

выходе из валков ( $\Delta h_{0y}/h_0 = h_{1y}/h_1$ ), то о плоскостности полосы можно судить по изменению показателя  $\Delta\lambda_y/\lambda = \Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 + \Delta\beta/\beta$  по ширине ленты.

Известно, что при прокатке лент ( $h_1/B \leq 0,02$ ) с уменьшением их ширины поперечная деформация и абсолютное уширение увеличивается. В работе [8] рассматривается прокатка ленты из стали 10, исходной толщиной  $h_0 = 3$  мм, шириной  $B = 80$  мм, с относительным обжатием  $e = 30\%$ , с клиновидным профилем подката  $0,005 - 0,006$  мм в цилиндрических валках радиусом  $R = 200$  мм. В результате опытов установлено, что уширение составило  $0,82\%$ .

Таким образом, при наличии поперечной разнотолщинности на входе и выходе из валков, а также поперечной деформации для оценки дефекта (серповидности) формы необходимо пользоваться показателем  $\Delta\lambda_y/\lambda = \Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 + \Delta\beta/\beta$ .

6. Если принимается условие равенства относительной поперечной разнотолщинности полосы на входе и выходе из валков ( $\Delta h_{0y}/h_0 = h_{1y}/h_1$ ) и равенства продольной составляющей скорости металла в плоскости входа по ширине полосы ( $\Delta V_{0y} = 0$ ), то о плоскостности полосы можно судить по изменению показателя  $\Delta V_{1y}/V_1 = \Delta\beta/\beta$  по ширине полосы.

В заключении отметим, что для общего случая процесса прокатки листовой стали, для оценки плоскостности прокатываемых полос, листов и лент может быть использовано изменение показателя  $\Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 - \Delta\beta/\beta + \Delta V_{0y}/V_0$  по ширине полосы.

**Выводы.** Проведенный анализ существующих методов контроля и оценки плоскостности листов, полос и лент, а также критерия плоскостности и отсутствия серповидности показал, что на практике показателем плоскостности полос принимается относительная неравномерность коэффициента вытяжки по ширине полосы или разность относительной поперечной разнотолщинности на входе и выходе из валков. Исследован новый кинематический критерий плоскостности и отсутствия

серповидности. Показано, что существующий деформационный критерий плоскостности является частным случаем кинематического. Показано, что для оценки плоскостности и отсутствия серповидности прокатываемых полос и лент могут быть использованы частные показатели, в том числе для лент – различие относительной поперечной разнотолщинности полосы на входе и выходе из валков и неравномерность поперечной деформации по ширине полосы  $\Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 + \Delta\beta/\beta$ , различие относительной поперечной разнотолщинности полосы на входе и выходе из валков и равенства продольной составляющей скорости металла в плоскости входа по ширине полосы  $\Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 + \Delta V_{0y}/V_0$ , которые могут быть использованы для оценки плоскостности и серповидности прокатываемых листов, полос и лент для различных случаев прокатки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суяров Д.И., Беньковский М.А. Качество тонких стальных листов – М.: Металлургия, 1964. – 236 с.
2. Железнов Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос. – М.: Металлургия, 1971. – 200 с.
3. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки / Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А. и др. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
4. Выдрин В.Н. – В кн.: Теория и технология прокатки. Сб. науч. тр. Челябинского политех. ин-та. – Челябинск: изд. ЧПИ, 1972. № 102. С. 208 – 219.
5. Третьяков А.В., Зиновьев Е.Г., Зуев Б.П. и др. // Сталь. 1980. № 9. С. 628 – 631.
6. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. – М.: Теплотехник, 2008. – 336 с.
7. Дегтяренко В.К., Соколов В.А., Зуев С.А. // Сталь. 1979. № 11. С. 855.
8. Салганик В.М., Песин А.М., Куницын Г.А. и др. – В кн.: Процессы и оборудование металлургического производства. Межрегиональный сб. науч. тр. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2009. № 9. С. 113 – 117.

© 2012 г. Е.А. Максимов  
Поступила 7 февраля 2011 г.

