

УДК 621.771.014

ИЗУЧЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ НА РОЛИКОПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ¹

©2023 г. А.Е. Шелест, В.С. Юсупов, С.О. Рогачев, В.А. Андреев,
Р.Д. Карелин, М.М. Перкас

ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва
E-mail: shelest99@mail.ru; rdkarelin@gmail.com

Поступила в редакцию 13 сентября 2022 г.

После доработки 30 сентября 2022 г. принята к публикации 6 октября 2022 г.

Единственная возможность повышения воздействия упругопластического знакопеременного изгиба на свойства и структуру металлических материалов — выход за пределы минимального входного зазора, задаваемого номограммой производителей прецизионной роликоправильной машины EcoMaster[®]25. Анализ положения рабочих роликов при их взаимном касании и после образования зазора между ними показал, что в пределах уменьшения входного зазора на 30 % от заданной номограммой границы сохраняются возможности реализации процесса правки. Построены аналитические зависимости для определения входного зазора при любых значениях толщины полос или листов в интервале от 1 до 3 мм, в котором особенно эффективно проявление суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций. Доказана аддитивность этой меры деформационного воздействия на металлические материалы (наряду с интенсивностью главных истинных деформаций), что позволяет считать ее мерой накопленной деформации.

Ключевые слова: упругопластическая деформация; знакопеременный изгиб; входной зазор; толщина полосы; суммарная эквивалентная интенсивность главных истинных деформаций.

Одним из показателей качества листов и лент из разных металлов и сплавов является их планшетность — характеристика плоской поверхности, выраженная в отсутствии коробоватости и/или волнистости [1, с.50]. В соответствующих стандартах, относящихся к сортаменту горяче- и холоднокатаных листов, формулируются количественные требования к указанной характеристике, называемой плоскостностью [2,3]. Для удовлетворения этих требований листы и ленты подвергаются операции упругопластического знакопеременного изгиба на роликоправильных машинах [4—6]. Как показала практика, такой вид обработки не только придает продукции нужную форму, но и в ряде случаев оказывает существенное влияние на ее структуру и механические свойства [7—11].

В технической документации к каждой роликоправильной машине приводятся рекомендации по выбору интервала изменения входного зазора в зависимости от толщины листов и лент. В результате расчетов геометрических и деформационных параметров правки показано, что с уменьшением входного зазора при постоянной толщине листов и полос возрастает их упрочнение [12]. Таким образом, появляется необходимость оценки деформации при уменьшении входного зазора ниже границы, указанной в технической документации, с целью выявления дополнительной возможности воздействия упругопластического знакопеременного изгиба на свойства металлических материалов при их обработке на роликоправильной машине. Одновременно возникает необходимость проверки аддитивности интенсивности главных истинных деформаций для обоснования использования операции суммиро-

¹Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ РАН № 075-00715-22-00 на 2022 г.

вания для объективного определения величины пластической деформации при изгибе.

Результаты решения сформулированных выше задач излагаются в данной публикации.

Материалы и методика расчетов. Все расчеты выполнены с учетом технических характеристик прецизионной роlikоправильной машины EcoMaster®25, предназначенной для правки листов шириной до 800 мм при толщине от 0,25 до 3 мм [13]. В документации на машину в виде номограммы приводятся кривые зависимости рекомендованных максимального (G_{max}) и минимального (G_{min}) входных зазоров от толщины (H) обрабатываемых листов. В результате статистической обработки получены аналитические представления этих кривых в виде регрессионных уравнений. Для максимального входного зазора:

$$G_{max} = -1,769 + 2,252H^{0,6082}. \quad (1)$$

Для минимального входного зазора:

$$G_{min} = -3,083 + 2,692H^{0,6646}. \quad (2)$$

Было решено рассмотреть варианты уменьшения рекомендуемого номограммой минимального входного зазора G_{min} на 10, 20 и 30 %. В результате получены значения исходных данных для расчетов геометрических и деформационных параметров правки, относящихся к листам толщиной 0,25; 1; 2 и 3 мм, приведенные в табл. 1. В эту таблицу добавлено также среднее значение входного зазора $0,5(G_{max} + G_{min})$, а вычисления остальных значений входных зазоров выпол-

нены с учетом следующих условий, соответствующих указанным выше вариантам:

$$1) \text{ при } G_{min} > 0 \quad G_{min1} = 0,9 G_{min}, \\ G_{min2} = 0,8 G_{min}, \quad G_{min3} = 0,7 G_{min};$$

$$2) \text{ при } G_{min} < 0 \quad G_{min1} = 1,1 G_{min}, \\ G_{min2} = 1,2 G_{min}, \quad G_{min3} = 1,3 G_{min};$$

Из данных табл. 1 следует, что получено 24 варианта расчетов геометрических и деформационных условий изгиба.

