

*к.т.н. Данько А.В.,
к.т.н. Данько В.М.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ ЛИСТОВ С НИЗКИМ ОЧАГОМ ДЕФОРМАЦИИ

Наведено результати зіставлення реального поля напруг при прокатці в низькому осередку деформації і загальноприйнятих теоретичних уявлень про це поле.

***Ключові слова:** прокатка, осередок деформації, поле напруг, експериментальні граничні умови, рівняння Кармана.*

Приведены результаты сопоставления реального поля напряжений при прокатке в низком очаге деформации и общепринятых теоретических представлений об этом поле.

***Ключевые слова:** прокатка, очаг деформации, поле напряжений, экспериментальные граничные условия, уравнение Кармана.*

В настоящее время в теории прокатки принято считать, что напряженное состояние при прокатке широких листов на гладкой бочке с низким очагом деформации изучено достаточно хорошо, особенно при установившемся процессе. Однако большинство выводов было получено на основе решения одномерного уравнения Т. фон Кармана [1] с различными уточнениями, касающимися размеров и положения зоны прилипания [2,3]. В основе всех этих решений лежит ряд предположений, степень соответствия которых действительности экспериментально проверить очень трудно, т.к. не существует точных способов измерения напряжений внутри пластической области. Однако важность такой проверки не вызывает сомнений, т.к. одномерные решения широко используются при разработке новых технологий листовой прокатки. Поэтому задача определения реального поля напряжений при указанных выше условиях и сравнение его с принятыми теоретическими положениями представляется весьма интересной и актуальной. Но проблема состоит в экспериментальном определении поля напряжений при прокатке с низким очагом деформации, когда параметр $l_d/h_{cp} > 2$.

Анализ доступных литературных источников показал, что существует подход, при котором поля напряжений в металле находятся какими либо аналитическими методами по статическим граничным усло-

вия (напряжениям на поверхности деформируемого тела), найденным экспериментально. Последнее в настоящее время возможно с достаточно высокой степенью точности. Этот подход для случая плоской деформации был использован в работе [4]. В ней контактные напряжения при листовой прокатке измерялись методом штифтовых месдоз, и по полученным данным находилось распределение сопротивления сдвигу k вдоль дуги контакта. Затем определялось усредненное значение k в зонах отставания и графически строились сетки линий скольжения (СЛС) с использованием экспериментальных граничных условий по напряжению (τ/k). По ним находились распределения нормальных σ_n и касательных τ_k напряжений на контактной поверхности. Однако дальнейшего развития этот направление не получило.

В отличие от этого метода, в работе [5] СЛС строились численным методом с усредненным в очаге деформации значением $k_{ср}$, которое определялось по реологическим кривым металла. Контактные напряжения находились поляризационно-оптическим методом. Для преодоления принципиального недостатка метода линий скольжения – необходимости принимать сопротивление сдвигу k постоянным в очаге деформации, был разработан метод построения СЛС с неравномерным распределением k по длине низкого очага деформации [6]. Суть его в следующем: очаг деформации разбивается на достаточно большое число сечений линиями, параллельными оси Y , проходящими через точки контактных поверхностей валков, в которых экспериментально определены σ_n и τ_k . При определении среднего нормального напряжения σ_0 и угла наклона α -линий θ на контактной поверхности учитывается возникновение разрывов напряжений вдоль границ сечений с разными k . Поскольку вдоль линии разрыва напряжений возможен разрыв только нормального напряжения, совпадающего с направлением линии разрыва, то разрыв претерпевает только σ_y , а напряжения σ_x и τ_{yx} непрерывны. Это позволяет численно строить непрерывное поле напряжений в каждом i -том сечении, в котором компонента σ_y разрывна на границах сечений. Вследствие этого при переходе через границу сечений угол θ изменяется в зависимости от соотношения k_i/k_{i+1} по [7]. Распределение сопротивления сдвигу k по длине очага деформации находилось численно, разбиением очага деформации на достаточно малое количество участков, в каждом из которых находилась k по экспериментально найденным контактным нормальным и касательным напряжениям, условию равновесия по оси X и условию пластичности Губера-Мизеса, в предположении неизменности напряжений и k по высоте полосы [8].