УДК 621.771.01

**А.В. Сатонин, С.С. Настоящая, В.А. Переходченко**

Донбасская государственная машиностроительная академия (г. Краматорск)

## ДВУХМЕРНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ ОСОБО ТОНКИХ ЛИСТОВ И ПОЛОС

Одной из основных тенденций развития технологий и оборудования широкополосных станов горячей прокатки (ШСП) является расширение сортамента и повышение качества готовой металлопродукции, в том числе и за счет производства высокоточных особо тонких го-

рячекатаных полос толщиной менее 1,2 мм [1]. Вместе с тем, условия реализации, имеющие место в этом случае технологической схемы, обуславливают значительное повышение соотношения общей протяженности очага деформации  $l_d$  и средней толщины полосы  $h_{cp}$  в послед-

них чистовых рабочих клетях, достигающего  $l_d/h_{cp} = 10$  и более. Отмеченное существенно видоизменяет схему напряженно-деформированного состояния металла и делает актуальным проведение соответствующих теоретических и экспериментальных исследований.

Теоретическое исследование напряженного, деформированного и кинематического состояний металла при горячей прокатке особо тонких полос было проведено

на основе метода полей линий скольжения, позволяющего в полной мере учесть двухмерный характер пластического формоизменения и отличающегося высокой степенью своей информативности [2 – 5]. Непосредственное построение теоретических моделей очага деформации в виде полей характеристик в физической плоскости (рис. 1, а), в плоскости годографа скоростей (рис. 1, б), а также в плоскости напряжений (рис. 1, в, г)