Необходимо также отметить, что предел уменьшения входного зазора соответствует моменту начала взаимного соприкосновения роликков верхнего и нижнего рядов, расположенных один относительно другого в шахматном порядке. Такая картина воспроизведена на фиг. 1. Для определения величины входного зазора в случае взаимного контакта (касания) верхних и нижних роликков воспользуемся следующими данными из приведенной схемы: $ac = D$; $ab = 0,5L$; $bc = \sqrt{ac^2 - ab^2} = \sqrt{D^2 - (0,5L)^2}$; $bd = 0,5bc$; $G = mn = 2md = 2(0,5D - 0,5bc)$. Учитывая, что в рассматриваемом случае входной зазор является отрицательной величиной, окончательно получаем:

$$G = \sqrt{D^2 - (0,5L)^2} - D. \quad (3)$$

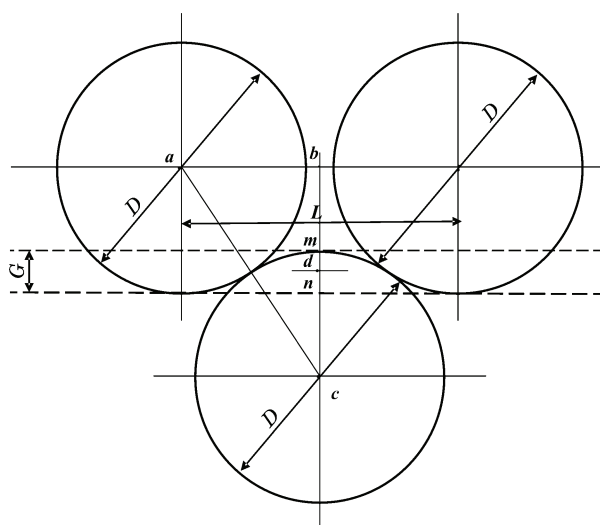
У роlikоправильной машины EcoMaster®25 $D = 25$ мм и $L = 28$ мм. В условиях взаимного контакта (касания) верхних и нижних роликков входной зазор, вычисленный по соотношению (3), составит $G = -4,29$ мм. Естественно, при таком положении роликков ни

Таблица 1

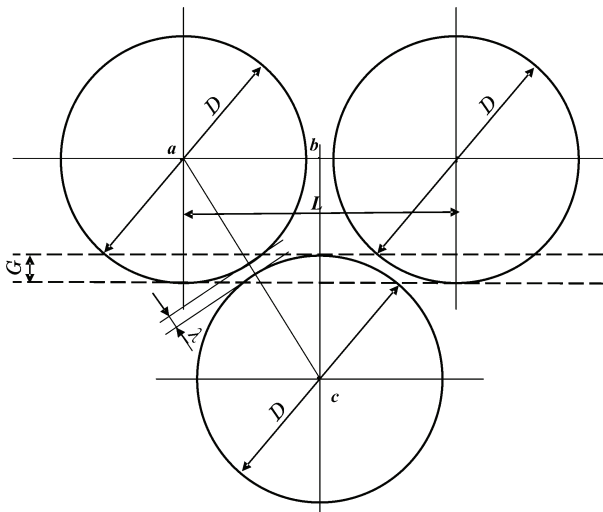
Значения входного зазора при обработке полос на роlikоправильной машине EcoMaster®25 для расчета геометрических и деформационных характеристик знакопеременного упругопластического изгиба

| Входной зазор* | Значения входного зазора для полосы толщиной H , мм | | | |
|--------------------------|---|-------|--------|--------|
| | 3 | 2 | 1 | 0,25 |
| G_{max} | 2,624 | 1,664 | 0,483 | -0,800 |
| $0,5(G_{max} + G_{min})$ | 2,564 | 1,419 | 0,046 | -1,411 |
| G_{min} | 2,504 | 1,174 | -0,391 | -2,022 |
| G_{min1} | 2,254 | 1,057 | -0,430 | -2,224 |
| G_{min2} | 2,003 | 0,939 | -0,469 | -2,426 |
| G_{min3} | 1,753 | 0,822 | -0,508 | -2,628 |

*Значения определяются с учетом указанных в тексте правил.



Фиг. 1. Схема к определению величины предполагаемого входного зазора в случае взаимного контакта (касания) верхних и нижних роликков



Фиг. 2. Схема к определению величины минимального расстояния λ между верхними и нижними роликами при известном значении входного зазора G

о каком процессе правки не может быть и речи, так как для его осуществления между роликами должен быть зазор, обеспечивающий захват ими полосы и выполнение последовательности операций изгиба. С целью определения минимального расстояния λ между роликами по выбранному значению входного зазора G рассмотрим положение роликов, показанное на фиг. 2. Из сравнения фиг. 2 и 1 следует, что в прямоугольном треугольнике abc неизменным остается только катет $ab = 0,5 L$, а второй катет и гипотенуза изменяются. С учетом знака величины входного зазора G $bc = 2(0,5 D + 0,5 G) = D + G$, а $ac = \sqrt{(ab)^2 + (bc)^2} = \sqrt{(0,5L)^2 + (D + G)^2}$. Минимальное расстояние между поверхностями роликов определяется соотношением $\lambda = ac - D$, или

$$\lambda = \sqrt{(0,5L)^2 + (D + G)^2} - D. \quad (4)$$

Минимальный входной зазор в табл. 1 относится к полосе толщиной 0,25 мм и составляет -2,628 мм. Для этого значения минимального входного зазора в соответствии с соотношением (4) получено минимальное расстояние между верхними и нижними роликами $\lambda = 1,39$ мм. Аналогично получаем для полосы толщиной 1 мм $\lambda = 3,21$ мм, для полосы толщиной 2,0 мм $\lambda = 4,37$ мм и для полосы толщиной 3,0 мм $\lambda = 5,19$ мм. Такие минимальные расстояния между верхними и нижними роликами обеспечивают надежное выполнение операций упругопластического знакопеременного изгиба при

правке полос толщиной от 0,25 до 3,0 мм на роликоправильной машине EcoMaster®25.