Таким образом, были созданы средства для анализа полей напряжений при прокатке в низком очаге деформации по экспериментально найденным статическим граничным условиям.

Экспериментальные значения контактных напряжений поляризационно-оптическим методом были получены при прокатке свинца марки С1 в лаборатории физического моделирования процессов ОМД НМетАУ (руководитель - д.т.н., проф. Шломчак Г.Г). Опытные значения контактных напряжений, полученных методом штифтовых месдоз при прокатке свинца и стали, взяты из работы [7].

В качестве примера на рис.1 показано распределение контактных напряжений (вход в очаг деформации – слева), а также продольных подпирющих напряжений σ_x и сопротивления сдвигу k , найденных в соответствии с методикой работы [8] (поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp}=5,7; \epsilon=52,6\%$).

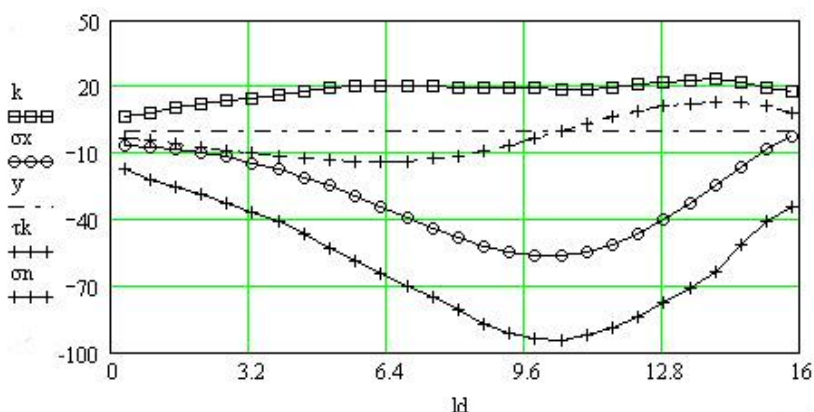


Рисунок 1 – Распределение напряжений и k по длине очага деформации ($k = 6,2-23,6$ МПа)

Из рис.1 видно, что распределения k по длине очага деформации l_d весьма неравномерно: упрочнение металла увеличивается по мере приближения к нейтральному сечению, несколько спадая в самом нейтральном сечении, и уменьшается к выходу из валков. Диапазон изменения k – от 6,2 до 23,6МПа.

На рис.2 приведена СЛС для данного случая (поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp}=5,7; \epsilon=52,6\%$), построенная численно по методике [6].

Распределения компонент напряженного состояния по длине и высоте очага деформации показаны на рисунке 3. Значения напряжений вычислялись только в узлах сетки, поэтому их изменение по высоте отображено послойно: первый слой – это контактная поверхность, 2-й – линия, проходящая по узлам под контактной поверхностью и т.д.

Из рис.3 видно, что нормальное напряжение σ_y по высоте практически не меняется.

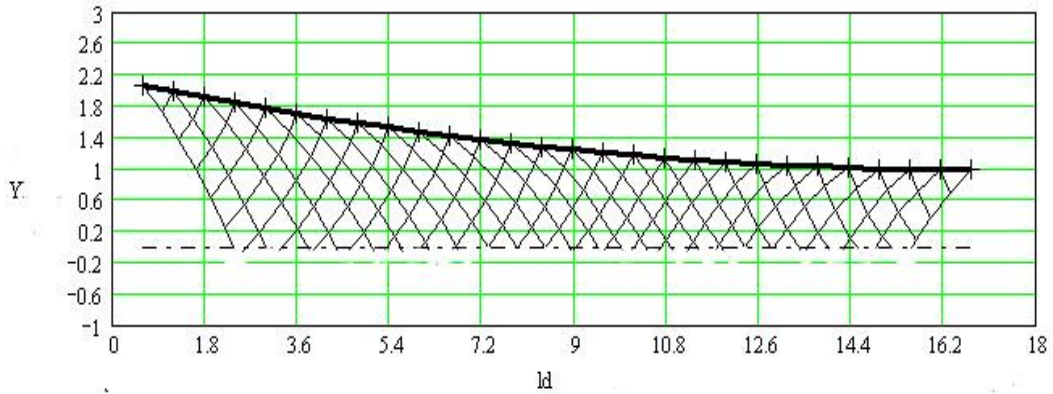


Рисунок 2 – Сетка линий скольжения
(поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp} = 5,7; \varepsilon = 52,6\%$;))

