

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦВМ

В. Д. ДЕЛЬ, Н. Ф. ЗИМА

(Представлена научным семинаром лаборатории пластических деформаций)

Несмотря на распространенность и сравнительную простоту процесса листовой прокатки, информация о напряженном состоянии прокатываемой полосы остается весьма ограниченной из-за недостатка граничных условий для аналитического расчета напряжений и большой сложности их экспериментального определения.

В связи с этим разработана экспериментально-аналитическая методика определения напряжений при листовой прокатке по распределению твердости и искажению прямоугольной делительной сетки, подобная применявшейся ранее при исследовании процессов сливного стружкообразования [1, 2]. Делительная сетка наносится на пластинку из исследуемого материала, которая вставляется в прорезь, сделанную в плоскости симметрии прокатываемой полосы, перпендикулярной оси валков.

Прокатка широкой полосы представляет собой установившийся процесс плоской деформации, поэтому линии сетки, до прокатки параллельные направлению движения полосы, при деформировании превращаются в траекторию движения частиц. Процесс останавливается, в исследуемой области по искажению делительной сетки определяются поля углов  $\alpha$  между касательными к траекториям движения частиц и осью  $x$  и расстояний  $a$  между узлами сетки по направлению траектории (рис. 1).

Затем поверхность обрабатывается, в различных точках ее измеряется твердость, а по ней и предварительно построенному тарировочному графику — интенсивность касательных напряжений  $\kappa$ . Результаты усредняются проведением изолиний.

Для расчета напряжений в узлах координатной сетки, изображенной на рис. 1, определяются значения  $a$ ,  $\alpha$  и  $\kappa$ .

Углы наклона касательных к траекториям линий скольжения в узлах сетки рассчитываются по формуле [1]

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \arctg \left[ \frac{\operatorname{tg} \alpha \left( \frac{\partial a}{\partial y} + a \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) - \frac{\partial a}{\partial x} + a \frac{\partial \alpha}{\partial y}}{\operatorname{tg} \alpha \left( \frac{\partial a}{\partial x} - a \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) + \frac{\partial a}{\partial y} + a \frac{\partial \alpha}{\partial x}} \right]. \quad (1)$$

Подстановка известных соотношений

$$\sigma_x = \sigma - \kappa \cdot \sin 2\theta; \quad \sigma_y = \sigma + \kappa \cdot \sin 2\theta; \quad \tau_{xy} = \kappa \cdot \cos 2\theta \quad (2)$$

в дифференциальные уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

позволяет после несложных преобразований получить для производных от гидростатического давления  $\sigma$  по координатам следующие соотношения:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \left( \frac{\partial \kappa}{\partial x} + 2\kappa \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \sin 2\theta + \left( 2\kappa \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right) \cos 2\theta, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = \left( 2\kappa \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right) \sin 2\theta - \left( 2\kappa \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right) \cos 2\theta. \quad (5)$$

Численное интегрирование полученных выражений производится методом конечных разностей; для расчета  $\sigma$  применялась разностная схема вида

$$\sigma_1 = \sigma_0 + f_{01} \cdot \Delta,$$

где  $f_{01}$  — правая часть выражений (4) и (5) для точки, лежащей между узлами с индексами 0 и 1,  $\Delta$  — шаг координатной сетки (в дальнейшем полагаем  $\Delta = 1$ ).