Теперь можно перейти к рассмотрению поставленной задачи относительно аддитивности показателя интенсивности главных истинных деформаций. При правке листов и полос металлических материалов на роликоправильной машине происходит знакопеременный изгиб с уменьшающейся кривизной, т.е. при оценке накапливающейся деформации необходимо использовать величины, обладающие свойством аддитивности. Этому требованию отвечают истинные или логарифмические деформации, которые по определению являются аддитивными показателями [14]. Указанные деформации, ориентированные в направлениях главных осей, называются главными истинными деформациями, а их индексация выполняется по правилу $e_1 \geq e_2 \geq e_3$. Сумма главных истинных деформаций представляет собой первый инвариант тензора этих деформаций и она равна нулю в силу закона постоянства объема при пластической деформации. Второй инвариант указанного тензора называется интенсивностью главных истинных деформаций, он обозначается e_i и определяется следующим соотношением

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}. \quad (5)$$

В принципе величина e_i может служить интегральной оценкой воздействия главных истинных напряжений на структуру и свойства металла при трехосном формоизменении, если будет показана ее аддитивность.

Проверку аддитивности e_i осуществим на конкретных числовых примерах. Пусть главные истинные деформации при первой операции формоизменения тела (осадка) имели значения $e_1 = 0,2$; $e_2 = 0,1$; $e_3 = -0,3$. Тогда в соответствии с соотношением (5) интенсивность главных истинных деформаций $e_{i1} = 0,3050$. Предположим, что при второй операции формоизменения (также осадка) величины главных истинных деформаций составляют: $e_1 = 0,3$; $e_2 = 0,2$; $e_3 = -0,5$. В этой операции интенсивность главных истинных деформаций будет равна $e_{i2} = 0,5033$. В результате объединения двух операций в силу аддитивности главных истинных деформаций они будут суммироваться, т.е. получим $e_1 = 0,5$; $e_2 = 0,3$; $e_3 = -0,8$. При этом интенсивность главных истинных деформа-

ций, вычисленная по соотношению (5), составит $e_{i3} = 0,8083$. Полученное значение e_{i3} точно равно сумме $e_{i1} + e_{i2} = 0,8083$. Таким образом, можно считать установленным, что в рассмотренном случае интенсивность главных истинных деформаций обладает свойством аддитивности.

Теперь изменим условия рассмотренного примера. Оставим первой операцией формоизменения тела осадку с теми же значениями главных истинных деформаций, что были выше: $e_1 = 0,2$; $e_2 = 0,1$; $e_3 = -0,3$ с результирующим значением $e_{i1} = 0,3050$, а в качестве второй операции формоизменения выберем вытяжку с главными истинными деформациями $e_1 = 0,6$; $e_2 = -0,1$; $e_3 = -0,5$. При этом интенсивность главных истинных деформаций составит $e_{i2} = 0,4000$. Суммируя главные истинные деформации по осям, получаем их итоговую совокупность: $e_1 = 0,6$; $e_2 = -0,1$; $e_3 = -0,5$ и соответствующее значение интенсивности главных истинных деформаций $e_{i3} = 0,6429$. Поскольку сумма $e_{i1} + e_{i2} = 0,7050$ отличается от величины e_{i3} с относительно большой разницей (9,7%), в данном случае интенсивность главных истинных деформаций не обладает свойством аддитивности.

Итоговое заключение можно сформулировать следующим образом: интенсивность главных истинных деформаций обладает свойством аддитивности только тогда, когда последовательность операций формоизменения выполняется при неизменной схеме деформации.

Поскольку предметом исследования в данной работе является знакопеременная упругопластическая деформация изгиба при обработке листов и полос на роликоправильной машине, в процессе которой реализуется плоская схема деформации, уделим внимание именно этой схеме деформации. Ниже будет установлено, что максимальная относительная деформация растяжения или сжатия поверхностных волокон полос при правке на роликоправильной машине EcoMaster®25 не превышает 4%. Поэтому выберем в качестве значений главных истинных деформаций совокупность: $e_1 = 0,04$; $e_2 = 0$; $e_3 = -0,04$, для которой интенсивность главных истинных деформаций $e_{i1} = 0,04619$. В качестве второго варианта плоской деформации выберем такую тройку значений главных истинных деформаций ($e_1 = 0,03$; $e_2 = 0$; $e_3 = -0,03$), для

которой интенсивность главных истинных деформаций составляет $e_{i2} = 0,03464$. Общая совокупность главных истинных деформаций для двух операций изгиба в рассматриваемом примере будет описываться такими значениями ($e_1 = 0,07$; $e_2 = 0$; $e_3 = -0,07$), для которых интенсивность главных истинных деформаций равна $e_{i3} = 0,08083$. Сумма двух предыдущих результатов составляет $e_{i1} + e_{i2} = 0,08083$, т.е. она точно совпадает с величиной e_{i3} , что доказывает аддитивность интенсивности главных истинных деформаций в условиях плоской схемы деформации и обосновывает ее выбор для оценки суммарной пластической деформации металла при знакопеременной упругопластической деформации в процессе его обработки на роликоправильной машине.