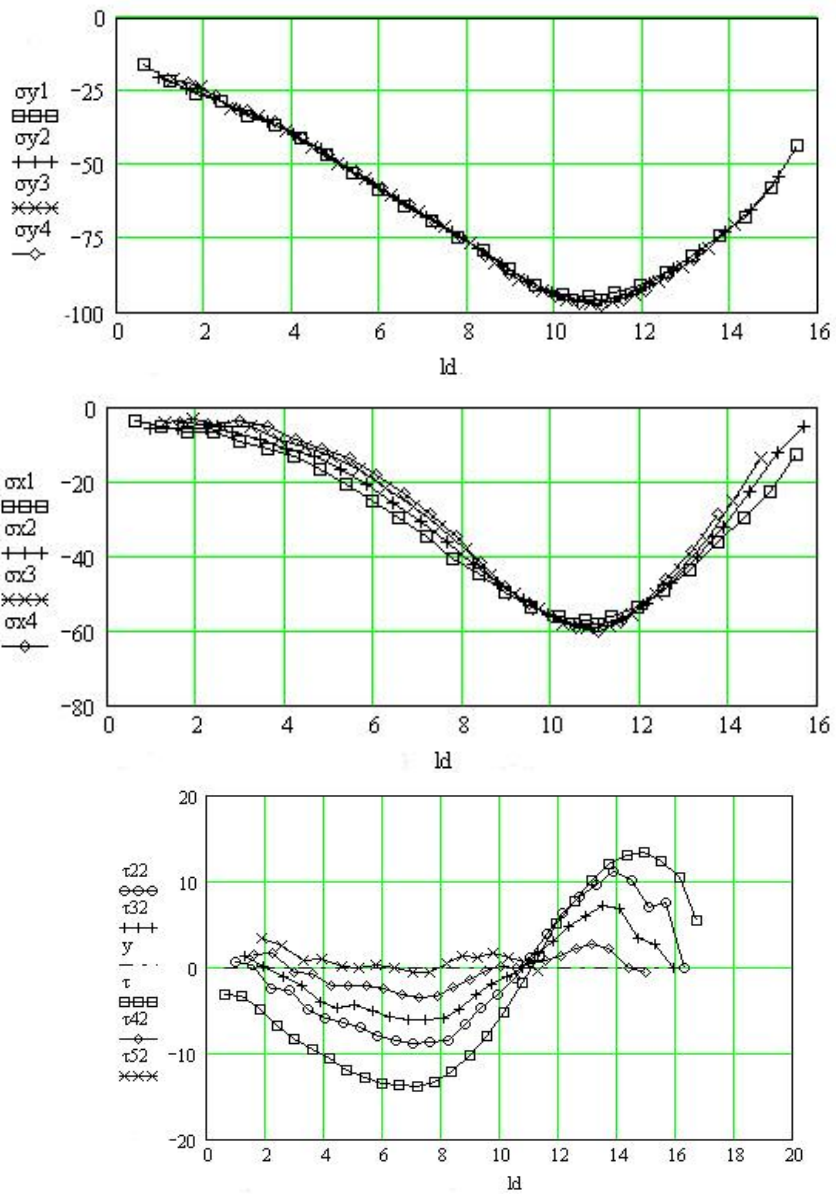


Рисунок 3 – Распределение напряжений по длине очага деформации

Продольные напряжения σ_x также не меняются по высоте в районе «нейтрального сечения», если под таковым понимать точку изменения знака касательных контактных напряжений τ_k . Однако имеется заметная разница по высоте в величине σ_x в других сечениях, особенно на выходе из очага деформации.

