

УДК 621.771.001

Данько В. М.
Данько А. В.**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В НИЗКОМ ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ
ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ**

Одной из основных задач при исследовании различных процессов ОМД является определение напряженного состояния. Теоретические решения этой проблемы затруднены отсутствием полной информации о граничных условиях реальных задач. Экспериментальные методы определения полей напряжений, в отличие от полей деформаций, разработаны недостаточно. Исключением является метод фотопластичности [1], но он сопряжен с заменой деформируемых металлов фотоупругими моделями, реологические свойства которых весьма далеки от свойств натуры. Поэтому представляется интересным использование подхода, при котором статические граничные условия (напряжения на поверхности деформируемого тела) находятся экспериментально, что в настоящее время возможно с достаточно высокой степенью точности, а поля напряжений в металле – какими либо аналитическими методами.

Указанный выше подход для случая плоской деформации был использован в работе [2]. В ней контактные напряжения при плоской прокатке измерялись методом штифтовых мездоз, и по полученным граничным условиям находилось распределение пластической постоянной k вдоль дуги контакта. Затем по этим данным определялось усредненное значение k в зонах отставания и опережения очага деформации, 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. Дальнейшего развития этот направление не получило.

В отличие от этого метода, в работе [3] СЛС строились численным методом с усредненным в очаге деформации значением k_{cp} , которое определялось по реологическим кривым металла. Контактные напряжения находились поляризационно-оптическим методом. Было установлено, что такой подход не позволяет определять величину k_{cp} , соответствующую фактическим контактным напряжениям. Поэтому была разработана несколько иная методика определения распределения k по l_δ , где l_δ – дуга контакта металла с валками [4]. Очаг деформации по длине разбивался 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.

Была также разработана методика построения СЛС с неравномерным распределением k по длине низкого очага деформации [5]. Как и в [4], 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_θ 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 [6].

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

Целью данной работы является определение и анализ полей напряжений при симметричной прокатке в низком очаге деформации по контактными напряжениям, найденным двумя различными методами – поляризационно-оптическим и методом штифтовых месдоз.

Экспериментальные значения контактных напряжений поляризационно-оптическим методом были получены при прокатке свинца марки С1 в валках диаметром 259,2 мм из органического стекла со вставками из оптически активного материала на основе эпоксидной смолы ЭД-6. Прокатывались образцы толщиной $h_0 = 2,48 \div 2,52$ мм и шириной ≈ 43 мм при $l_d/h_{cp} = 5,7$; $\varepsilon = 52,6$ %*. На рис. 1 показано распределение контактных напряжений (вход в очаг деформации – справа), а также продольных подпирющих напряжений σ_x и пластической постоянной k , найденных в соответствии с методикой работы [4]. На рис. 2 приведена СЛС для этого случая, построенная численно по методике [5].

Опытные значения контактных напряжений, полученных методом штифтовых месдоз, взяты из работы [7]. Прокатывался свинец в валках диаметром 206,8 мм при $l_d/h_{cp} = 5,1$; $\varepsilon = 64,6$ %. На рис. 4 показано распределение σ_x и k для данного случая, а на рис. 5 – СЛС.

Из рис. 1 и 4 видно, что распределения k по длине очага деформации в обоих случаях качественно совпадают: упрочнение металла увеличивается по мере приближения к нейтральному сечению, несколько спадая в самом нейтральном сечении, и уменьшается к выходу из валков. Однако по данным работы [7] величина напряжений и k существенно больше, чем в поляризационно-оптическом опыте. Очевидно, использовался свинец с большим сопротивлением деформации.

Сетки линий скольжения подобны, только во втором случае кривизна дуги контакта больше, что обусловлено меньшим диаметром валков.

Распределения компонент напряженного состояния по длине и высоте очага деформации показаны на рис. 3 и рис. 6. 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 и рис. 6 видно, что нормальные напряжения σ_x и σ_y по высоте практически не изменяются. Некоторые отклонения в величинах σ_x (см. рис. 6) на выходе из очага деформации можно объяснить конечными размерами точечной месдозы. Распределения этих напряжений по длине имеют такой же вид, как и нормальных напряжений на контакте.