Результаты расчетов и их анализ. Как указано выше, для расчета геометрических и деформационных параметров упругопластического знакопеременного изгиба при обработке полос на роликоправильной машине EcoMaster®25 выбрано 24 варианта исходных данных, приведенных в табл. 1. При этом использовалась программа вычислений, основанная на усовершенствованной модели изучаемого процесса обработки. В качестве примера в табл. 2 приводятся результаты вычислений для варианта обработки полосы толщиной 0,25 мм при входном зазоре $G_1 = -2,02$ мм (выделен овалом как величина, влияющая на все параметры процесса правки).

В табл. 2 приняты следующие обозначения: G , мм — входной зазор; $R_{изг}$, мм — радиус изгиба полосы; $\varepsilon_{нар}$, % — относительная деформация наружного волокна полосы; $e_i^{нар}$ — интенсивность главных истинных деформаций наружного волокна; δ , мм — толщина средней упругодеформируемой зоны полосы; $\Delta = (H - \delta)/H$ — относительная протяженность по толщине полосы зон пластической деформации. Отдельно следует расшифровать величину суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций:

$$e_i^{экв\Sigma} = \sum_{k=1}^j 0,5(e_i^{нар})_k \Delta_k, \quad (6)$$

где j — номер последней операции изгиба, имеющей зоны пластической деформации в полосе, при которой выполняется неравенство $\delta_i < H$, а уже на следующей операции изгиба

Таблица 2

Результаты расчета геометрических и деформационных параметров обработки на роликотправильной машине EcoMaster®25 полосы толщиной $H = 0,25$ мм при входном зазоре $G = -2,02$ мм

| Операция изгиба | G , мм | $R_{изг}$, мм | $\epsilon_{нар}$, % | $e_i^{нар}$ | $e_i^{экв\Sigma}$ | δ , мм | Δ |
|-----------------|----------|----------------|----------------------|-------------|-------------------|---------------|----------|
| 1 | -2,02 | 22,135 | 0,562 | 0,006 | 0,0018 | 0,089 | 0,644 |
| 2 | -1,90 | 23,372 | 0,535 | 0,006 | 0,0035 | 0,093 | 0,626 |
| 3 | -1,77 | 24,768 | 0,505 | 0,006 | 0,0050 | 0,099 | 0,604 |
| 4 | -1,64 | 26,354 | 0,474 | 0,005 | 0,0064 | 0,105 | 0,578 |
| 5 | -1,52 | 28,171 | 0,444 | 0,005 | 0,0076 | 0,113 | 0,549 |
| 6 | -1,39 | 30,272 | 0,413 | 0,005 | 0,0086 | 0,121 | 0,516 |
| 7 | -1,26 | 32,729 | 0,382 | 0,004 | 0,0095 | 0,131 | 0,476 |
| 8 | -1,14 | 35,638 | 0,351 | 0,004 | 0,0103 | 0,143 | 0,430 |
| 9 | -1,01 | 39,136 | 0,319 | 0,004 | 0,0109 | 0,157 | 0,374 |
| 10 | -0,89 | 43,428 | 0,288 | 0,003 | 0,0113 | 0,174 | 0,305 |
| 11 | -0,76 | 48,778 | 0,256 | 0,003 | 0,0116 | 0,195 | 0,220 |
| 12 | -0,63 | 55,673 | 0,225 | 0,003 | 0,0117 | 0,223 | 0,109 |
| 13 | -0,51 | 64,890 | 0,193 | 0,002 | 0,0117 | 0,260 | -0,038 |
| 14 | -0,38 | 77,799 | 0,161 | 0,002 | 0,0115 | 0,311 | -0,245 |
| 15 | -0,25 | 97,177 | 0,129 | 0,001 | 0,0111 | 0,389 | -0,555 |
| 16 | -0,13 | 129,496 | 0,097 | 0,001 | 0,0106 | 0,518 | -1,072 |
| 17 | 0,00 | 194,165 | 0,064 | 0,001 | 0,0100 | 0,777 | -2,107 |
| 18 | 0,12 | 388,236 | 0,032 | 0,000 | 0,0091 | 1,553 | -5,212 |
| 19 | 0,25 | — | — | — | — | — | — |

$\delta_i \geq H$. В частности, в табл. 2 эта операция $j = 12$, она выделена (подчеркнута), т.е. после 12-ой операции изгиба полоса будет испытывать только упругую деформацию.

В качестве границы перехода от упруго-пластической к упругой деформации условно выбран такой момент при испытании на растяжение, когда остаточное удлинение достигает величины 0,2 %, как это принято при определении условного предела текучести [15]. Указанное можно легко проверить по изменению относительной деформации наружного волокна полосы в процессе правки. В табл. 2 желтым цветом выделены два значения $\epsilon_{нар}$: начальное и то, которое еще превышает 0,2 %, что совпадает со значением $j = 12$ и переходом величины Δ от положительных к отрицательным значениям, когда вычисленная программой толщина упругодеформируемого слоя полосы превосходит ее толщину.

