

УДК 621.983

**В. В. КУХАРЬ**, докт. техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь;  
**М. О. ЛЕСОВОЙ**, ассистент, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь.

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРВОГО ЭТАПА ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ И ТРУБ НА МЕРНЫЕ ДЛИНЫ**

Предложен новый способ безотходного разделения гнутых движущихся профилей и труб на мерные длины без участия уникального дорогостоящего оборудования, позволяющий осуществлять резку мерных заготовок без остановки стана. Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния металла на первом этапе формовки надрезанного профиля, основанная на выделении элементарного поперечного сечения листа, а затем численном решении конечно-разностной формы условия статического равновесия для него. После нанесения концентратора напряжений и приложения знакопеременных напряжений в процессе формовки с последующим скручиванием профиля в косовалковой правильной клетки, обеспечивается гарантированное отделение мерной заготовки.

**Ключевые слова:** гнутый профиль, труба, безотходное разделение, напряженно-деформированное состояние, математическая модель, листогибочная машина.

**Введение.** В современном производстве гнутых профилей и труб часто используются процессы механической и термической резки [1, 2]. Они сочетаются с такими процессами формообразования, как, например, прокатка, правка, гибка и т.п. Наиболее экономичным процессом при массовом производстве является механическая резка. Гнутые профили применяют практически во всех областях строительства – от армирования металлопластиковых окон, в виде несущих и ограждающих конструкций, до применения их в качестве финишных, отделочных и декоративных элементов. В настоящее время промышленное производство гнутых профилей является необходимым атрибутом всех экономически развитых стран [3].

**Анализ последних исследований и литературы.** Резка металла на заданные по длине размеры ведется на всех предприятиях, связанных с его производством или переработкой. Будучи неотъемлемой частью производственного процесса, резка металла становится «узким местом», ограничивающим производительность агрегата [4]. Это касается, главным образом, резки металлопродукции большого сечения или профилей, находящихся в движении (резка профилей и труб). Резка движущегося металла известным в производстве методом с применением летучих отрезных устройств характеризуется малой производительностью, наличием стружки, малыми

межремонтными сроками работы уникального оборудования, большими технологическими припусками и другими недостатками [5]. В ряде случаев летучие отрезные устройства, в виду их низкой пропускной способности, являются элементами, ограничивающими производительность основных агрегатов, например, трубоэлектросварочных (ТЭС) и профилегибочных станов (ПГС).

Решения данной проблемы возможно путём использования нового способа разделения гнутых профилей проката заданной длины и формы без искажения его геометрических форм [6]. Способ заключается в предварительном надрезе сдвигом неспрофилированной движущейся ленты ножами специальной конфигурации режущей кромки (рис. 1). Надрез сдвигом осуществляется на глубину, которая меньше глубины, вызывающей трещинообразование. В поперечном сечении неспрофилированной надрезанной заготовки, вдоль линии надреза можно выделить характерные участки, которые соответствуют следующим технологическим операциям (рис. 2):