Идентичными в обоих случаях являются и распределения интенсивности напряжений I , причем максимум интенсивности приходится на нейтральное сечение. Величина I , как и нормальные напряжения, не меняется по высоте.

Более сложный характер имеет распределение касательного напряжения τ_{xy} . В зоне отстаивания по мере приближения к оси симметрии величина τ_{xy} уменьшается, а форма кривой остается подобной распределению на контакте, до оси симметрии, где она спрямляется (рис. 3). На оси симметрии все слои имеют нулевое значение. В зоне опережения τ_{xy} по величине несколько больше, и на выходе из валков они не достигают нулевого значения, т. к. здесь не удалось измерить величину τ_k . Положительные значения τ_{xy} на входе и отрицательные на выходе из валков у оси симметрии объясняются тем, что слои СЛС проходят не параллельно этой оси и слои, близкие к ней, ее пересекают. Не нулевое значение τ_{xy} в нейтральном сечении опыта с использованием метода штифтовых месдоз (рис. 6) можно объяснить меньшей точностью этого метода.

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

Следует отметить, что расчет по средней в очаге деформации величине пластической постоянной k_{cp} дает существенно отличные результаты от вышеизложенных. Хотя характер распределения нормальных напряжений качественно совпадает с распределением при переменной k ,

* Исследование проведено в лаборатории физического моделирования процессов ОМД НМетАУ под руководством д-ра техн. наук, проф. Шломчака Г. Г.

но количественное различие в величине напряжений значительно: в среднем по всему очагу деформации отличие по σ_x от $-251,2\%$ до $975,6\%$; по σ_y от -5% до -11% , по $-\tau_{xy}$ от $45,4\%$ до $17,4\%$.

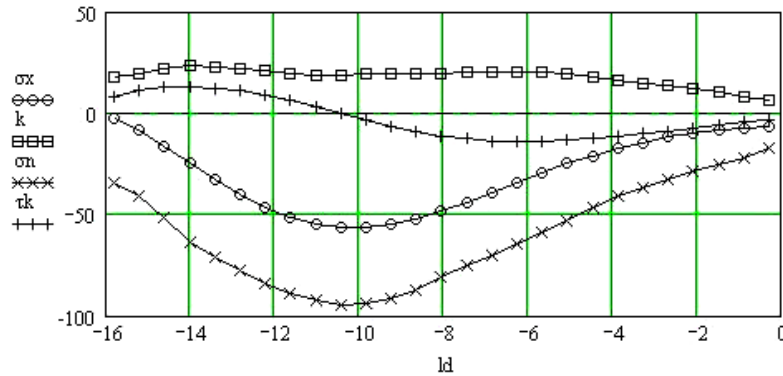


Рис. 1. Распределение σ_n , τ_k , σ_x и k по длине очага деформации (поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp} = 5,7$; $\varepsilon = 52,6\%$, $k = 6,2 \div 23,6$ МПа)

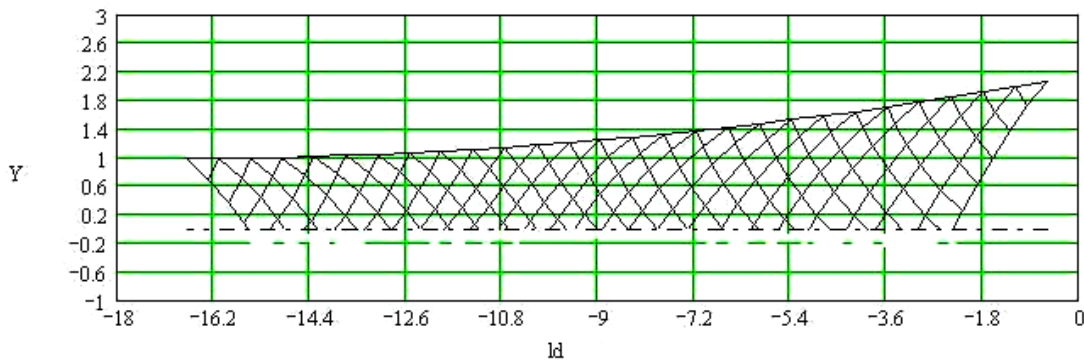


Рис. 2. Сетка линий скольжения (поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp} = 5,7$; $\varepsilon = 52,6\%$)

