

*Канд. техн. наук, профессор Федоринов В.А.
докт. техн. наук, профессор Сатонин А.В.
аспирант Дворжак В.В.
канд. техн. наук, ст. преп. Сатонин А.А.
(ДГМА, г. Краматорск, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СДВОЕННОЙ ПРОКАТКЕ ЛЕНТ И ПОЛОС

Наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень напружено-деформованого стану металу і енергосилових параметрів, а також виконано порівняльний аналіз процесу здвоєної холодної прокатки.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В условиях реконструкции действующих и создания новых производств весьма немаловажными требованиями являются минимализация удельных капитальных затрат, расширение сортамента, снижение сроков промышленного освоения, а также необходимость увеличения объемов производства наиболее эффективных типоразмеров.

Тонкие и тончайшие холоднокатаные ленты и полосы различного состава, геометрии и назначения характеризуются высокими уровнями потребительских свойств. В настоящее время существует достаточно большое количество технологий и оборудования по производству данного вида металлопродукции, таких как двадцати валковые станы, Y, MKW и Z-станы, наряду с их специфичностью, отличающихся высокими капитальными затратами и эксплуатационными расходами и сравнительно малой производительностью[1]. Поэтому необходим альтернативный способ производства лент и полос данного типоразмера позволяющий максимально использовать оборудования существующих реверсивных станов с доведением их до соответствующего уровня при минимально возможных затратах. Одним из способов получения особо тонких полос, альтернативным существующим, является процесс сдвоенной прокатки, заключающийся в одновременной деформации двух полос [2].

Анализ исследований и публикаций. В работах [2, 3] показано, что при сдвоенной прокатки полос на непрерывном стане возможно

увеличение производительности стана на 30-40%. При этом успешно могут быть решены актуальные вопросы холодной прокатки особо тонких полос, экономии металла, специализации станов, резкого снижения удельных энергетических затрат. Однако реализация данного способа прокатки требует специальных технологий и оборудования для раздельного регулирования их толщин. Поэтому в работе [4] предложено более целесообразное использование этого способа на реверсивных станах, а также проведены теоретические и экспериментальные исследования энергосиловых параметров при прокатке сдвоенных полос, которые показали эффективность данной технологии.

Постановка задачи. Вместе с тем наличие на данное время узкой специализации и недостаточно полной изученности процесса сдвоенной холодной прокатки делает необходимым и актуальным проведение всесторонних комплексных исследований. Поэтому целью данной работы является исследование напряженного состояния металла при реализации процесса прокатки сдвоенных лент и полос, что даст возможность произвести анализ уровня снижения энергетических затрат, используемого при оценке экономической эффективности данной ресурсосберегающей технологии, а также анализ возможностей расширения тонкого сортамента на реверсивном стане.

Изложение материала и его результаты. Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке сдвоенных лент и полос на основе численного математического моделирования. При этом для выбора корректных аналитических описаний граничных условий очага деформации, в качестве которых рассматривают соответствующие распределения геометрических параметров, механических свойств и условий внешнего трения, был выполнен предварительный анализ условий деформации при симметричном обжатии двух полос. Предварительно проведенные, в связи с этим, опыты показали, что условие смазки контактных поверхностей раздела, а также незначительная неравномерность механических свойств, практически не оказывают влияния на среднее давление в очаге деформации. Это позволяет предположить, что на плоскостях раздела полос существует зона прилипания с нулевым значением сил трения τ в критическом сечении и максимальными (коэффициент трения $\mu = 0,5$) в вертикальных границах очага деформации.

В основу математического моделирования НДС, имеющего место при сдвоенной холодной прокатке относительно тонких ($L/h_{cp} \geq 3,0$) лент и полос было положено численное рекуррентное решение конечно-разностной формы условий статического равновесия выделенных i -ых элементарных объемов, полученных путем разбиения всей протяженности очага деформации на их конечное множество (рис. 1а) [5].