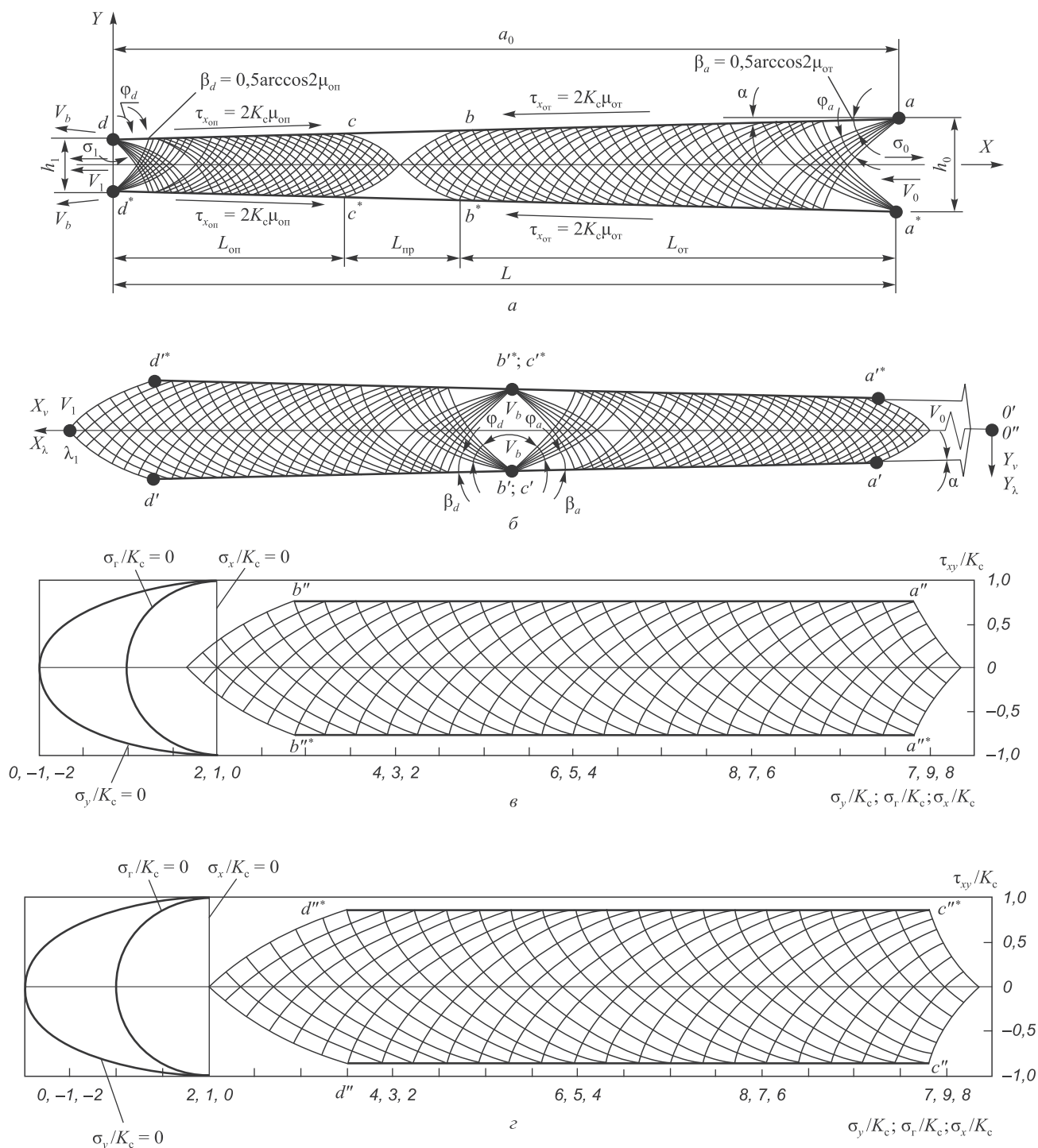


Рис. 1. Поля характеристик в физической плоскости  $XOY$  (а); в плоскости годографа скоростей  $X_\lambda O'Y_\lambda$ , в плоскости деформаций  $X_\lambda O''Y_\lambda$  (б) и в плоскости напряжений для зон отставания (в) и опережения (г) применительно к процессу горячей прокатки относительно тонких полос ( $l_d/h_{cp} = 10,0$ ;  $\alpha = 1,5^\circ$ ;  $\mu_{от} = 0,4$ ;  $\mu_{оп} = 0,42$ ;  $\sigma_1/2K_c = 0$ ;  $\sigma_0/2K_c = 0,175$ )

производили графически и численно с учетом свойств линий скольжения и количественных оценок граничных условий, определяемых характером сопряжения пластически формоизменяемого металла с жесткими средами. При этом, следуя специфике используемого метода и по аналогии с методиками, представленными в работах [2 – 5], в качестве основных допущений было принято следующее:

- пластическая деформация металла является двухмерной и установившейся во времени, при этом граничные условия на контактных поверхностях нижнего и верхнего рабочих валков эквиваленты;

- в качестве моделируемого объекта рассматривается жесткопластический материал, с учетом чего упругими деформациями прокатываемой полосы пренебрегали, а удвоенное значение сопротивления сдвигу ее металла ( $2K_c$ ) было принято постоянным, равным среднеинтегральной количественной оценке по всему объему зоны пластического формоизменения;

- контактные дуги рабочих валков в очаге деформации (рис. 1, а) заменены хордами  $ad$  и  $a^*d^*$  с углами  $\alpha$  наклона к горизонтали, равными половине соответствующих углов  $\alpha_0$  контакта;

- аналитические описания касательных контактных напряжений  $\tau_x$  подчиняются закону  $\tau_x = 2K_c\mu$  [2 – 5] пластического трения, при этом количественные оценки коэффициентов  $\mu_{от}$  и  $\mu_{он}$  пластического трения по длине соответственно зоны отставания  $L_{ab} = L_{a^*b^*} = L_{от}$  и зоны опережения  $L_{ca} = L_{c^*a^*} = L_{он}$  являются постоянными, с учетом чего постоянными, хотя и неравными между собой, являются распределения по длине указанных зон очага деформации и самих касательных контактных напряжений  $\tau_{хот} = 2K_c\mu_{от}$  и  $\tau_{хон} = 2K_c\mu_{он}$  (рис. 1, а).

С учетом принятых допущений и свойств линии скольжения собственно само построение математических моделей очага деформации процесса горячей прокатки относительно тонких полос было сведено к решению четвертой краевой задачи статически определимого плоского течения металла, отличительной особенностью которой является наличие линий скольжения и особых точек  $a$  и  $d$  поля характеристик в физической плоскости (рис. 1, а) и точки  $b'$  поля характеристик в плоскости годографа скоростей (рис. 1, б), в которых характеристики образуют центрированные веера с центральными углами известной величины [3].

Дальнейшую проверку условий реализации теоретических моделей, полученных для различных по величине и варьируемых по сочетанию технологических и конструктивных параметров исследуемого процесса горячей прокатки, а также их количественный анализ, включающий построение полей характеристик в плоскостях деформаций и напряжений (рис. 1, в, г), производили в полном соответствии с методиками, представленными в работах [2 – 5].

Результаты анализа (рис. 2) показали, что в самом общем случае условий реализации процесса горячей

прокатки особо тонких полос и напряженное (рис. 1, в, г и 2, а, б), и кинематическое (рис. 1, б и 2, в), и деформированное (рис. 1, б и 2, г) состояния металла отличаются от однородного как по длине, так и по толщине зоны пластического формоизменения. При этом с увеличением коэффициентов  $\mu_{от}$  и  $\mu_{он}$  показатели степени указанных выше неоднородностей возрастают. Ее увеличение по длине зоны пластического формоизменения металла, характеризующейся наличием максимальных уровней приведенных значений гидростатических  $\sigma_r/K_c$  и нормальных осевых  $\sigma_y/K_c$ ,  $\sigma_x/K_c$  напряжений в районе зоны прилипания, имеет место и при увеличении геометрического параметра очага деформации  $l_d/h_{cp}$  (рис. 2, а, б).

