33}, \quad \tilde{x} \in F; \quad i, j, k, l = \overline{1, 2}; \quad (19)$$

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^l + \Delta \varepsilon_{ij}^p = \frac{1}{2}(\Delta U_{ij} + \Delta U_{ji}), \quad \tilde{x} \in F; \quad i, j = \overline{1, 2}; \quad (20)$$

$$\Delta U_i = \Delta \hat{U}_i, \quad \tilde{x} \in S_u; \quad \Delta \sigma_{ij} n_j = \Delta \hat{P}_i, \quad \tilde{x} \in S_p; \quad i = \overline{1, 2}. \quad (21)$$

Таким образом, при принятых предположениях исходная задача (1)–(6) сводится к решению системы уравнений (9)–(21). Обращаем внимание, что ее можно «расщепить» на две связанные между собой задачи. Первая задача (назовем ее задачей *A*) описывает задачу изгиба профиля при учете поперечных напряжений и деформаций. Она сводится к решению системы уравнений (9)–(17). Вторая задача (задача *B*) описывает исследование НДС частиц элементов поперечного сечения профиля при их движении по линиям тока в процессе правки на РПМ, с учетом продольных напряжений и деформаций, и сводится к решению системы уравнений (18)–(21). Для решения задачи (18)–(21) используется алгоритм, подробно описанный в работе [3].

Совокупность задач *A* и *B* позволяет решить задачу правки. При решении задачи не учитываются контактные напряжения и вся поверхность (граничные условия для задачи *B*) считается свободной, т. к. это воздействие носит локальный характер (хотя контактные напряжения возникают в области максимальных пластических деформаций) и вследствие принципа Сен-Венана не внесет существенного изменения в результаты расчета НДС. Задача исследования НДС при правке является прямой задачей для задачи выбора рациональных режимов РПМ (задачи оптимизации). Реализация решения задачи упругопластического знакопеременного изгиба требует значительного времени счета даже на современных ЭВМ. Это неприемлемо для задачи оптимизации, которая требует многократного решения прямой задачи. В то же время результаты расчета по приведенной методике показывают, что компоненты тензора напряжений (за исключением продольной) почти во всех точках поперечного сечения, исключая область контакта, существенно меньше  $\sigma_{33}$ . Это свидетельствует о возможности использования схемы одноосного напряженного состояния (все компоненты напряжений, за исключением продольной, полагаются равными нулю).

Физические уравнения в этом случае примут вид

$$\Delta \sigma_{33} = D^* \Delta \varepsilon_{33}, \quad (22)$$

где  $D^*$  – секущий модуль [1];  $\Delta \sigma_{33}$  – приращение продольного напряжения в исследуемой точке поперечного сечения профиля.

Дифференциальное уравнение изогнутой линии центров тяжести получаем подстановкой, в частности, уравнения (22) в (14) и (15):

$$\frac{d^2 x_{C_2}^{(n)}}{dx_3^{(n)2}} = \frac{\Delta a_0 \int_F D^* \xi_2 dF + \kappa_2^0 \int_F D^* \xi_2 dF + \Delta M_2}{\int_F D^* \xi_2^2 dF}. \quad (23)$$

При рассмотрении знакопеременного упругопластического изгиба необходимо учесть эффект Баушингера. В данной работе эффект учитывался путем использования принципа Мазинга, согласно которому кривая повторного знакопеременного напряжения совпадает с соответствующей кривой при первом нагружении, построенной в осях с удвоенным масштабом и обратным направлением (рис. 2).

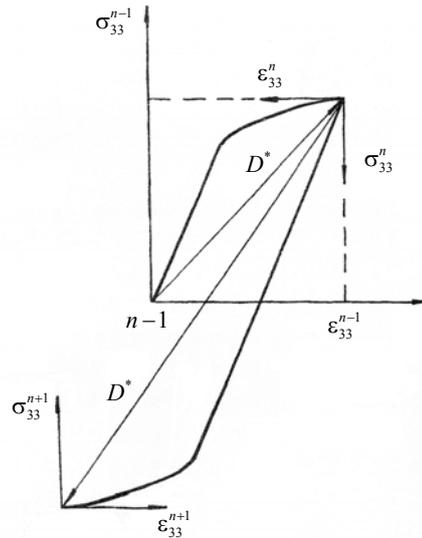


Рис. 2. Поведение кривой  $\sigma_{33} - \epsilon_{33}$  при циклическом нагружении