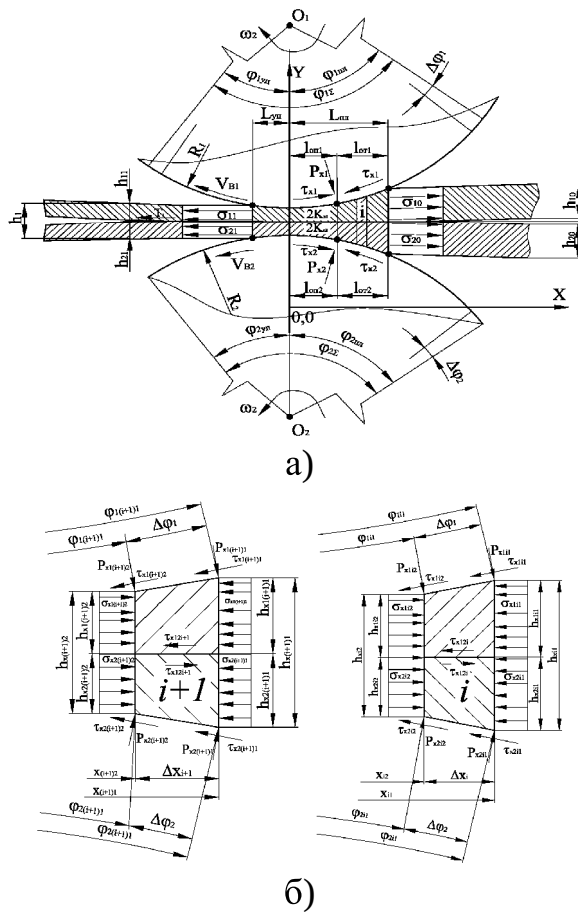


Рисунок 1 – Расчетные схемы интегрального очага деформации (а) и выделенных элементарных объемов (б) применительно к математическому моделированию процесса сдвоенной прокатки относительно тонких лент и полос

зон и пластического $L_{пл}$ и упругого $L_{уп}$ формоизменения прокатываемой композиции (см. рис. 1а) [6].

С учетом характера принятых допущений и конечно – разностной формы представления основных компонент НДС (см. рис. 1б) условия статического равновесия каждой отдельной составляющей, рассматриваемой в рамках выделенного i -го элементарного объема зоны пластического формоизменения, примут следующий вид:

$$\begin{aligned} & \sigma_{x1i2}h_{x1i2} - \sigma_{x1i1}h_{x1i1} - 0,5(p_{xi1}f_{x1i1} + p_{xi2}f_{x1i2})\Delta X_i \pm \\ & \pm \tau_{x12i}\Delta X_i + 0,5(p_{xi1} + p_{xi2})(h_{x1i1} - h_{x1i2}) = 0; \\ & \sigma_{x2i2}h_{x2i2} - \sigma_{x2i1}h_{x2i1} \pm \tau_{x21i}\Delta X_i - \\ & - 0,5(p_{xi1}f_{x1i1} + p_{xi2}f_{x1i2})\Delta X_i + 0,5(p_{xi1} + p_{xi2})(h_{x2i1} - h_{x2i2}) = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

Непосредственно схема первоначального численного разбиения интегрального очага деформации (см. рис. 1а) и определения геометрических характеристик каждого отдельного i -го элементарного объема (см. рис. 1б), предполагающая анализ процесса сдвоенной прокатки, была принята полностью по аналогии с методикой работы [5]. Аналогично работе [5] являлся и характер принятых допущений.

Учет упругого сплющивания рабочих валков в рамках данной математической модели осуществляли на основе численной интерпретации методики И.Я. Штаермана, позволяющей в полной мере учесть реальный характер распределений данных напряжений по длине

где согласно условию $V_{xj} = V_x$ и соотношениям, вытекающим из закона сохранения объема $h_{xj}V_{xj} = h_{j0}V_{j0} = h_{j1}V_{j1}$; $h_xV_x = h_0V_0 = h_1V_1$, текущие значения каждой отдельной j -ой составляющей могут быть определены как $h_{xji1} = h_{j0} h_{xi1} / h_0$, $h_{xji2} = h_{j0} h_{xi2} / h_0$.