С точки зрения кинематики пластического течения следует указать на то, что текущие значения скоростей  $V_{xj}$  перемещения металла по линиям тока, совпадающим с контактными поверхностями ( $y_j = \pm h_x/2$ ), в рамках зоны отставания несколько превышают, а в рамках зоны опережения несколько ниже аналогичных показателей для линии тока по оси прокатываемой полосы ( $y_j = 0$ ) (рис. 2, в). При этом с увеличением коэффициентов пластического трения рассматриваемая степень несоответствия распределений скоростей по высоте сечений очага деформации возрастает, однако ее количественная оценка в относительном измерении не превышает  $\pm 8\%$ .

Неоднородным по толщине зоны пластического формоизменения металла является и его деформированное состояние, характеризующееся текущими и результирующими значениями степени деформации сдвига  $\Lambda_{xj}$  [5]. В частности, параметр  $\Lambda_{lj} = 1,072$  для линии тока по оси полосы ( $y_j = 0$ ) в рассматриваемом случае (рис. 1, 2), а для линий тока, совпадающих с контактными поверхностями ( $y_j = \pm h_x/2$ ) – величина  $\Lambda_{lj} = 1,788$  (рис. 2, г), то есть степень неоднородности в ее количественном измерении составила  $1,780/1,072 = 1,668$ . Учитывая же, что по оси полосы при симметричных условиях реализации процесса прокатки пластическая деформация металла является монотонной [5], можно говорить о соответствующей количественной оценке коэффициента  $K_{\Lambda 1}$  немонотонности деформации для линий тока, совпадающих с контактными поверхностями. При этом основными определяющими факторами с точки зрения и текущих, и результирующих показателей степени неоднородности и немонотонности деформации металла являются коэффициенты  $\mu_{от}$  и  $\mu_{он}$ , с увеличением которых количественные оценки немонотонности деформации интенсивно возрастают, особенно в диапазоне  $\mu > 0,35$ .

В целом, несмотря на выявленную неоднородность распределений всех основных показателей напряженно-деформированного состояния металла, результаты анализа представленных (рис. 1) и аналогичных им двумерных теоретических моделей очага деформации показали, что при горячей прокатке особо тонких