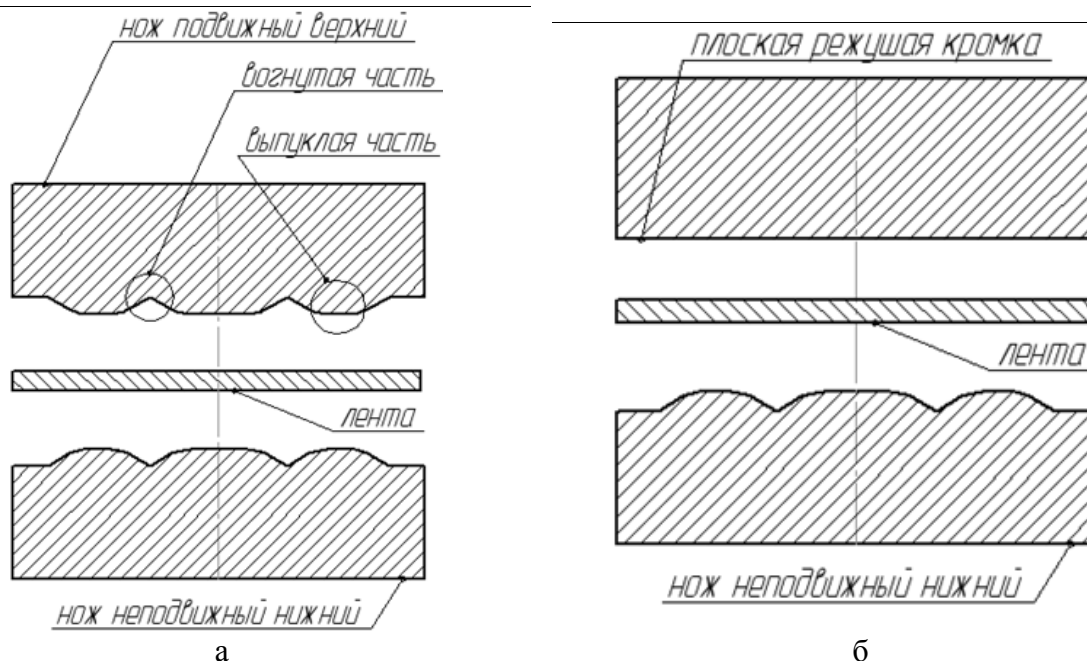


Рис. 1 – Конструктивное исполнение ножей для надреза сдвигом неспрофилированной движущейся ленты: а – с зеркально выполненными режущими кромками; б – плоскими режущими кромками