Просуммировав уравнения (1) и исходя из равенства по абсолютной величине и векторной противонаправленности сдвиговых межслойных напряжений, получим:

$$\sum_{j=1}^2 \sigma_{xji2} h_{xji2} - \sum_{j=1}^2 \sigma_{xji1} h_{xji1} - 0,5[p_{xi1}(f_{x1i1} + f_{x2i1}) + p_{xi2}(f_{x1i2} + f_{x2i2})]\Delta X_i + 0,5(p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} - h_{xi2}) = 0. \quad (2)$$

С учетом используемого инженерного варианта условия пластичности ($\sigma_{xj} = p_x - 2K_{xj}$), а также с учетом известных согласно условиям связи используемой рекуррентной схемы решения значений нормальных контактных p_{xi1} и нормальных осевых σ_{xji1} напряжений для начального граничного сечения выделенного i -го элементарного объема (см. рис. 1б), выражение (2) представляет собой уравнение с одной неизвестной величиной нормальных контактных напряжений p_{xi2} , по отношению к которым в окончательном виде имеем:

$$p_{xi2} = \frac{\left\{ 2 \sum_{j=1}^2 (2K_{xji2} h_{xji2} + \sigma_{xji1} h_{xji1}) - p_{xi1} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{x1i1} + f_{x2i1}) \Delta X_i] \right\}}{[h_{xi1} + h_{xi2} - (f_{x1i2} + f_{x2i2}) \Delta X_i]} \quad (3)$$

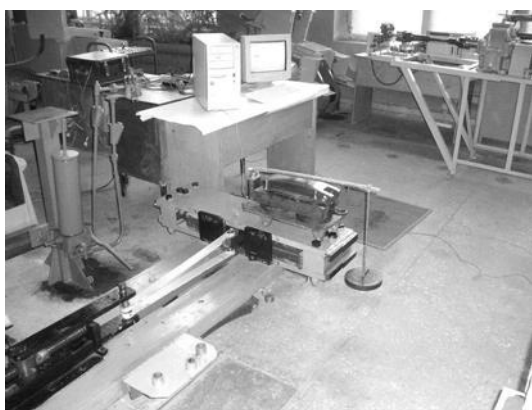
где текущие по длине очага деформации удвоенные значения сопротивления сдвигу $2K_{xji2}$ для каждой j -ой составляющей определяются, аналогично методикам работ [5], аналитической зависимостью для холодной прокатки.

Представленные аналитические зависимости (1-3), в сочетании с начальными условиями и условиями связи, аналогичными работе [5] и были положены в основу численного рекуррентного решения по автоматизированному расчету локальных характеристик НДС в зоне пластического формоизменения очага деформации процесса сдвоенной прокатки относительно тонких лент, листов и полос.

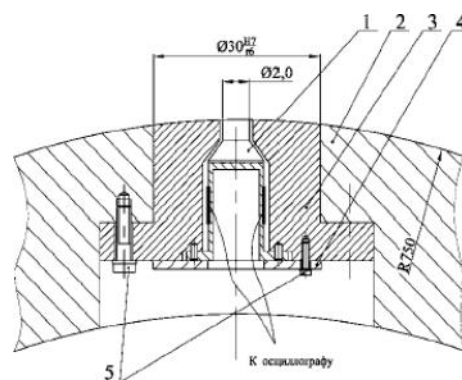
Экспериментальные исследования локальных характеристик напряженного состояния металла при прокатке сдвоенных полос были проведены путем физического моделирования данной технологической схемы на специальном устройстве для пластической деформации с рабочими сегментами радиусом 750 мм (рис. 2 а) [7].

Измерение текущих по длине очага деформации значений нормальных контактных напряжений, следуя методикам работ [8], производили при помощи штифтовых месдоз 1, (рис. 2 б), размещенных и за-

фиксированных в телах соответствующих рабочих сегментов 2 посредством промежуточных стаканов 3, крышек 4 и резьбовых соединений 5 (см. рис. 2 б). На внешней поверхности кольцевой части месдозы были наклеены тензодатчики сопротивления, которые и воспринимают действие нормальных контактных напряжений. Благодаря использованию деформирующего инструмента большого радиуса соотношение общей протяженности очага деформации L к диаметру штифтов используемых месдоз $d_{ш} = 2,0$ мм находилось в диапазоне $L/d_{ш} = 20...35$, что вполне отвечает требованиям, предъявляемым к точности соответствующих экспериментальных исследований [8].