Более сложный характер имеет распределение касательного напряжения τ_{yx} . В зоне опережения по мере приближения к оси симметрии величина τ_{yx} уменьшается, а форма кривой остается подобной распределению на контакте. Возле оси симметрии она спрямляется. На оси симметрии все слои имеют нулевое значение. В зоне отставания τ_{yx} по величине несколько больше, и на выходе из валков слои, близкие к оси симметрии, меняют свой знак.

Полученные численные значения компонент поля напряжений представлены в таблице 1. В качестве примера приведены значения напряжений в части СЛС на входе в очаг деформации (поляризационно-оптический опыт).

Таблица 1 – Значения компонент тензора напряжений в узлах сетки, МПа

$$(l_d/h_{cp}=5,7; \varepsilon = 52,6\% , k = 6,2 \div 23,6)$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\sigma_x =$	1	-3.819	-5.356	-6.565	-6.55	-9.34	-11.038	-13.22	-16.566	-20.842
	2	-5.821	-5.517	-5.759	-6.538	-8.644	-11.018	-13.23	-16.676	-20.981
	3	-4.483	-3.465	-5.093	-5.363	-8.556	-10.978	-13.48	-16.978	-21.874
	4	-4.288	-4.843	-3.917	-5.426	-8.596	-11.303	-13.939	-18.15	-23.355
	5	-3.913	-3.584	-5.157	-6.995	-10.73	-13.22	-16.188	-20.446	-25.829

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\sigma_y =$	1	-15.792	-21.374	-25.683	-28.37	-33.593	-36.752	-40.942	-46.254	-52.725
	2	-20.241	-23.885	-27.439	-31.826	-35.621	-39.948	-44.916	-51.094	-56.775
	3	-20.785	-23.7	-30.76	-33.668	-38.69	-43.793	-49.417	-54.792	-60.621
	4	-22.487	-26.797	-31.381	-35.137	-40.715	-46.661	-51.947	-57.743	-63.718
	5	-25.195	-28.923	-33.738	-38.032	-44.744	-50.153	-55.268	-60.848	-66.838

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\tau_{yx} =$	1	-1.674	-1.995	-3.315	-5.051	-6.466	-7.482	-8.398	-9.837	-10.567
	2	0.683	0.204	-2.438	-2.634	-4.965	-5.926	-6.475	-6.938	-8.013
	3	1.297	0.017	-1.2	-2.193	-3.972	-4.688	-4.414	-5.045	-5.79
	4	1.384	1.553	-0.539	-0.764	-2.178	-2.136	-2.155	-2.523	-3.271
	5	3.316	2.49	0.75	0.873	0.106	-0.102	0.219	-0.075	-0.559

Следует отметить, что расчет по средней в очаге деформации величине сопротивления сдвигу k_{cp} дает существенно отличные результаты от вышеизложенных. Хотя характер распределения нормальных напряжений качественно совпадает с распределением при переменном k (при меньшем разбросе по высоте), но количественное различие в величине напряжений значительно: в среднем по всему очагу деформации отличие по σ_x от $-31,9\%$ до $631,5\%$ (от $-24,1$ до $14,3$ МПа); по σ_y от $-6,4\%$ до $28,5\%$ (от $-10,0$ до $5,3$ МПа). Столь значительная разница в величине расчетных напряжений σ_x обусловлена тем, что при $k_{cp} = \text{const}$ (k_{cp} определялась как среднеарифметическая величина во всех сечениях очага деформации) в начале очага деформации они положительны (рис.4), что не поддается теоретическому объяснению (натяжение при прокатке отсутствовало).