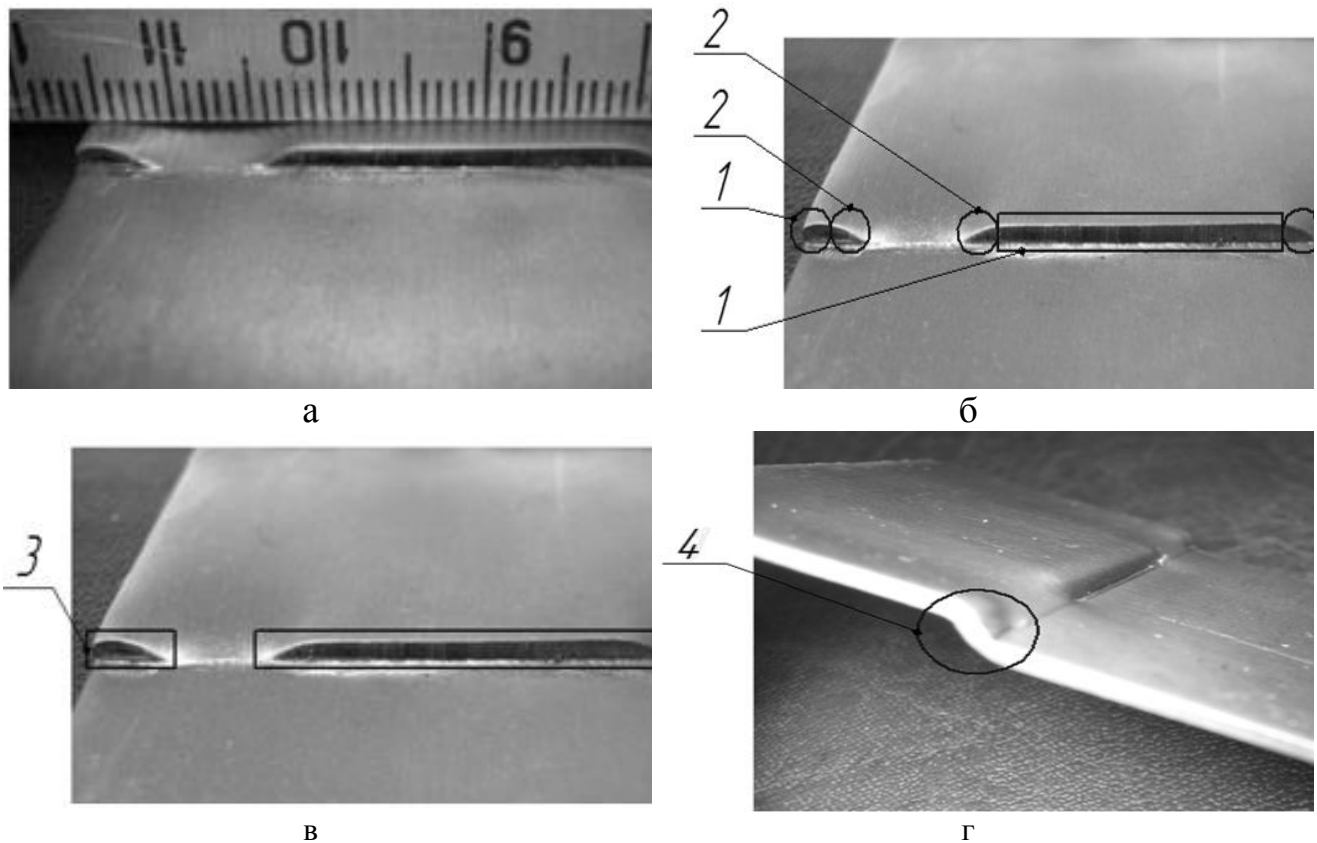


Рис. 2 – Надрезанные заготовки:

а – общий вид; б – фронтальный вид с обозначением участков резки; в – фронтальный вид с обозначением участков формовки; г – вид сбоку с обозначением участка гибки; 1 – участки резки параллельными ножами; 2 – участки резки наклонными или гильотинными ножами; 3 – участки формовки рёбер жесткости; 4 – участки гибки.

После надреза сдвигом ленту выпрямляют с помощью дополнительной пары правильных валков и получают ленту (штрипс) с концентратором напряжений. Из которой профилируют гнутый профиль, в котором концентратор расположен по всему сечению профиля, что предопределяет его разделение по толщине в плоскости концентратора без смятия. Одновременно с надрезкой сдвигом выполняют прорезание части заготовки, которая находится между надрезанными участками на ножах, один из которых имеет соответствующую криволинейную форму.

Для прогнозирования технологических возможностей нового способа разделения профилей и труб в производственных линиях профилегибочных агрегатов методом их оценки напряженно-деформированного состояния материала на всех этапах процесса формовки-разделения, что в настоящее время не выполнено.

**Цель исследования, постановка проблемы.** Целью настоящей работы является разработка математической модели для расчета напряженно-деформированного состояния материала на первом этапе процесса формовки-разделения, связанным с формированием профиля заданной геометрии с нанесенным концентратором напряжений.

**Материалы исследования.** В соответствии с изложенным выше была предложена математическая модель напряженно-деформированного состояния металла при реализации изгиба листа, основанная на выделении элементарного поперечного сечения листа, а затем численном решении конечно-разностной формы условия статического равновесия для него. В соответствии с этим, была рассмотрена расчетная схема (рис. 3, а), которая включает в себя исходное состояние заготовки, характеризуемое толщиной  $h$  и исходной кривизной  $\chi_0 = 1/R_0$ , нагруженное состояние с прогибом опорной системы  $W$ , радиусом  $R_1$  и кривизной  $\chi_1 = 1/R_1$ , а также состояние разгрузки, характеризуемое остаточными радиусом  $R_{\text{ост}}$  и кривизной  $\chi_{\text{ост}} = 1/R_{\text{ост}}$ .

С точки зрения напряженно-деформированного состояния, каждый отдельный элементарный объем деформируемого металла может быть охарактеризован продольными составляющими относительных деформаций растяжения-сжатия  $\varepsilon_i$ , а также соответствующими им нормальными напряжениями  $\sigma_i$ . Так же при разработке математической модели процесса гибки был принят ряд дополнительных допущений, основными из которых являются следующие [7] :

- деформация заготовки двумерная и установившаяся во времени;
- деформации и напряжения, соответствующие растяжению, приняты положительными, а сжатию – отрицательными;
- относительные деформации  $\varepsilon_i$  и нормальные напряжения  $\sigma_i$  по толщине каждого отдельно выделенного  $i$ -го элементарного объема являются величинами постоянными, при этом их количественные оценки соответствуют значениям, определяемым для центра тяжести данного объема;
- значения кривизны  $\chi_0$ ,  $\chi_1$  и  $\chi_{\text{ост}}$  рассматривают по отношению к средней линии всего поперечного сечения листа.