В табл. 2 есть еще один параметр, отмеченный зеленым цветом и играющий ведущую роль в формировании свойств и структуры полос из металлических материалов, — это суммарная эквивалентная интенсивность главных истинных деформаций $e_i^{экв\Sigma} = 0,0117$.

Здесь уместно подчеркнуть, что упомянутая характеристика деформации обладает наряду с интенсивностью главных истинных деформаций e_i свойством аддитивности. Все полученные результаты расчетов были объединены в табл. 3 и представлены в качестве исходной информации для анализа геометрических и деформационных условий знакопеременного упругопластического изгиба полос при обработке на роликотправильной машине EcoMaster®25. В табл. 3 величина Δ представляет относительную протяженность зон пластической деформации 1-й операции изгиба.

Анализ параметров знакопеременного упругопластического изгиба в изучаемых условиях начнем с зависимости относительной протяженности Δ зон пластической деформации по высоте полосы от входного зазора и толщины полосы как двух главных переменных для исследуемых параметров. Иллюстрацией указанной зависимости является фиг. 3, в качестве функции на которой выбрана величина Δ в 1-й операции изгиба, отличающаяся от последующих операций наибольшей величиной (см. табл. 2).

Параметр Δ важен еще тем, что он существенным образом влияет на величину сум-

Таблица 3

Обобщение исходной информации для анализа геометрических и деформационных условий знакопеременного упругопластического изгиба полос при обработке на роликотправильной машине EcoMaster®25 (G_1 — выбранное по номограмме значение входного зазора)

| H , мм | G_1 , мм | $\varepsilon_{нар}$, % | $e_i^{экр\Delta}$ | Δ | j |
|----------|------------|-------------------------|-------------------|----------|-----|
| 3,0 | 2,62 | 1,137 | 0,0372 | 0,824 | 15 |
| | 2,56 | 1,316 | 0,0459 | 0,848 | 16 |
| | 2,50 | 1,494 | 0,0544 | 0,866 | 16 |
| | 2,25 | 2,254 | 0,0897 | 0,910 | 17 |
| | 2,00 | 2,947 | 0,1250 | 0,932 | 17 |
| | 1,75 | 3,649 | 0,1598 | 0,945 | 18 |
| 2,0 | 1,66 | 0,681 | 0,0166 | 0,706 | 13 |
| | 1,42 | 1,170 | 0,0391 | 0,829 | 15 |
| | 1,17 | 1,652 | 0,0620 | 0,879 | 16 |
| | 1,06 | 1,880 | 0,0730 | 0,894 | 17 |
| | 0,94 | 2,106 | 0,0841 | 0,905 | 17 |
| | 0,82 | 2,330 | 0,0950 | 0,914 | 17 |
| 1,0 | 0,48 | 0,524 | 0,0099 | 0,618 | 12 |
| | 0,05 | 0,960 | 0,0294 | 0,792 | 15 |
| | -0,39 | 1,386 | 0,0495 | 0,856 | 16 |
| | -0,43 | 1,424 | 0,0513 | 0,860 | 16 |
| | -0,47 | 1,461 | 0,0531 | 0,863 | 16 |
| | -0,51 | 1,498 | 0,0549 | 0,867 | 16 |
| 0,25 | -0,80 | 0,266 | 0,0009 | 0,247 | 5 |
| | -1,41 | 0,416 | 0,0057 | 0,519 | 10 |
| | -2,02 | 0,562 | 0,0117 | 0,644 | 12 |
| | -2,22 | 0,608 | 0,0138 | 0,671 | 13 |
| | -2,43 | 0,654 | 0,0159 | 0,694 | 13 |
| | -2,63 | 0,700 | 0,0180 | 0,714 | 14 |

марной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций $e_i^{экр\Delta}$, определяемой соотношением (6). Если же ограничиться минимальной величиной входного зазора из табл. 3 для полос разных толщин, то его влияние на значение $e_i^{экр\Delta}$ в совокупности с влиянием толщин полос наглядно отражает фиг. 4, на которой цифры у точек указывают толщину полос.

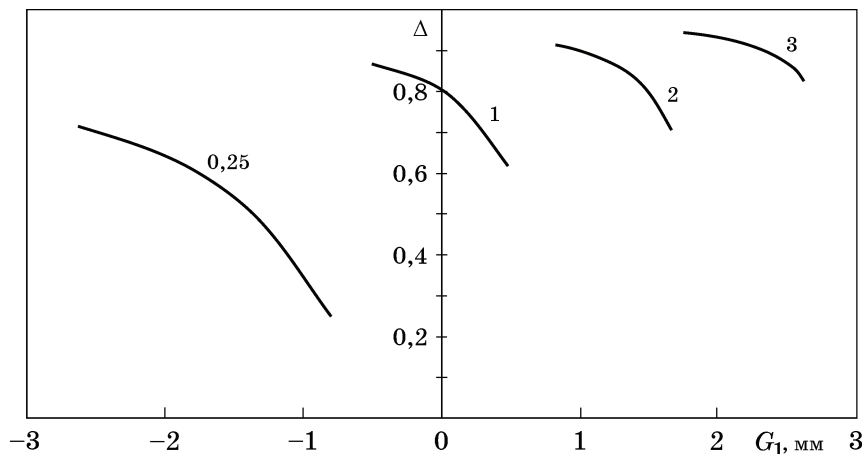
Завершить такой комплексный подход к оценке влияния двух переменных (входного зазора и толщины полосы) на величину суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций удобнее всего графиками фиг. 5. Видно, что зависимости $e_i^{экр\Delta}$ от G_1 для полос разных толщин имеют однозначно прямолинейный характер и что реально эффект воздействия знакопеременного упругопластического изгиба на свойства металлических полос можно ожидать, если их толщина будет не менее 1 мм.