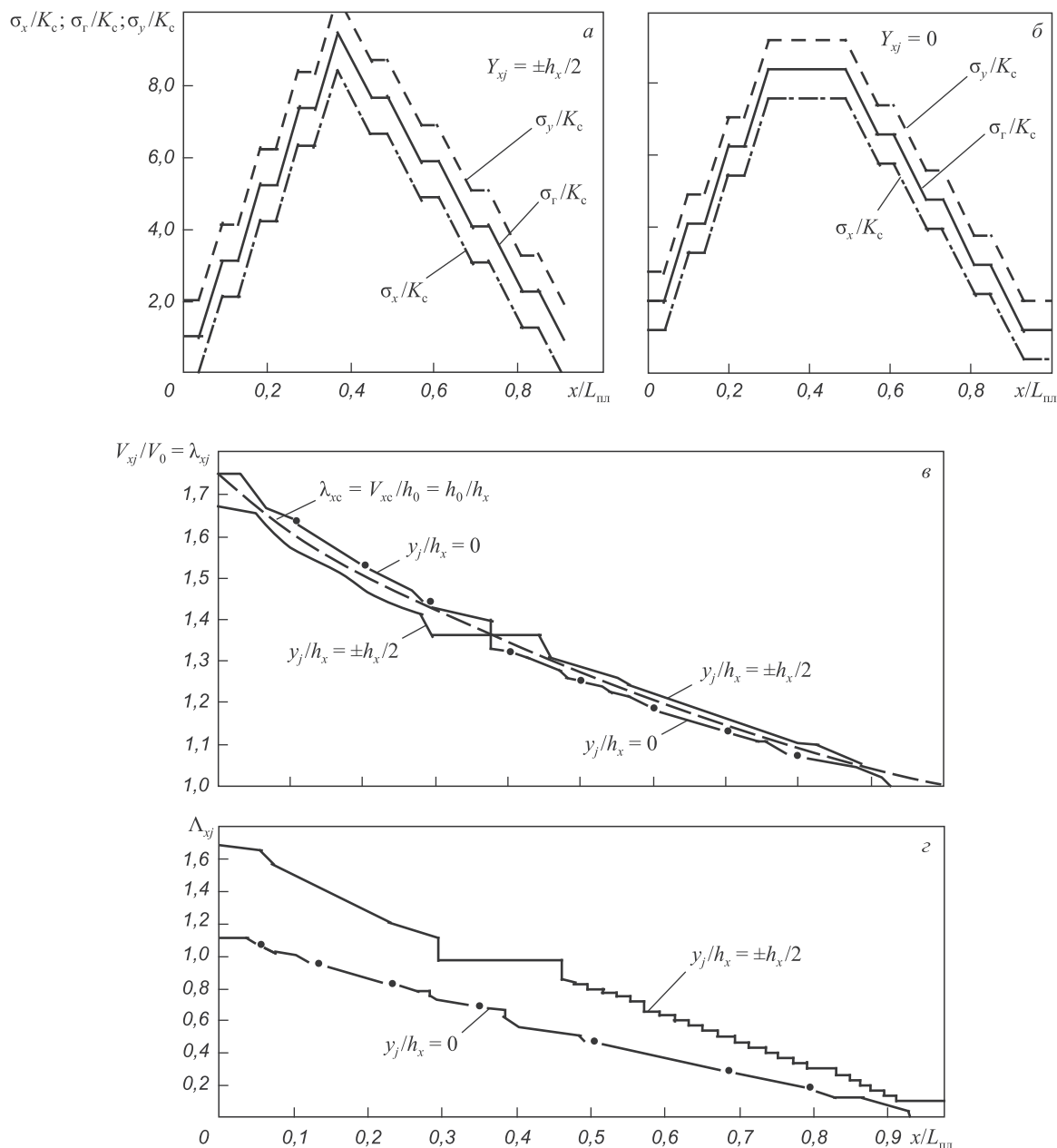


Рис. 2. Расчетные распределения приведенных значений нормальных осевых  $\sigma_x/K_c$ ,  $\sigma_y/K_c$  и гидростатических  $\sigma_r/K_c$  напряжений по длине линий тока на контактной поверхности (а) и по оси (б) прокатываемой полосы; приведенного значения осевой составляющей скорости  $V_{sj}/V_0$  перемещения (в) и степени деформации сдвига (г) по длине линии тока на контактной поверхности и по оси прокатываемой полосы

и тончайших полос, то есть при выполнении условия  $l_d/h_{cp} > 6,0$ , интенсивности изменений нормальных осевых напряжений  $\sigma_y$  составляющей и скоростей пластического течения  $V_x^y$  по высоте сечений зоны пластического формоизменения являются крайне незначительными (рис. 3). В частности, в рамках рассмотренного примера (рис. 1, 2) относительная разность среднеинтегральных по длине линий тока на контактной поверхности ( $y_j/h_x = \pm 0,5$ ) и по оси ( $y_j/h_x = 0$ ) прокатываемой полосы значений приведенных нормальных осевых напряжений  $\sigma_{y_{сж}}/K_c$  составила  $\delta\sigma_{y_{сж}} = 1,35\%$  (рис. 3, а). Аналогичные показатели для соответствующих среднеинтегральных значений приведенных скоростей перемещения  $V_{x_{сж}}/V_{xc}$  составили  $\delta V_{x_{сж}} = 8\%$  по длине зоны

отставания и  $\delta V_{xc} = -7,8\%$  по длине зоны опережения (рис. 3, б). По длине же всей зоны пластического формоизменения количественная оценка исследуемого относительного показателя степени кинематической неоднородности по абсолютной величине не превысила 1%.

Отмеченное подтверждает правомерность использования в рамках численных математических моделей процесса горячей прокатки особо тонких полос допущений об однородных распределениях по высоте каждого отдельного поперечного сечения очага деформации  $\sigma_{y_{сж}} = \sigma_y$  нормальных осевых напряжений и скоростей  $V_{x_{сж}} = V_x$  перемещения, то есть использование гипотезы плоских сечений с точки зрения кинематики