Непосредственно математическое моделирование заключается в разбиении поперечного сечения листа на элементарные поперечные сечения с порядковыми номерами  $i=1...n$  и последующим определением их геометрических характеристик (см. рис. 3, б):

$$\Delta h = h / n; \quad (1)$$

$$y_i = h/2 + \Delta h(i - 0,5); \quad (2)$$

Приняв допущение о соответствии линии упругопластического изгиба дуге окружности, определяем радиус кривизны средней линии (см. рис. 3, а):

$$R_l = St^2 + h \cdot W + W^2 / 2 \cdot W, \quad (3)$$

где  $St$  – шаг опорной системы;

$W$  – величина перекрытия.

Количественные оценки относительных деформаций напряжения-сжатия могут быть получены исходя из геометрического решения для изогнутого листа (рис 2.б), имеющего начальную кривизну  $\chi_0$  [7].

$$\varepsilon_{y_i} = \frac{(1 + \chi_l \cdot y_i) \cdot \varepsilon_{cp} - (\chi_l - \chi_0) \cdot y_i}{1 + \chi_0 \cdot y_i}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{cp}$  – относительная деформация растяжения линии, соответствующей средней линии листового металла (см. рис. 3, а).

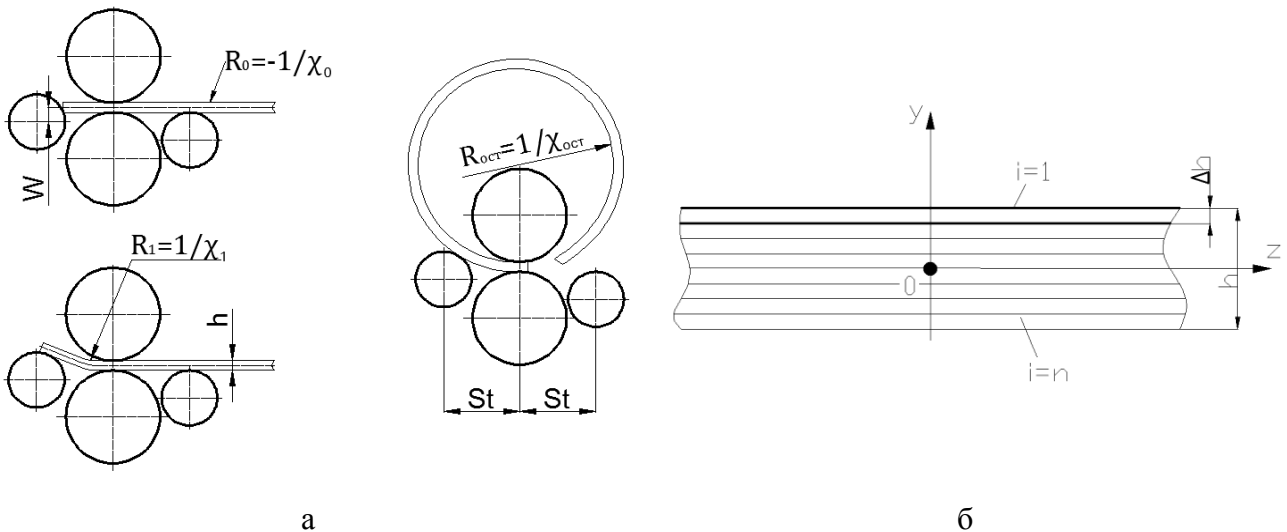


Рис. 3 – Расчетные схемы применительно к численному математическому моделированию напряженно-деформированного состояния металла при реализации изгиба листового металла на листогибочных машинах: а – расчетная схема; б – разбиение поперечного сечения листа

Вместе с тем, с точки зрения процессов холодной обработки металлов давлением, более приемлемым является использование в качестве показателя деформированного состояния не величины относительного обжатия, а интенсивности деформации  $\varepsilon_i$ , определяемой как [8]

$$\varepsilon_i = (\sqrt{2}/3) \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные линейные деформации.

Главные линейные деформации для плоского деформированного состояния связаны между собой следующими соотношениями:  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \ln(l_1/l_0) = \ln(1 + \varepsilon_{y1})$  и  $\varepsilon_2 = 0$ , где  $l_0$  и  $l_1$  – длина средней линии заготовки в поперечном сечении.