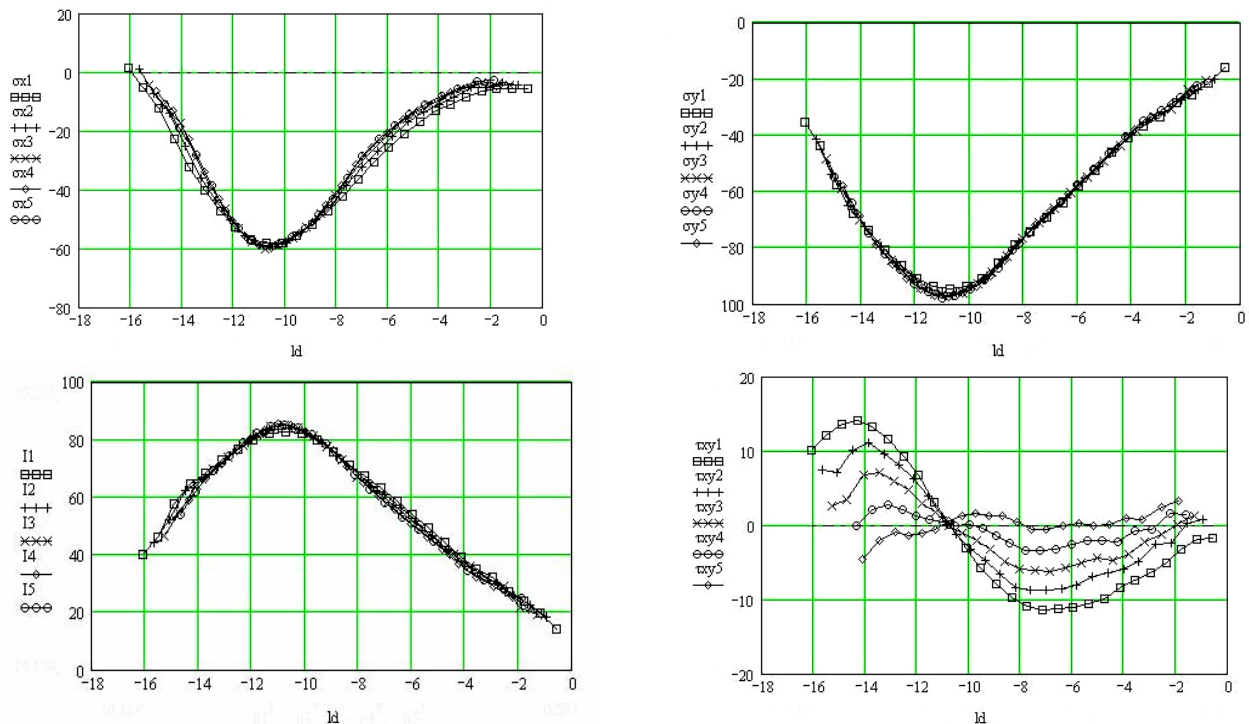


Рис. 3. Распределение напряжений по длине и высоте очага деформации (поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp} = 5,7$; $\varepsilon = 52,6\%$)

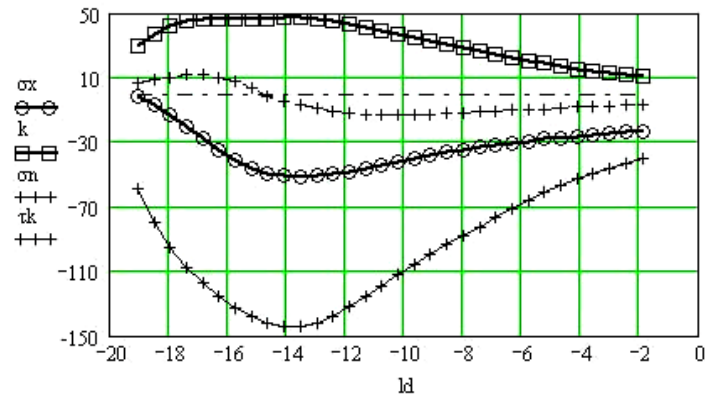


Рис. 4. Распределение σ_x и k по длине очага деформации (метод штифтовых месдоз, $l_d/h_{cp} = 5,1$; $\varepsilon = 64,6\%$; $k = 10,5 \div 46,9$ МПа)