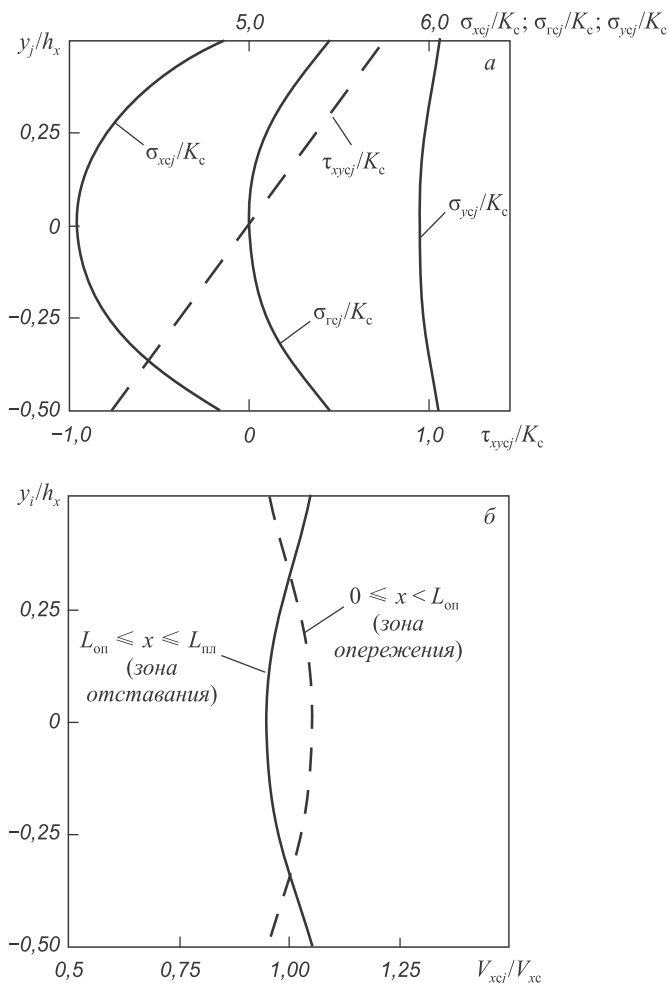


Рис. 3. Расчетные распределения по толщине прокатываемой полосы среднеинтегральных по длине соответствующих линий тока приведенных значений основных компонент напряженного состояния (а) и скоростей перемещения (б) пластически формоизменяемого металла

пластического формоизменения металла является в этом случае вполне обоснованным и в количественном, и в качественном отношениях.

**Выводы.** Выполненный на основе численной интерпретации метода полей линий скольжения двухмерный анализ механизма формирования напряженного, деформированного и кинематического состояний металла при горячей прокатке особо тонких ( $l_d/h_{cp} > 6$ ) полос позволил установить, что степени неоднородности и распределений по толщине нормальных осевых напряжений  $\sigma_y$  и осевой составляющей скорости  $V_x$  пластического течения не превышают 8 %, в то время как относительное изменение нормальных осевых напряжений  $\sigma_x$ , обусловленное дополнительным влиянием касательных компонент девиатора напряжения  $\tau_{xy}$  является значимым и может достигать 25 % и более. Значительным в этом случае является влияние характера распределения граничных условий по длине зоны пластического формоизменения металла.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Коновалов Ю.В. – В кн.: Справочник прокатчика. Производство горячекатаных листов и полос: В 2-х кн. Кн. 1. – М.: Теплотехник, 2008. – 640 с.
2. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – М.: Гостехтеорлитиздат, 1956. – 407 с.
3. Томленов А.Д. Теория пластического формоизменения металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
4. Соколовский В.В. Теория пластичности. – М.: Высшая Школа, 1968. – 608 с.
5. Потапкин В.Ф. – В кн.: Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА. 2002. С. 145 – 165.

© 2012 г. А.В. Сатонин, С.С. Настоящая, В.А. Переходченко  
Поступила 26 сентября 2011 г.

УДК 669.781:536.7

**В.И. Бердников, Ю.А. Гудим**

ООО «Технология металлов»  
Южно-Уральский государственный университет

**АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
КОНДЕНСИРОВАННЫХ КАРБИДОВ**

Выплавка ферросплавов углеродотермическим методом непременно сопровождается образованием в металлической ванне карбидных химических соединений типа  $Me_m C_l$ , где Me и C – символы соответствующего металлического элемента и углерода; m, l – стехиометрические коэффициенты.

Изучение таких процессов методом многокомпонентного термодинамического анализа [1] требует обязательного учета термодинамического равновесия между

металлической и газовой фазами в соответствии с химическими реакциями

$$Me_m C_{l(k)} = Me_m C_{l(r)}; \tag{1}$$

$$Me_m C_{l(r)} = mMe_{(r)} + lC_{(r)}. \tag{2}$$

Здесь и далее индексы «к» и «г» – символы конденсированного и газообразного состояния компонента.