Для дальнейшего решения задавали аналитическую связь между интенсивностью напряжений  $\sigma_i$  и интенсивностью деформаций  $\varepsilon_i$ . При этом для описания функции  $\sigma_i(\varepsilon_i)$  можно использовать аппроксимацию данных источника [8] кубическим

$$\sigma_i = a_0 + a_1 \cdot \varepsilon_i + a_2 \cdot \varepsilon_i^2 + a_3 \cdot \varepsilon_i^3, \quad (5)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  и  $a_3$  – значения коэффициентов уравнения регрессии аналитического описания кривой деформационного упрочнения материала.

Остаточную степень деформации  $\varepsilon_{ост}$  определяют с учетом известного значения модуля упругости материала  $E$ :

$$\varepsilon_{ост_i} = \varepsilon_i - \sigma_i / E. \quad (6)$$

Дальнейший расчет напряженно-деформированного состояния металла при изгибе листового металлопроката проводится на основе конечно-разностного подхода путем численного определения расчетного значения осевой силы  $T_{y_k}$  и изгибающего момента  $M_{y_k}$  для каждого отдельного элементарного поперечного сечения [7]:

$$T_{y_k} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot \Delta h; \quad (7)$$

$$M_{y_k} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot y_i \cdot \Delta h, \quad (8)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений, действующих в рамках каждого отдельного  $i$ -го элементарного объема металла листа, подвергаемого правке (см. рис. 3).

Показатели относительной деформации слоя, соответствующего координате центра тяжести рассматриваемого сечения для упругопластической нагрузки  $\varepsilon_{ср_k}$  и разгрузки  $\chi_{ост(l+k)}$ ;  $\varepsilon_{ост(l+k)}$  определяли на основе дополнительной

итерационной процедуры, аналитическое описание которой имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{cpk} = \varepsilon_{cpk} - T_{y_k} / (E_{Mc} \cdot F_s); \quad (9)$$

$$\varepsilon_{ocm(k+1)} = \varepsilon_i - \sigma_i / E; \quad (10)$$

$$\chi_{ocm(k+1)} = \chi_{ocmk} - M_{y_k} / (E_{Mc} \cdot J_s), \quad (11)$$

где  $k$  – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;

$F_s, J_s$  – площадь и момент инерции поперечного сечения листового металла.

Для оценки степени сходимости итерационных процедур решения (9) – (11) использовали следующее условие:

$$\delta_k = |T_{y_k} / h| + |M_{y_k} / h^2| \leq 0,01. \quad (12)$$

Дальнейший отрыв круглых профилей происходит на участке косовалковой трубоправильной машины с индивидуальным приводом роликов путем мгновенной остановки последних по ходу движения профиля роликов трубоправильной машины и разрыве по местам надреза.

**Выводы.** Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния металла на первом этапе процесса формовки-разделения, связанным с формированием профиля заданной геометрии с нанесенным концентратором напряжений при формовке, позволяющая прогнозировать технологические возможности нового способа разделения профилей и труб в производственных линиях профилегибочных агрегатов методом их оценки напряженно-деформированного состояния материала.

**Список литературы:** 1. Грудев А. П. Технология прокатного производства : учебник для ВУЗов / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Металлургия, 1994. – 656 с. 2. Николаев В. О. Технологія виробництва сортового та листового прокату : підручник / В. О. Ніколаєв, В. Л. Мазур. – Запоріжжя : ЗДІА, 2000. – 257 с. 3. Технология прокатного производства. В 2 к. К. 2 : справочник / М. А. Беньковский, К. Н. Богоявленский, А. Н. Виткин [и др.]. – М. : Металлургия, 1991. – 423 с. 4. Соловцов С. С. Безотходная резка сортового проката в штампах / С. С. Соловцов. – М. : Машиностроение, 1985. – 175 с. 5. Веселовский С. Н. Резка материалов. / С. Н. Веселовский. – М. : Машиностроение, 1973. – 360 с. 6. Пат. 70085U Україна МПК (2012.01) В 23 D 23/00. Спосіб поділу гнутих профілів прокату / М. О. Лісовий, К. К. Діамантопуло. – № u201113655; заявл. 21.11.2012; опубл. 25.05.2012, Бюл. №10. – 4с.; 5 іл. 7. Дунаевский В. И. Одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при правке растяжением с изгибом / В. А. Самойлов, А. В. Сатонин, А. Б. Егоров // Изв. вузов Черная металлургия. – 1994. – №9. – С. 44-47. 8. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

Поступила в редколлегию 23.05.2014