Статистический анализ подтвердил, что зависимости $e_i^{экр\Delta}$ от G_1 с высокой точностью описываются линейными уравнениями вида

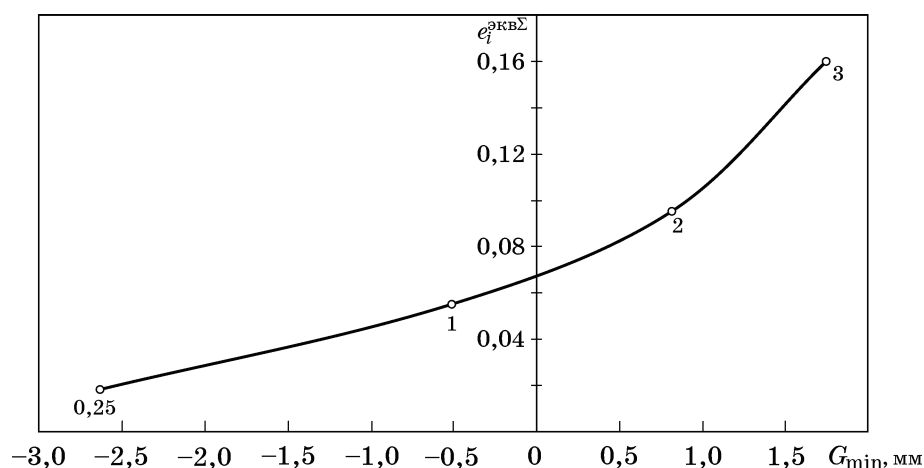
$$e_i^{экр\Delta} = a + bG_1. \quad (7)$$

представленными для полос рассмотренных толщин в табл. 4. О сильной линейной связи между переменными свидетельствуют полученные значения коэффициента регрессии R .

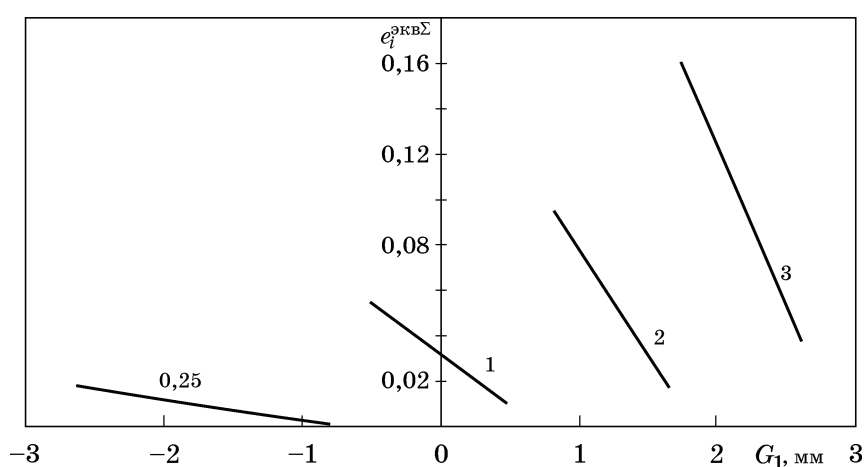
Следует обратить внимание на то, что все сведения, касающиеся геометрических и деформационных параметров изгиба полос на прецизионной роликотправильной машине EcoMaster®25, изложены исключительно для



Фиг. 3. Зависимость относительной протяженности зон пластической деформации Δ по высоте полосы при первом изгибе от входного зазора G_1 и толщины полосы H , мм (см. цифры у кривых)



Фиг. 4. Зависимость суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций от минимального входного зазора G_{\min} и толщины полосы (см. цифры у точек — толщина полосы H , мм)



Фиг. 5. Зависимость суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций от входного зазора и толщины полосы (см. цифры у кривых)

Таблица 4

Регрессионные уравнения зависимости суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций $e_i^{\text{экв}\Sigma}$ полос толщиной H от входного зазора G_1 роликоправильной машины EcoMaster®25

| H , мм | Уравнение | Область определения функции | R |
|----------|---|-----------------------------|----------|
| 3 | $e_i^{\text{экв}\Sigma} = 0,407 - 0,141G_1$ | $1,75 \leq G_1 \leq 2,62$ | -0,99995 |
| 2 | $e_i^{\text{экв}\Sigma} = 0,172 - 0,094 G_1$ | $0,82 \leq G_1 \leq 1,66$ | -0,99996 |
| 1 | $e_i^{\text{экв}\Sigma} = 0,0317 - 0,0455G_1$ | $-0,51 \leq G_1 \leq 0,48$ | -0,99999 |
| 0,25 | $e_i^{\text{экв}\Sigma} = -0,0071 - 0,0094 G_1$ | $-2,63 \leq G_1 \leq -0,8$ | -0,99855 |