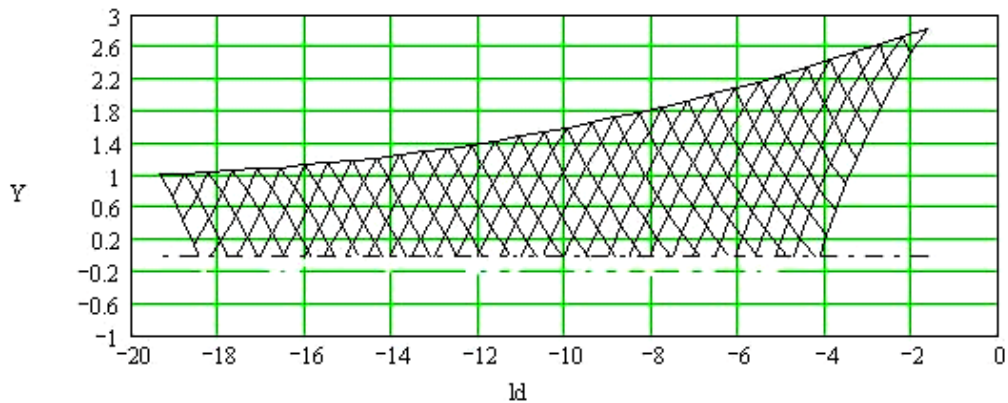


Рис. 5. Сетка линий скольжения (метод штифтовых месдоз, $l_d/h_{cp} = 5,1$; $\varepsilon = 64,6\%$)