а)



б)

Рисунок 2 - Общий вид устройства для пластической деформации [7] (а) и конструкция узла штифтовых месдоз (б)

Экспериментальные исследования энергосиловых параметров (и точности геометрических характеристик) холоднокатаных лент, полученных при реализации процесса сдвоенной прокатки, были проведены на лентопрокатном лабораторном стане 100х100Г Донбасской государственной машиностроительной академии, общий вид которого иллюстрирован рисунком 3.

Измерительные цепи силы прокатки для приведенных экспериментальных исследований тарировали путем имитационного нагружения месдоз силой известной величины на специальной рычажно-шарнирной установке [7] для устройства пластической деформации и на гидравлических прессы для стана 100х100Г [8], а измерительные цепи моментов – путем имитационного нагружения универсальных шпинделей крутящими моментами, создаваемых при заторможенном приводе с помощью консольных рычага и наборов грузов [8].

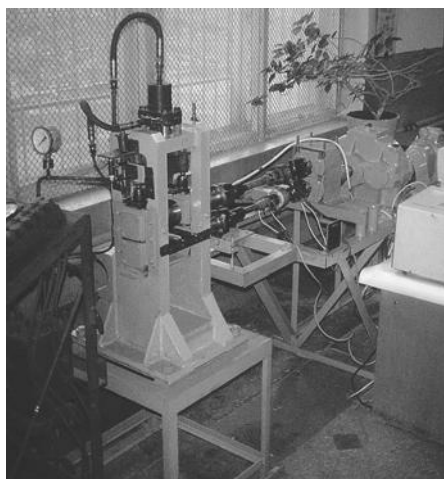


Рисунок 3 – Общий вид оборудования лабораторного прокатного мини-стана 100х100 Г Донбасской государственной машиностроительной академии

Запись регистрируемых параметров и расшифровку полученных осциллограмм производили при помощи во всех вышеприведенных случаях производили при помощи ЭВМ со встроенным аналого-цифровым преобразователем АЦП-ADC16-32 в соответствии с методиками работы [9] и с использованием полученного тарировочного графика. Обработку экспериментальных данных производили в соответствии с работой [11].

На рисунке 4 представлены расчетные и эмпирические, полученные применительно к устройству пластической деформации p_x распределения нормальных контактных напряжений при деформации одинарных и двойных образцов с варьируемой по толщине величиной относительного обжатия ϵ . А на рисунке 5 а, б расчетные и экспериментальные распределения значений силы P и момента M при прокатке тонких сдвоенных и одинарных лент полученные применительно к промышленно-лабораторному стану 100х100Г.

Анализируя представленные эмпирические и расчетные распределения (см. рис. 4, 5) можно сделать вывод, что результаты экспериментов подтверждают основные теоретические выкладки и результаты проводимых ранее экспериментов [4]:

- вследствие высоких уровней соотношений $L/h_{cp} = 6,0 \dots 15,0$, обуславливающих доминирующее влияние контактных сил внешнего трения, эпюры эмпирических распределений p_x имеют ярко выраженную куполообразную форму с максимумом в районе нейтральных сечений, то есть в районе сопряжения зон отставания и опережения (см. рис. 4 а, б);