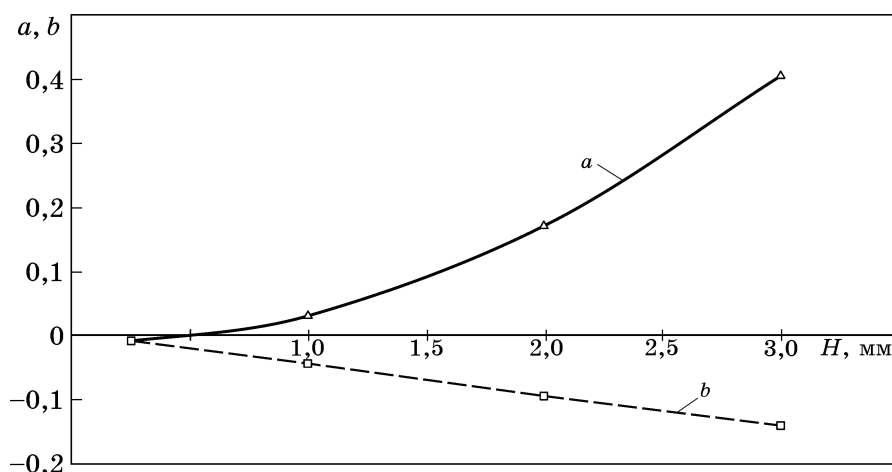
локальных толщин полос, (0,25; 1; 2 и 3 мм). Учитывая большое значение связи между параметрами G_1 и $e_i^{\text{экв}\Sigma}$, было решено проанализировать зависимости коэффициентов a и b уравнения (7) от толщины полос, представленные на фиг. 6.

Задача аппроксимации кривой для коэффициента a решается просто, если ограничиться квадратичной функцией, т.е. параболой. В этом случае три точки, соответствующие

толщинам 1, 2 и 3 мм, определяют уравнение параболы единственным образом — путем решения системы трех линейных уравнений с тремя неизвестными [16]. В результате получено соотношение

$$a = 0,04795H^2 - 0,00175H - 0,0139. \quad (8)$$

Связь коэффициента b с толщиной полосы (в тех же точках) получена статистичес-



Фиг. 6. Зависимость коэффициентов a, b уравнений вида (7) от толщины полосы H

кой обработкой и представляет собой регрессионное уравнение

$$b = 0,002 - 0,04775H \quad (9)$$

с коэффициентом регрессии $R = 0,99995$. Остается добавить, что для расчета нижней границы области определения суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций (см. табл. 4) для произвольной толщины полосы в интервале от 1 до 3 мм можно воспользоваться регрессионным уравнением

$$G_1 = -0,5329 + 2,0417 \ln H, \quad (10)$$

для которого коэффициент регрессии $R = 0,99886$.

Анализ результатов приведенных расчетов и схема расположения рабочих и опорных роликов в роликотправильной машине EcoMaster[®]25 показывают, что на ней можно уменьшать величину входного зазора до 30% ниже рекомендованного уровня, описываемого соотношением (2). Тем самым будет повышена эффективность воздействия пластической деформации на структуру и свойства материала полосы при знакопеременном изгибе.

В отношении планирования исследований в области упругопластической знакопеременной деформации на прецизионной роликотправильной машине EcoMaster[®]25 можно дать несколько рекомендаций. В первую очередь необходимо подобрать исходный материал в виде листов или полос одной партии, что должно характеризовать соответствие их химического состава и свойств требованиям нормативной или сопровождающей документации. Далее следует провести измерения

фактической толщины листов или полос, так как даже для их номинальной толщины стандарты сортамента листового проката допускают определенные предельные отклонения [2, 3]. Примеры таких отклонений для горяче- и холоднокатаных листов толщиной 3 мм и шириной до 1000 мм в зависимости от требований точности изготовления по толщине приведены в табл. 5.

Число измерений толщины должно быть не менее 50, чтобы не только получить более точное среднее значение толщины, но и иметь такие важные ее статистические характеристики, как размах вариации, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации [17]. Зная среднюю толщину полос, можно рассчитать по описанному выше алгоритму геометрические и деформационные условия знакопеременного упругопластического изгиба при их обработке на роликотправильной машине EcoMaster[®]25.

До начала экспериментов следует сделать химический анализ содержания легирующих элементов и примесей в материале полос или листов и провести стандартные испытания на растяжение [15]. Особое внимание при

Таблица 5

Предельные отклонения от номинальной толщины 3 мм листов шириной до 1000 мм в зависимости от требований точности [2, 3]

| Вид листа | Требования к точности | Предельное отклонение |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| Горячекатаный | Повышенная (А) | $\pm 0,18$ мм |
| | Обычная (Б) | $\pm 0,20$ мм |
| Холоднокатаный | Высокая (ВТ) | $\pm 0,12$ мм |
| | Повышенная (АТ) | $\pm 0,16$ мм |
| | Нормальная (БТ) | $\pm 0,18$ мм |

этом должно быть уделено построению кри-вых течения, которые отражают характер упрочнения металла при пластической деформации в условиях линейной схемы напряженного состояния [18]. Очень важно до и после обработки на машине разных металлических материалов использовать комплексный подход к изучению их структуры на оптических и электронных микроскопах, применять методы рентгеноструктурного анализа, измерять микротвердость [19] для локальной оценки изменения свойств. Все это объяснит наблюдаемые изменения в состоянии металла и откроет новые пути по его управлению посредством знакопеременного упругопластического изгиба как перспективного технологического процесса.