Если при первом нагружении были достигнуты напряжения и деформации  $\epsilon_{33}^n$ , то при повторном нагружении в обратном направлении предел текучести определяется параметрами  $\sigma_s^{n+1}$ ,  $\epsilon_s^{n+1}$ , удовлетворяющими уравнениям:

при наличии вторичных пластических деформаций

$$|\sigma_{33}^n - \sigma_s^{n+1}| = 2\Phi\left(\frac{\epsilon_{33}^n - \epsilon_{33}^{n+1}}{2}\right); \quad (24)$$

при упругой разгрузке

$$|\sigma_{33}^n - \sigma_s^{n+1}| = 2\Phi\left(\frac{\epsilon_{33}^n - \epsilon_{33}^{n+1}}{2}\right). \quad (25)$$

Поскольку  $\sigma_s^n = E\epsilon_s = \Phi(\epsilon_s)$ , то

$$\sigma_s^{n+1} = \sigma_{33}^n - 2\sigma_s^n, \quad \epsilon_s^{n+1} = \epsilon_{33}^n - 2\epsilon_s^n. \quad (26)$$

Отсюда следует

$$-\sigma_s^{n+1} < \sigma_s^n, \quad (27)$$

поскольку  $\sigma_{33}^n > \sigma_s^n$ . Таким образом, принцип Мазинга учитывает эффект Баушингера. В случае квазиобъемной постановки вместо  $\sigma_{33}, \epsilon_{33}$  необходимо брать  $\epsilon_u, \sigma_u$ .

Для получения кривой деформационного упрочнения  $\sigma_{33} = f(\gamma_{33})$  для термоупрочненных рельсов производства НТМК были выполнены экспериментальные ра-

боты [1]. Эксперименты проводились на растяжение и сжатие, и зависимость  $\sigma_{33} = f(\gamma_{33})$  была получена в виде

$$\sigma_{33} = k_1 \varepsilon_{33}^{k_2}. \quad (28)$$

Предел текучести при сжатии (повторное нагружение) был определен согласно принципу Мазинга.

Для решения задачи оптимизации режимов правки на основе представленной математической модели применен метод штрафных функций [1]. Здесь в качестве целевой функции используется конечная искривленность профиля. В вектор управления  $\vec{U}$  вошли перемещения роликов РПМ, а ограничения на эти перемещения формируют соотношения типа неравенств

$$|U_i| \leq |\bar{U}_i|. \quad (29)$$

В качестве дифференциальных связей выступают уравнения краевой задачи упругопластичности (9)–(21). Целевая функция при использовании метода штрафных функций записывается в виде

$$I_1(\vec{U}, \vec{V}) = \kappa_{\text{кон}}(\vec{U}, \vec{V}) + k_1 \sum_{i=1}^N U_i^2 \delta_i, \quad (30)$$

где  $\kappa_{\text{кон}}(\vec{U}, \vec{V})$  – конечная искривленность профиля;  $\delta_i$  – весовые коэффициенты;

$k_1$  – коэффициент штрафа,  $k_1 = \begin{cases} 0, & \text{при выполнении условия (29),} \\ +\infty, & \text{если условие (29) не выполняется.} \end{cases}$

Для решения поставленной задачи применен метод безусловной оптимизации – метод деформируемого многогранника Нелдера–Мида [1].

Оценка достоверности вышеприведенной математической модели НДС профиля при правке на РПМ была выполнена на основе решения ряда тестовых задач. В частности, для проверки упругого решения методом Верещагина был рассчитан изгиб профиля прямоугольного сечения на семи роликах РПМ. Результаты расчета интегральных характеристик процесса по квазиобъемной и стержневой методикам сопоставлены с известными экспериментальными данными. Также обоснована степень полинома, аппроксимирующего радиус искривленности профиля на пролете РПМ [2].

На основе разработанной современной научной методологии исследования и оптимизации НДС профиля в процессе знакопеременного изгиба создана программа расчета на ПЭВМ дифференциальных и интегральных параметров технологии правки на РПМ рельсов и других фасонных профилей. Программа позволяет вычислить компоненты векторов перемещений, тензоров напряжений и деформаций и их распределение в любой точке подвергаемого правке профиля; распределение по роликам усилий, изгибающих и крутящих моментов, мощностей; распределение остаточных напряжений и величины конечной кривизны. Исходными данными для программы являются: взаимное расположение роликов РПМ (настройка), шаг и диаметр роликов, конфигурация и исходная величина кривизны выправляемого профиля, предел текучести и форма кривой деформационного упрочнения материала профиля.