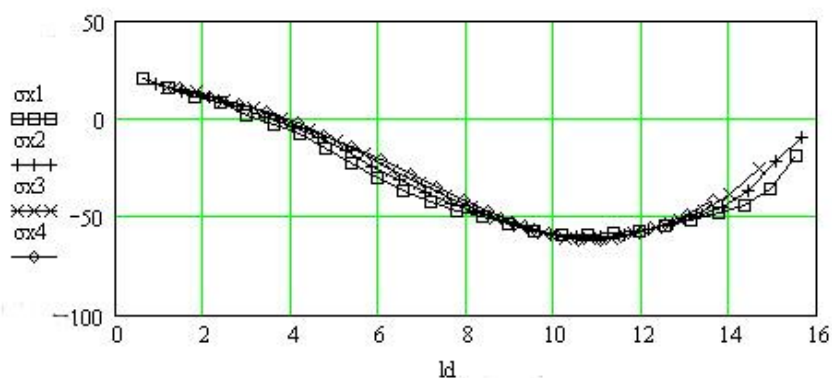


Рисунок 4 – Распределение напряжений σ_x по очагу деформации (поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp}=5,7$; $\varepsilon = 52,6\%$, $k_{cp} = 17,9$ МПа)

Аналогичные результаты получены при прокатке свинца в других опытах поляризационно-оптическим методом и при прокатке стали – методом штифтовых месдоз.

Полученные данные о реальном поле напряжений при прокатке в низком очаге деформации позволяют провести сопоставление с теми допущениями, которые общеприняты в теории прокатки для этого случая.

Описание процесса прокатки в низком очаге деформации, как известно, базируется на уравнении фон Кармана [1]:

$$\frac{dp(x)}{dx} - \frac{k}{y} \frac{dy}{dx} \pm \frac{\tau_k(x)}{y} = 0, \quad (1)$$

где p – среднее удельное усилие на контактной поверхности, МПа;
 τ_k – удельная величина напряжения трения на контакте, МПа.

При выводе и решении этого уравнения, помимо хорошо подтвержденного положения о плоской деформации, принимаются следующие допущения:

1. Сопротивление сдвигу k по очагу деформации постоянно;
2. Нормальные напряжения не изменяются по высоте очага деформации. Отсюда следует гипотеза плоских сечений – горизонтальные скорости частиц по высоте не меняются и сечения не деформируются;
3. Главные оси напряжений во всех сечениях совпадают с вертикальной и горизонтальной осью очага деформации. Отсюда условие Губера-Мизеса приобретает упрощенный вид:

$$p(x) - \sigma_x = 2k. \quad (2)$$

4. Неявно принимается предположение о линейном характере изменения касательного напряжения τ_{yx} от значения τ_k на контакте до нуля на оси симметрии. Это следует из того, что третье слагаемое в (1) является производной по y от линейного закона распределения τ_{yx} . Действительно, из первого уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0,$$

при $\tau_{yx} = \tau_k y/h(x)$ и (2) с учетом кривизны контактной поверхности получается (1).

Из вышеизложенного ясно, что первое предположение сильно огрубляет задачу, т.к. приводит к появлению растягивающих напряжений σ_x , что качественно не соответствует действительности.

Второе предположение в очень высокой степени выполняется для вертикального сжимающего напряжения σ_y . Во всех слоях СЛС величина этого напряжения по оси Y постоянна (рис.3).

Напряжение σ_x не меняется по высоте только в районе «нейтрального сечения» (по-видимому, здесь зона прилипания). Некоторое изменение по высоте в других сечениях можно объяснить их деформацией вследствие наличия значительного градиента касательных напряжений τ_{yx} . Следовательно, гипотеза плоских сечений допустима только в зоне прилипания, которая при низком очаге деформации охватывает незначительную его часть.

Из этого же следует и несостоятельность предположения (2), которое в большей части очага деформации не может не приводить к погрешностям, которые трудно оценить.

Чтобы выяснить, как распределяются касательные напряжения по высоте, были построены их эпюры в 3-х сечениях: двух в зоне опережения (на расстоянии $0,11l_d$ и $0,52l_d$ от входа в очаг деформации) и в одном – в зоне отставания, на расстоянии $0,15l_d$ от выхода (рис.5).