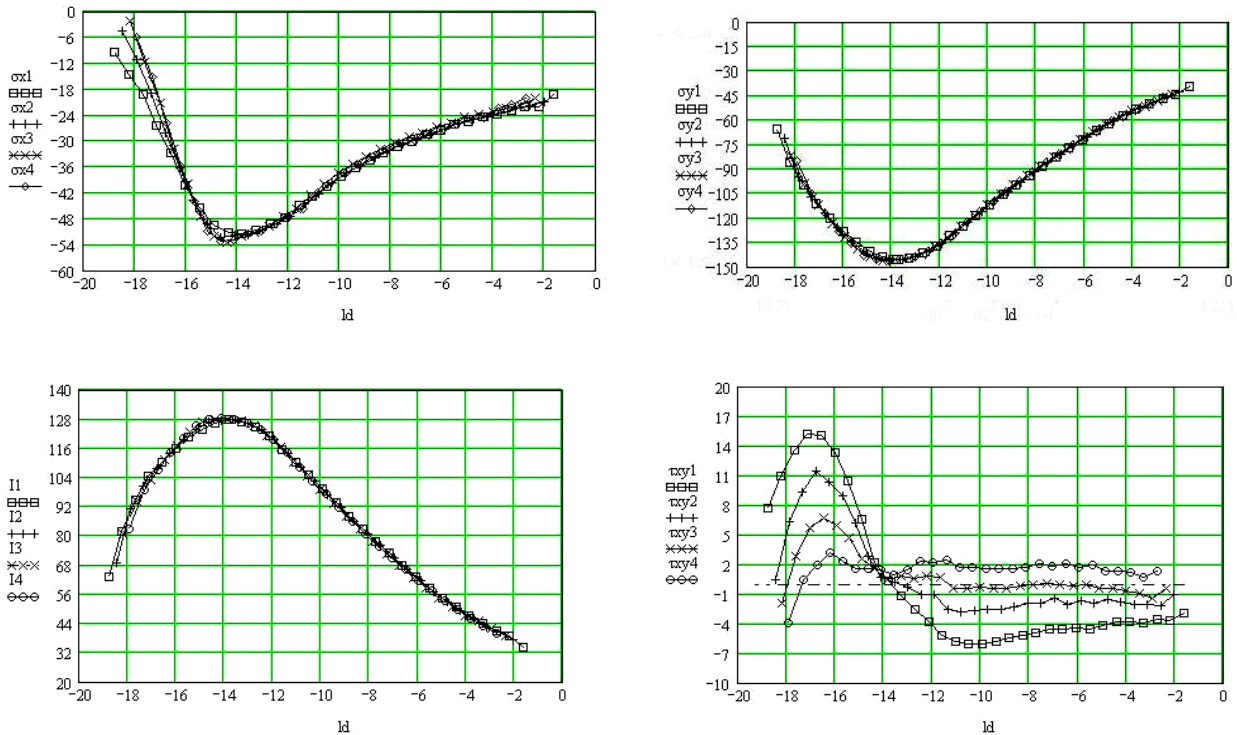


Рис. 6. Распределение напряжений по длине и высоте очага деформации (метод штифтовых месдоз, $l_d/h_{cp} = 5,1$; $\varepsilon = 64,6\%$)

Таблица 1

Значения компонент тензора напряжений в узлах сетки, МПа
(поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp} = 5,7$; $\varepsilon = 52,6\%$, $k = 6,2 \div 23,6$ МПа)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\sigma_x =$	1	-85.332	-79.133	-74.48	-69.269	-63.899	-58.27	-52.725	-46.254	-40.942
	2	-89.877	-84.36	-78.228	-73.049	-67.822	-62.45	-56.775	-51.094	-44.916
	3	-93.041	-88.78	-83.228	-76.428	-71.233	-66.048	-60.621	-54.792	-49.417
	4	-94.893	-91.597	-87.27	-80.973	-74.725	-69.469	-63.718	-57.743	-51.947
	5	-95.964	-93.678	-90.006	-84.651	-78.326	-72.183	-66.838	-60.848	-55.268

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\sigma_y =$	1	-85.332	-79.133	-74.48	-69.269	-63.899	-58.27	-52.725	-46.254	-40.942
	2	-89.877	-84.36	-78.228	-73.049	-67.822	-62.45	-56.775	-51.094	-44.916
	3	-93.041	-88.78	-83.228	-76.428	-71.233	-66.048	-60.621	-54.792	-49.417
	4	-94.893	-91.597	-87.27	-80.973	-74.725	-69.469	-63.718	-57.743	-51.947
	5	-95.964	-93.678	-90.006	-84.651	-78.326	-72.183	-66.838	-60.848	-55.268

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\tau_{xy} =$	1	-7.999	-9.727	-10.892	-11.366	-11.299	-11.088	-10.567	-9.837	-8.398
	2	-4.676	-6.607	-8.483	-8.695	-8.808	-8.525	-8.013	-6.938	-6.475
	3	-2.019	-3.19	-4.992	-5.94	-6.108	-6.184	-5.79	-5.045	-4.414
	4	0.111	-0.491	-1.497	-2.35	-3.408	-3.48	-3.271	-2.523	-2.155
	5	1.196	1.635	1.205	1.219	0.362	-0.658	-0.559	-0.075	0.219

Столь значительная относительная погрешность разницы в напряжениях σ_x обусловлена тем, что при $k_{cp} = \text{const}$ (k_{cp} определялась как среднеарифметическая величина во всех сечениях очага деформации) в начале и в конце очага деформации они положительны (рис. 7), что не поддается теоретическому объяснению.

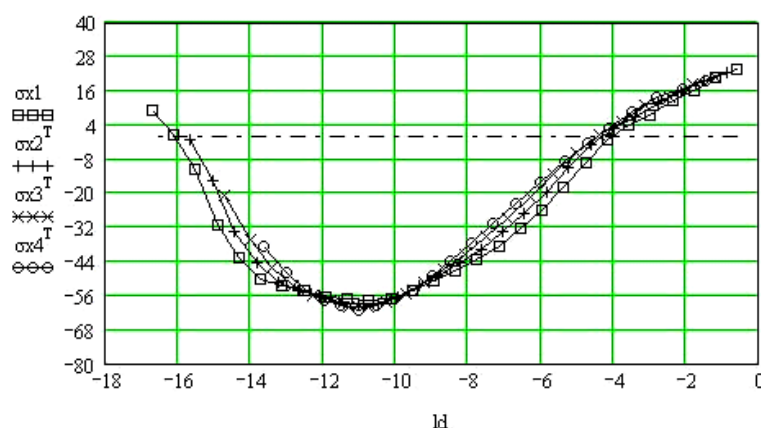


Рис. 7. Распределение напряжений σ_x по длине и высоте очага деформации (поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp} = 5,7$; $\varepsilon = 52,6\%$, $k_{cp} = 17,9$ МПа)