Применение программы позволяет с достаточной степенью точности определить рациональную настройку роликов, обеспечивающую минимальную остаточную кривизну, рассчитать интегральные характеристики режима правки, сократить трудозатраты на выбор параметров настройки, исключить проведение трудоемких ручных расчетов технологических и энергосиловых параметров РПМ. Программа применялась для обоснования правки двутавровых и рельсовых профилей и конструктивных параметров РПМ при их проектировании для металлургических предприятий ряда зарубежных государств [1; 2].

С помощью программы на ЭВМ выполнены численные и параметрические исследования некоторых аспектов применяемых на НТМК технологий правки «сырых» (незакаленных) и термоупрочненных рельсов Р65, в результате которых предложен ряд технологических и конструктивных рекомендаций. Наиболее важны из них следующие:

1. Нецелесообразно уменьшение применяемых в настоящее время в конструкциях РПМ величин шагов и диаметров роликов, т. к. это отрицательно повлияет на формирование остаточных напряжений.

2. В противовес вынужденно применяемым (для уменьшения разброса конечных кривизн) «жестким» режимам правки (со степенями деформации более 1,0 %), которые хотя и позволяют достичь большей прямолинейности, но обладают рядом существенных недостатков, а именно: повышают неоднородность деформации, что способствует формированию худшей картины распределения остаточных напряжений, приводят к возникновению значительной разницы в поперечных размерах между направляющимися концами и правленной частью рельса, а также к образованию и развитию трещин, а иногда и к разрушению по имеющимся дефектам поверхности, предложены «мягкие», щадящие режимы (максимальные деформации на уровне 0,5–0,6 %), которые уменьшают поврежденность металла, т. е. повышают служебные свойства рельсов, сокращают вероятность поломок при правке, что в конечном итоге положительно отражается на живучести и сроке службы рельсов.

3. Целесообразен переход к технологии правки как минимум на 8-роликовых РПМ, которые за счет большего количества упругопластических перегибов (в сравнении с 6-роликовыми) формируют условия меньшей чувствительности остаточной (конечной) кривизны к колебаниям размеров поперечного сечения рельса, механических свойств (предела текучести) его материала и погрешностям настройки. При этом за счет применения «мягких» режимов можно дополнительно снизить нагруженность подшипниковых узлов, оборудования и приводов, например по моментам изгиба и усилиям правки – на 21 % (рис. 3), и уменьшить поврежденность металла (рис. 4).

Рекомендация о количестве роликов в конструкции РПМ удачно корреспондируется с параметрами правильных машин, применяемых на новом (июнь 2002 г.) рельсoproкатном стане фирмы Steel DYNAMICS, INC (SDI, Columbia City, USA), где горизонтальная машина имеет 9 роликов диаметром 1060 мм, а вертикальная – 7 роликов диаметром 750 мм.

4. Решение задач оптимизации технологии правки показало, что полученный рациональный режим правки «сырого» рельса Р65 наиболее близок к режиму, применяемому в настоящее время в рельсобалочном цехе НТМК (что дополнительно подтверждает достоверность методики и результатов), а оптимальный режим правки термоупрочненного рельса в плоскости максимальной жесткости позволяет уменьшить конечную кривизну (в сравнении с действующим) примерно в 25 раз [2].

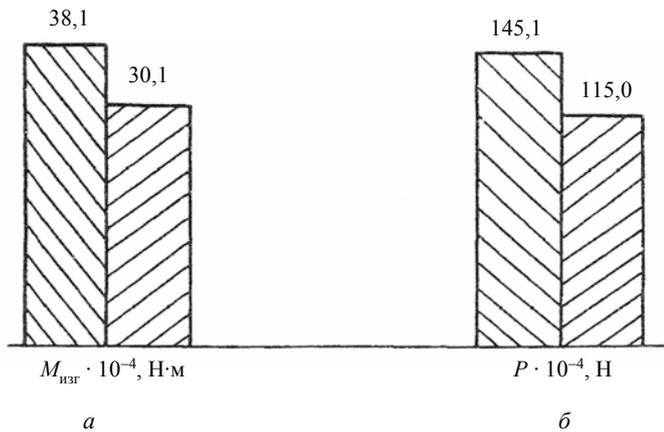


Рис. 3. Снижение средних величин изгибающих моментов (а) и усилий (б) при правке на 8-роликовых РПМ:

▨ – жесткие режимы деформирования; ▩ – легкие режимы деформирования

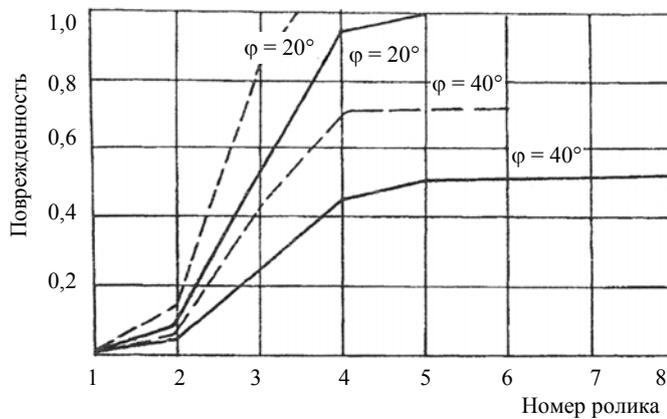


Рис. 4. Накопление поврежденности при правке

(φ – угол исходного поверхностного дефекта):

--- на 6-роликовой РПМ; — на 8-роликовой РПМ

5. Доказано, что заметное изменение остаточной кривизны рельса и остаточных напряжений происходит уже при отклонении роликов от заданного положения на 0,1...0,2 мм (т. е. имеет место высокая чувствительность потребительских свойств проката к конструктивным параметрам правильных машин), поэтому точность настройки, формируемая точностью перемещения роликов, величинами биения бандажей и люфтов в подвижных частях и жесткостью конструкции, должна обеспечиваться конструкцией РПМ, а определяющие величины должны находиться в следующих пределах: точность перемещения роликов и биение бандажей должны быть не более 0,1...0,2 мм, суммарный люфт – не более 0,5 мм, а жесткость РПМ – не менее 2000 кН/мм. Кроме того, с целью эффективного управления остаточными напряжениями в правящемся профиле целесообразно перейти от настройки РПМ

по перемещениям роликов к настройке по напряжениям (по усилиям на ролика), предусмотрев в конструкции РПМ установку датчиков давления на каждом ролике.

6. Показана целесообразность автоматизации правильного комплекса и предложен состав автоматических систем контроля и микропроцессорного программного управления [2].

В современных сложных экономических условиях для обеспечения конкурентоспособности рельсов и других профилей проката (а это абсолютно реально) целесообразно продолжить работу по совершенствованию технологии правки и оборудования, а также внедрению автоматических систем с учетом вышеприведенных результатов.

#### Список литературы

1. Поляков, Б. Н. К созданию САПР роликотправильных машин / Б. Н. Поляков, Ю. И. Няшин // САПР в тяжелом машиностроении : сб. науч. тр. ; под ред. Б. Н. Полякова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2000. – С. 45–68.
2. Обследование нагруженности механического оборудования УБС НТМК. Совершенствование технологии и оборудования для правки рельсов тяжелых типов и балочных профилей. Исследование процесса правки сложных профилей на роликотправильных машинах и термомеханической правки растяжением : отчет по НИР / Науч.-исслед. конструкт.-технол. ин-т тяжелого машиностроения (НИИтяжмаш ) ; под рук. Б. Н. Полякова, Ю. Д. Макарова. – Свердловск, 1985. – Т. 3. – 79 с.
3. Поздеев, А. А. Остаточные напряжения: теория и приложения / А. А. Поздеев, Ю. И. Няшин, П. В. Трусов. – М. : Наука, 1982. – 112 с.
4. Ильюшин, А. А. Пластичность : в 3 ч. Ч. 1 : Упругопластические деформации. – М.; Л. : Гостехиздат, 1948. – 376 с.
5. Москвитин, В. В. Циклические нагружения элементов конструкции. – М. : Наука, 1982. – 394 с.
6. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. – М. : Наука, 1979. – 744 с.

УДК 519.87

*А. В. Чиркова*, аспирант

Ижевский государственный технический университет

#### МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИЙ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ С ВЕЩЕСТВЕННЫМ КОДИРОВАНИЕМ

*Рассмотрен метод решения задач многокритериальной оптимизации для функций большой размерности на основе генетического алгоритма с вещественным кодированием. Выявлено влияние параметров генетического алгоритма на скорость сходимости к глобальному экстремуму. Рассмотрена возможность решения задач с несколькими критериями без использования дополнительных оценок важности. Данный метод работает с критериями различной природы и не требует дополнительной сопоставимости критериев.*

Достаточно часто в реальных ситуациях качество эксплуатации исследуемого объекта или системы оценивается не единственным критерием или показателем качества, а совокупностью таких критериев, причем представляющихся одинаково