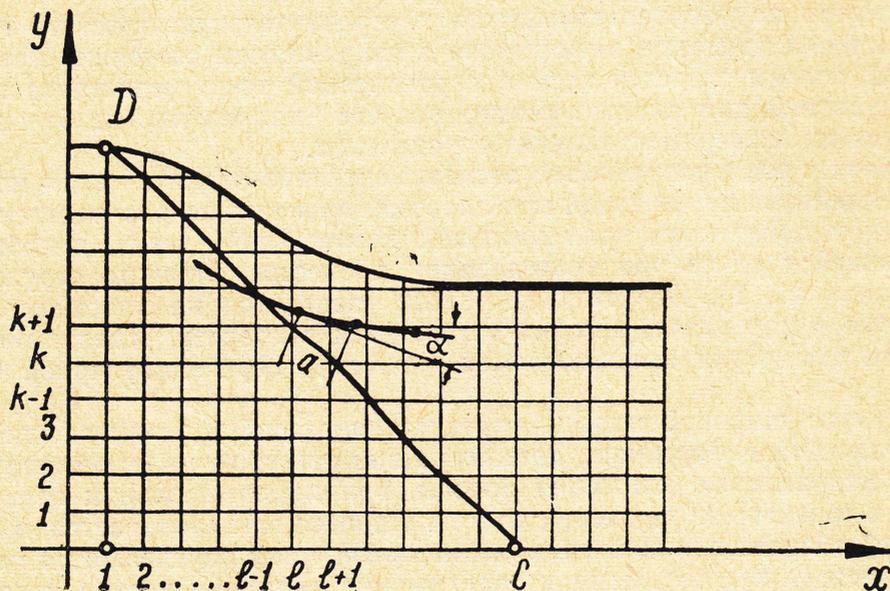


Рис. 1. Схема к расчету напряжений при прокатке

Граничными условиями для расчета гидростатического давления являются условия в точке  $D$  свободного контура в непосредственной близости от контакта, в которой  $\sigma = -\kappa$ .

От точки  $D$  рассчитываются значения  $\sigma$  вдоль луча  $DC$ , направление которого во избежание попадания в упругую область выбрано под углом  $-\frac{\pi}{4}$  к оси  $x$ ; выражение (4) при этом в конечных разностях расписывается следующим образом:

$$\sigma_{\kappa, l} = \sigma_{\kappa+1, l-1} + [\kappa_{\kappa, l} - \kappa_{\kappa+1, l-1} + (\kappa_{\kappa, l} + \kappa_{\kappa+1, l-1}) (\theta_{\kappa+1, l} - \theta_{\kappa, l-1})] \sin (\theta_{\kappa, l} + \theta_{\kappa+1, l-1}) + [(\kappa_{\kappa, l} + \kappa_{\kappa+1, l-1}) (\theta_{\kappa, l} - \theta_{\kappa+1, l-1}) - \kappa_{\kappa+1, l} + \kappa_{\kappa, l-1}] \cos (\theta_{\kappa, l} + \theta_{\kappa+1, l-1}).$$