Распределение касательных напряжений при $k = \text{const}$ также существенно отличается от результатов расчета с переменной k (рис. 8). Очевидно, что оно мало соответствует теоретическим представлениям об изменении τ_{xy} при симметричной прокатке в низком очаге деформации.

Это дает основание утверждать, что учет неравномерности сопротивления деформации при аналитическом определении полей напряжений по экспериментальным граничным условиям необходим.

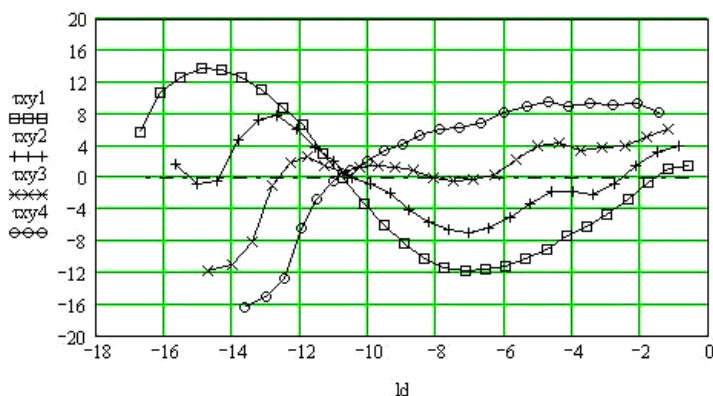


Рис. 8. Распределение касательных напряжений по длине и высоте очага деформации (поляризационно-оптический метод, $l_d/h_{cp} = 5,7$; $\varepsilon = 52,6\%$, $k_{cp} = 17,9$ МПа)

ВЫВОДЫ

Полученные в результате экспериментально-аналитического исследования распределения компонент напряженного состояния при симметричной плоской прокатке в низком очаге деформации соответствуют общепринятым представлениям. Следовательно, использованная методика адекватна и может применяться при изучении более сложных видов прокатки, в частности, кинематически асимметричной. При аналитическом определении полей напряжений по экспериментальным граничным условиям необходим учет изменения сопротивления деформации металла при его деформировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полухин П. И. Фотопластичность / П. И. Полухин, В. К. Воронцов. — М. : Металлургия, 1969. — 400 с.
2. Использование эпюр контактных напряжений для построения поля линий скольжения / П. Л. Клименко, В. Ф. Потапкин, А. С. Журавлев, Д. А. Деркач // Обработка металлов давлением : сб. научн. тр. ДМети. — 1972. — Вып. 59. — С. 23–26.
3. Федоринов В. А. Исследование контактных напряжений при асимметричной прокатке методом фотоупругости / 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.
4. Данько А. В. Розподіл опору деформації при кінематично симетричному і асиметричному плющенні / А. В. Данько, А. Н. Кулик // Вісник СУНУ ім. Даля. — Луганськ, 2008. — № 8 (126), Ч. 2. — С. 127–132.
5. Данько А. В. Методика дослідження напруженого стану методом ліній скользяння з урахуванням непостоянства опору деформації // Сб. научн. тр. ДонГТУ. — Алчевск, 2009. — Вып. 29. — С. 174–182.
6. Бровман М. Я. Некоторые вопросы обработки давлением биметалла / М. Я. Бровман, Ю. С. Додин // КШП. — 1963. — № 1. — С. 3–5.
7. Клименко П. Л. Контактные напряжения при прокатке / П. Л. Клименко, В. Н. Данченко. — Днепропетровск : Пороги, 2007. — 285 с.

Данько В. М. — канд. техн. наук, доц. ДонГТУ;

Данько А. В. — канд. техн. наук, менеджер «Real».

ДонГТУ — Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: danko_vm@mail.ru