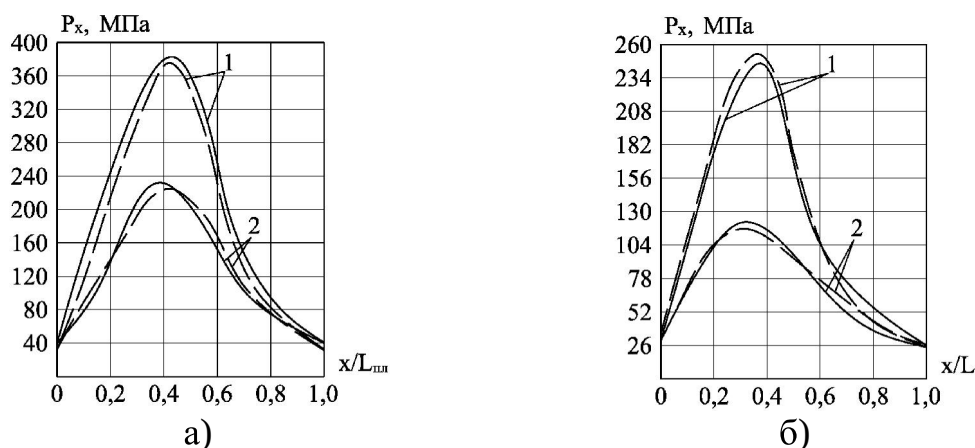


Рисунок 4 – Расчетные (—) и эмпирические (---) распределения нормальных контактных напряжений при пластической деформации одинарных 1 ($h_0 = 2,0$ мм) и двойных 2 ($h_{0\Sigma} = 2h_0 = 4,0$ мм) листовых заготовок из свинца С 1, (а)- $\epsilon = 0,34$; (б)- $\epsilon = 0,25$; $B = 80$ мм; $R = 750$ мм

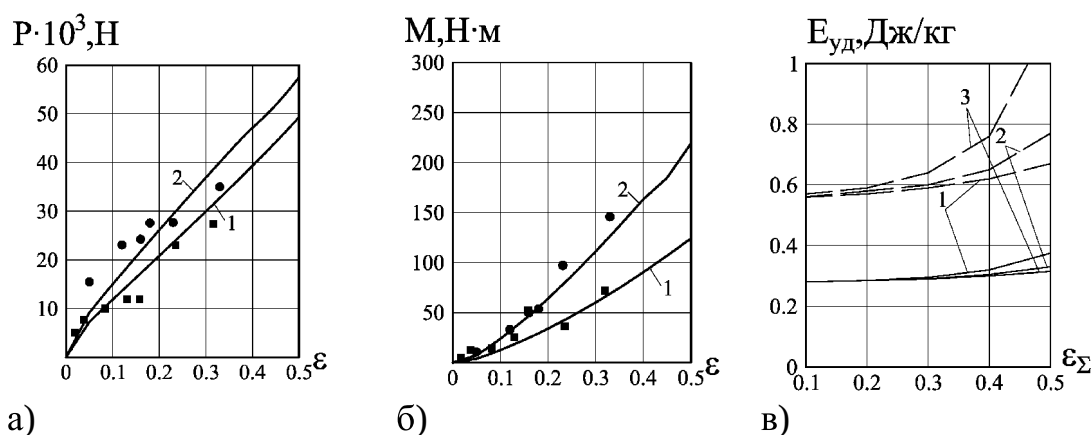


Рисунок 5 – Расчетные (—) и эмпирические распределения значений силы P (а) и момента M (б) при прокатке одинарных (■), а также сдвоенных (●) лент (материал – сталь 20, $R = 50$ мм, $\epsilon = 0,02...0,5$; 1- $h_0 = 3,33$ мм, (2- $h_{0\Sigma} = 2h_0 = 6,66$ мм), а также расчетные распределения удельной энергоёмкости при расчете на одну полосу $E_{уд}$ (в) процесса прокатки относительно тонких сдвоенных (—) и одинарных (---) полос в зависимости от величины относительного обжатия ϵ ($B = 80$ мм; $R = 75$ мм; 1- $h_0 = 0,5$ мм; 2- $h_0 = 1$ мм; 3- $h_0 = 2$ мм)

- при прокатке одинарных образцов максимальные значения нормальных контактных напряжений $p_{x \max}$ в 1,6...2,1 раза больше, а их среднеинтегральные значения p_{xc} в 1,15...1,4 раза больше, чем при прокатке тех же образцов в сдвоенном варианте;