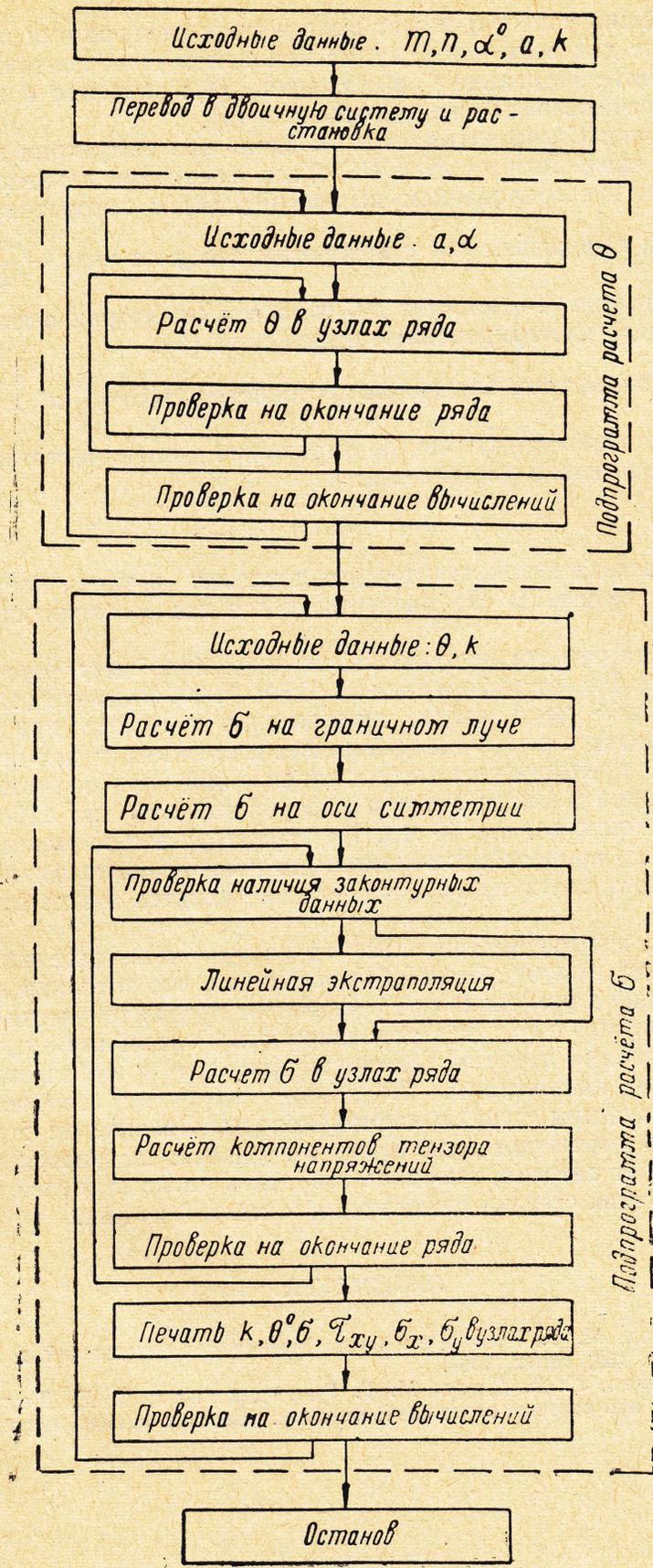


Рис. 2. Блок-схема расчета напряжений

Дальнейший расчет  $\sigma$  может выполняться следующими путями:

1. Расчет для всех узлов, кроме принадлежащих контакту, ведется численным интегрированием выражения (4); значения  $\sigma$  в узлах на контакте рассчитываются по выражению (5).

2. От точки  $C$  рассчитывается  $\sigma$  вдоль оси симметрии и затем по полученным значениям на луче  $DC$  и оси симметрии ведется расчет во всей области интегрированием выражения (4) с поворотом оси  $x$  на угол  $\frac{\pi}{4}$  или выражения (5) с поворотом оси  $y$  на угол  $-\frac{\pi}{4}$ .

3. По значениям  $\sigma$  на луче  $DC$  и на оси симметрии ведется расчет во всей области интегрированием выражения (5).

На оси симметрии благодаря постоянству  $\Theta$  ( $\Theta = \frac{3}{4}\pi$ ) и симметрии  $k$  и  $\Theta$  относительно нее расчетное выражение для гидростатического давления значительно упрощается:

$$\sigma_{k, l} = \sigma_{k, l-1} - \kappa_{k, l} + \kappa_{k, l-1}. \quad (4)$$

После расчета гидростатического давления в узлах координатной сетки по соотношениям (2) рассчитываются все составляющие напряжения.

Блок-схема расчета напряжений по изложенной методике представлена на рис. 2. Расчет выполнялся на ЦВМ М-20. Исследовалось напряженное состояние меди, стали, дюралюмина и свинца при прокатке на микроскорости и различных толщинах и степенях деформации полосы. На рис. 3 представлены эпюры напряжений при прокатке медной полосы толщиной 6 мм до степени деформации 17% на лабораторном стане с диаметром валков 50 мм. По характеру эпюр можно сделать заключение, что процесс формоизменения должен происходить в основном в области захвата полосы, что подтверждается видом деформированной сетки.

Материал полосы вблизи контакта находится в условиях, близких к всестороннему сжатию. Этим объясняется то, что значения действующих напряжений в несколько раз превышают предел текучести материала полосы. Установлено, что упрочняемость материала увеличивает непроизводительные затраты энергии и приводит к неблагоприятному распределению напряжений. Подобным эффектом сопровождается уменьшение толщины прокатываемой полосы. Увеличение же степени ее деформации уменьшает долю шарового тензора, следовательно, с точки зрения затрат энергии, выгоднее сократить число ступеней прокатки за счет увеличения степени деформации в каждой из них.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Д. Дель, М. Г. Гольдшмидт. Определение напряжений в зоне резания. Изв. ТПИ, т. 162, Томск, 1967.
2. Н. Н. Зорев, Г. Д. Дель, М. Г. Гольдшмидт, В. Д. Дель. Напряженное состояние при сливном стружкообразовании. «Вестник машиностроения», № 7, 1969 (в печати).