Выводы. 1. На основании анализа положения рабочих роликов в прецизионной роликоправильной машине EcoMaster®25 доказана возможность снижения до 30% минимальной величины входного зазора, ограниченной номограммой в инструкции пользования машиной.

2. Для определения необходимых значений входного зазора установлены аналитические зависимости, справедливые при значениях средней толщины полос или листов в интервале от 1 до 3 мм, соответствующем получению повышенных величин суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций.

3. Показана аддитивность интенсивности главных истинных деформаций и суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций, что делает последнюю полноценной мерой накопленных деформаций и их активного воздействия в результате знакопеременного упругопластического изгиба на свойства и структуру металлических материалов при их обработке на роликоправильной машине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедический словарь по металлургии : справочное изд. в 2 т. Т.2: П-Я / Н.П.Лякишев [и др.]. — М. : Интернет Инжиниринг, 2000. 409 с.
2. ГОСТ 19903—2015. Межгосударственный стандарт. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. — М. : Стандартинформ, 2016.
3. ГОСТ 19904—90. Межгосударственный стандарт. Прокат листовой холоднокатаный. Сортамент. — М. : Изд-во стандартов, 1999.
4. Максимов, Е.А. Уточнение методики расчета параметров правки толстых листов на роликоправильной машине / Е.А. Максимов, Р.Л. Шаталов, Ю.С. Васильев // Сталь. 2017. №1. С. 35—38.

5. Максимов, Е.А. О настройке натяжных многороликовых устройств при обработке полосового проката (сообщение 2) / Е.А. Максимов, Р.Л. Шаталов // Сталь. 2014. №5. С. 75—78.
6. Котов, К.А. Моделирование напряжений при правке горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации / К.А. Котов, Н.Н. Болобанова, Д.Д. Нуштаев // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2020. Т. 63. №10. С. 808—814
7. Богатов, А.А. Особенности формоизменения и упрочнения металла при обработке давлением со знакопеременной деформацией / А.А. Богатов, С.С. Пузырев // Пр-во проката. 2013. №3. С. 2—8.
8. Матросов, Н.И. Зависимость механических свойств металлических материалов от схемы деформирования / Н.И. Матросов, В.В. Чижко, Э.А.Медведская [и др.] // Физика и техника высоких давлений. 2005. Т. 15. № 4. С. 54—58.
9. Шаталов, Р.Л. Определение механических свойств медных и латунных полос по показателям твердости при холодной прокатке / Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш, В.Л. Зисельман // Цв. металлы. 2014. №5. С. 61—65.
10. Шелест, А.Е. Особенности формирования механических свойств медных полос при знакопеременном упругопластическом изгибе / А.Е.Шелест, В.С.Юсупов, М.М. Перкас, Е.Н. Шефтель, В.В. Просвирнин, К.Э. Акоюн // Металлы. 2018. № 3. С. 88—95.
11. Рогачев, С.О. Влияние знакопеременного изгиба на структуру и механические свойства технически чистой меди / С.О. Рогачев, М.М. Перкас, В.С. Юсупов, А.Е. Шелест, В.А. Андреев, В.М. Хаткевич, М.Г. Исаенкова, Я.А. Бабич // МиТОМ. 2021. №11. С. 38—43
12. Шелест, А.Е. Разработка методики определения геометрических и деформационных параметров правки металлических листов на роликоправильных машинах / А.Е. Шелест, В.С. Юсупов, М.М. Перкас, Е.Н. Шефтель, В.В. Просвирнин, К.Э. Акоюн // Пр-во проката. 2016. №3. С. 3—8.
13. Прецизионные правильные станки серии EcoMaster® <https://stanko-group.net/katalog/stankidlya-obrabotki-lista/ustanovki-pravki-lista/precizionnyy-pravilnyy-stanok-ecomaster-2/>
14. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г.А. Смирнов-Аляев. — Изд. 3-е. — Л. : Машиностроение, 1978. 368 с.
15. ГОСТ 11701—84. Металлы. Метод испытания на растяжение тонких листов и лент. — М. : Изд-во стандартов, 1985.
16. Райхмист, Р.Б. Графики функций : справ. пособ. для вузов / Р.Б. Райхмист. — М. : Высш. шк., 1991. 160 с.
17. Кибзун, А.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами / А. И. Кибзун, Е. Р. Горяинова, А. В. Наумов ; под ред. А. И. Кибзуна. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — М. : Физматлит, 2014. 231 с.
18. Шелест, А.Е. Уточнение методики построения кри-вых течения металла для прогнозирования его упрочнения при знакопеременной холодной пластической деформации / А.Е. Шелест, В.С. Юсупов, М.М. Перкас, Е.Н. Шефтель, К.Э. Акоюн, В.В. Просвирнин // Металлы. 2017. № 5. С.89—95.
19. ГОСТ 9450—76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. — М. : Изд-во стандартов, 1993.