- с увеличением относительных обжатий ε уровни нормальных контактных напряжений p_x существенно возрастают, а их разница при прокатке одинарных и двойных образцов в абсолютном измерении увеличивается, при этом геометрическая координата их максимумов смещается в сторону выхода из рабочих валков;

- анализ полученных распределений расчетных и эмпирических значений силы P и момента M прокатки показал, что с увеличением относительного обжатия энергосиловые параметры процесса прокатки как сдвоенных лент, так и одинарных, интенсивно возрастают (см. рис. 5 а, б). При этом абсолютное значение разницы значений данных характеристик при прокатке одинарных и сдвоенных образцов увеличивается, что обусловлено увеличением длины очага деформации L при прокатке сдвоенных лент;

- значение силы прокатки сдвоенных заготовок в 1,12...1,24 раза больше, чем при прокатке одинарных лент в данном диапазоне обжатий, а в среднем значение разницы данных показателей больше в 1,19 раз. Для момента прокатки полученные значения составляют 1,2...2 и 1,5, соответственно.

Кроме того, с целью оценки экономической эффективности рассматриваемая математическая модель включает в себя расчет удельной энергоемкости процессов прокатки одинарных и двойных полос, соответственно. Из анализа расчетных распределения (см. рис. 5 в) можно сделать вывод, что удельная энергоемкость при расчете на одну полосу $E_{уд}$ процесса прокатки относительно сдвоенных в 2,6...2,3 раза меньше, чем при прокатке одинарных полос.

Выводы и направление дальнейших исследований. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований локальных и интегральных характеристик процесса сдвоенной холодной прокатки установлено, что реализация процесса сдвоенной прокатки позволяют при прочих равных условиях снизить максимальные уровень силы прокатки в 1,12...1,24 раза, что в свою очередь способствует снижению удельной энергоемкости процесса прокатки, которая при расчете на одну полосу в 2,6...2,3 раза меньше, а также обеспечивает возможность расширения сортамента за счет выкатываемости лент и полос минимального типоразмера. Поэтому в дальнейшем необходимо разработать практические рекомендации по применению данной технологии к оборудованию реверсивных станов холодной прокатки.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров, а также выполнен сопоставительный анализ процесса сдвоенной холодной прокатки лент и полос.

The results of theoretical and experimental investigations the metal stress-deformed condition and energy-power parameters are presented as well as associate examination of double cold rolling process are realized.

Библиографический список.

1. Управление качеством тонколистового проката / В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, Н.Ю. Приходько, А.Н. Яценко. – К.:Техніка. – 1997. – 384с.
2. Технология производства листовой стали, обеспечивающая резкое повышение производительности станов / С.Д. Адамский, В.И. Мелешко, А.П. Качайлов и др. // Теория и практика производства широкополосной стали: Сб.науч.тр. МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1979. №4. С. 54-57.
3. Адамский С.Д., Шевченко А.И. Регулирование толщины каждой полосы при холодной прокатке дублированных полос на непрерывном стане // Технология прокатки и отделки широкополосной стали: Сб.науч.тр. МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1981. №4. С. 45-47.
4. Николаев А.В. Энергосиловые параметры прокатки наложенных полос // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 9, 10. – С. 27-29.
5. Потапкин В.Ф., Сатонин А.В., Сатонин А.А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при реализации процессов плакирования и прокатки многослойных полиметаллических листов и полос // Известия ТулГУ. - Тула: ТулГУ, Вып. 1. - 2004. – С.77-85.
6. Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. – М. – Л.: Гостеориздат. – 1949. – 270 с.
7. Устройство для пластической деформации металла: А.с. 1380814 СССР, МКИ В 21 В 31/00. / В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, А.В. Сатонин, В.П. Орел (СССР).- №4137489; Заявлено 21.10.86; Оpubл. Бюл. №10, 1988. - С. 37.
8. Чекмарев А.П. Методы исследования процессов прокатки / А.П. Чекмарев, С.А. Ольдзиевский.. – М.: Металлургия, 1969. – 274 с.
9. Петренко А.М., Кувшинов В.В. Основы научных исследований и техника эксперимента: Учеб. пособие / М.: МАДИТУ. –1999. – 92 с.