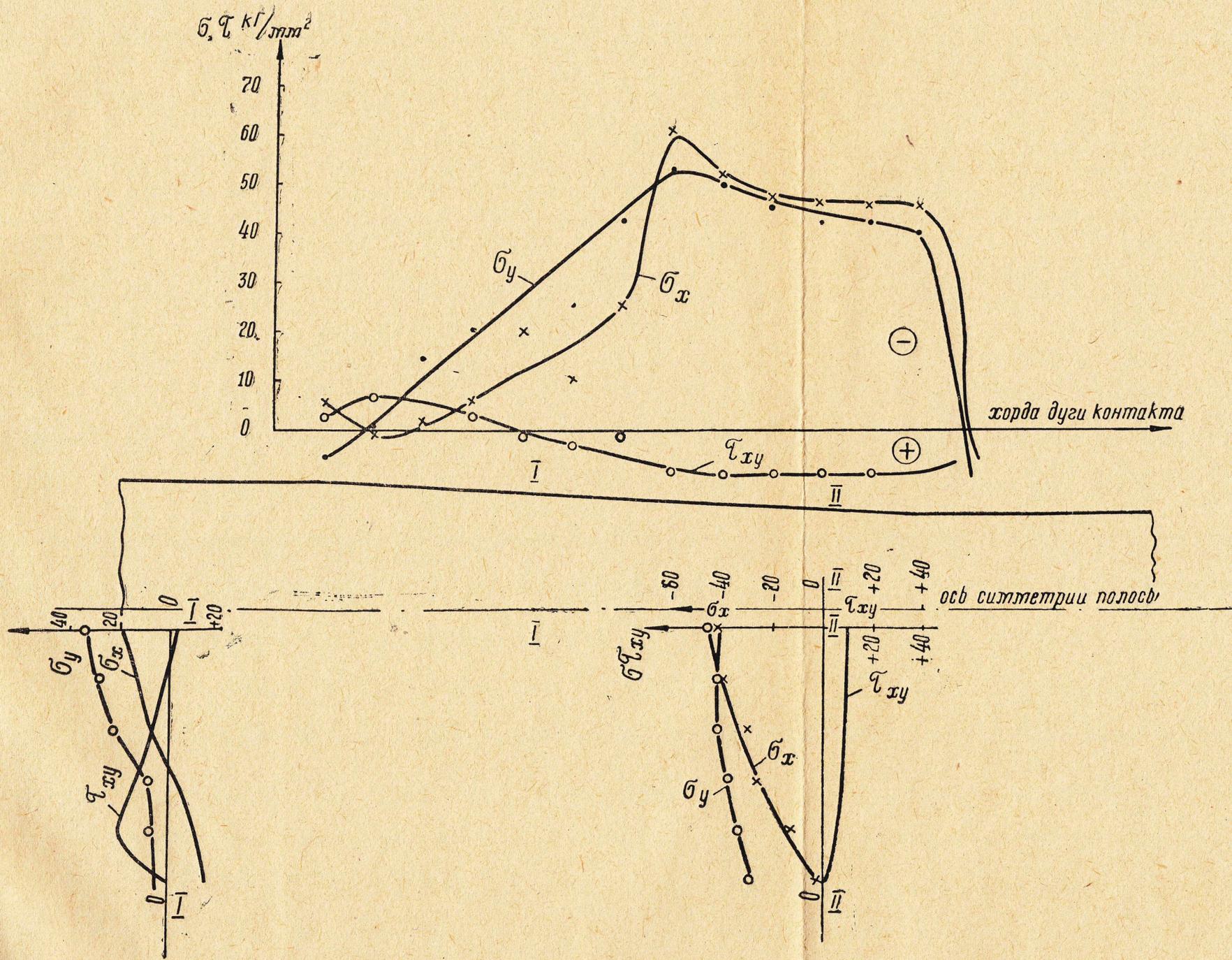


Рис. 3. Эпюры напряжений при прокатке медной полосы