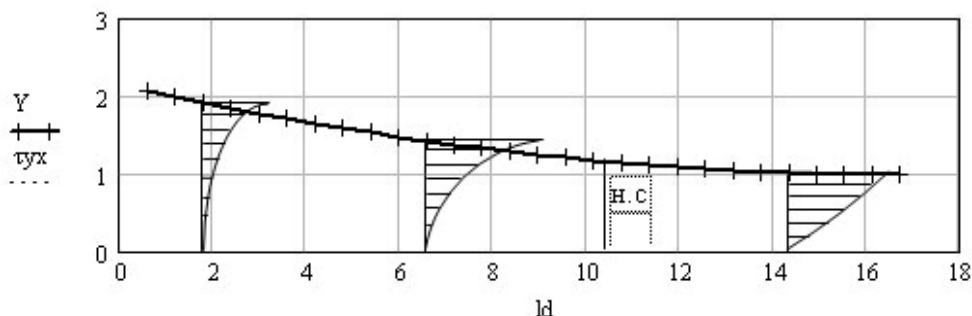


Рисунок 5 – Распределение напряжения τ_{yx} по очагу деформации

Из рис.5 видно, что в зоне отставания распределение по высоте весьма близко к линейному. Это вполне естественно, т.к. здесь градиент деформаций практически отсутствует. Обратная картина в зоне опережения – напряжения имеют явно нелинейное распределение. Это можно объяснить большим градиентом деформаций на входе в очаг деформации.

Выводы

Из сравнения реального поля напряжений при прокатке листов в низком очаге деформации с теми предпосылками, на которых основываются одномерные теоретические решения данной задачи следует, что выполняется только одна предпосылка – постоянство по высоте нормального напряжения σ_y . Напряжение σ_x не меняется только вблизи зоны прилипания. Поэтому гипотеза плоских сечений по всей длине очага деформации не выполняется. Напряжение τ_{yx} линейно распределено по высоте только в зоне отставания. Принятие постоянства сопротивления сдвигу по очагу деформации приводит к значительным погрешностям в определении величины напряжений. Поэтому в настоящее время, при наличии эффективных численных методов и компьютерной техники, использование одномерных приближений при анализе напряженно-деформированного состояния в низком очаге деформации следует считать недопустимым.

Библиографический список

1. Karman T. Beitrag zur Theories des Walzvorganges // Zeitschrift fuer angewandte Mathematik und Mechanik. — 1925. — Band 5.

2. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. - М.: Металлургиздат, 1962. – 494с.
3. Чекмарев А.П. Теория продольной прокатки / А.П. Чекмарев, А.А. Нефедов, В.А. Николаев. - Харьков, изд-во ХГУ. - 1965. – 212с.
4. Клименко П.Л. Использование эюр контактных напряжений для построения поля линий скольжения / П.Л. Клименко, В.Ф. Потапкин, А.С. Журавлев, Д.А. Деркач // Обработка металлов давлением. Научн. тр. ДМети, вып. 59. - 1972. – С. 23- 26.
5. Федоринов В.А. Исследование контактных напряжений при асимметричной прокатке методом фотоупругост / В.А. Федоринов, А.В. Данько, Г.Г. Шломчак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тем. зб. наук. праць.- Краматорськ, 2007. - С. 369-373.
6. Данько А.В. Методика исследования напряженного состояния методом линий скольжения с учетом непостоянства сопротивления деформации // Сб. научн. тр. ДонГТУ, вып. 29. - Алчевск, 2009. - С. 174-182.
7. Бровман М.Я. Некоторые вопросы обработки давлением биметалла /М.Я. Бровман, Ю.С. Додин // КШП,1963. - №1. – С. 3-5.
8. Данько А.В. Розподіл опору деформації при кінематично симетричному і асиметричному плющенні / А.В. Данько, А.Н. Кулик //Луганськ, Вісник СУНУ ім. Даля, №8 (126), ч.2. - 2008. – С. 127-132.
9. Клименко П.Л. Контактные напряжения при прокатке / П.Л. Клименко, В.Н. Данченко // Днепрпетровск: «Пороги», 2007. – 285с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.