

Данько А.В.  
(ДонГТУ, Алчевск, Украина)

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

*Проведено експериментальне дослідження коефіцієнта напруженого стану при кінематично асиметричній прокатці методом фізичного моделювання. Одержано регресійну залежність цього параметра від ступеня деформації і ступеня кінематичної асиметрії.*

**Ключові слова:** асиметрична прокатка, фізичне моделювання, коефіцієнт напруженого стану, регресійна модель.

*Проведено экспериментальное исследование коэффициента напряженного состояния при кинематически асимметричной прокатке методом физического моделирования. Получена регрессионная зависимость этого параметра от степени деформации и степени кинематической асимметрии.*

**Ключевые слова:** асимметричная прокатка, физическое моделирование, коэффициент напряженного состояния, регрессионная модель.

Повышение точности прокатки листов и полос продолжает оставаться одной из наиболее актуальных проблем листопрокатного производства. В настоящее время эта проблема в основном решается путем создания разнообразных систем противоизгиба, сдвига или перекрещивания валков [1]. Все эти способы связаны с установкой нового оборудования или со значительными изменениями в существующем, что требует больших затрат. Альтернативным подходом является регулирование силы прокатки - фактора, непосредственно влияющим на упругие деформации элементов валковой системы, следовательно, на точность проката.

Одним из самых доступных и достаточно эффективных способов регулирования силы прокатки без изменений в конструкции рабочих клеток является кинематически асимметричная прокатка (КАП) [2]. При прокатке кинематическая асимметрия создается рассогласованием скоростей рабочих валков. В результате, как это установлено многими исследованиями, сила прокатки уменьшается пропорционально степени кинематической асимметрии  $K_v$ , под которой понимается отношение линейных скоростей ведущего и ведомого валков [3-5].

Для достижения высокой точности результатов необходимо знать, как зависит сила прокатки  $P$  от  $K_v$  при прокатке листов разных толщин с

разными степенями деформации, и иметь количественные зависимости для определения  $K_V$  в зависимости от требуемой величины изменения  $P$ .

В настоящее время известно много исследований технологических параметров, в т.ч. и энергосиловых, при асимметричной прокатке на толстолистовых станах [6÷8]. Однако приведенные в них зависимости не учитывают многих факторов, влияющих на силу прокатки, и поэтому мало пригодны для теоретического анализа. Кроме того, их не всегда можно применить на других станах, т.к. получены они без соблюдения условий подобия, а некоторые для своего использования требуют знания величины моментов на валках или токов главных двигателей. Поэтому возникла необходимость в дальнейших исследованиях, которые были проведены методом физического моделирования на свинце марки С1 [9]. В результате была получена зависимость относительного изменения силы прокатки  $\Delta P/P$  от степени деформации  $\varepsilon$  и  $K_V$  при условиях, характерных для прокатки в чистовых клетях ТЛС. Однако для теоретических расчетов режимов прокатки удобнее использовать не  $\Delta P/P$ , а коэффициент напряженного состояния  $n_\sigma$ , поскольку кинематическая асимметрия влияет на  $P$  вследствие изменения напряженного состояния.

Поэтому задача данной работы состояла в том, чтобы используя экспериментальные данные [9], получить зависимость коэффициента напряженного состояния от  $\varepsilon$  и  $K_V$ , пригодную для использования в промышленных условиях.

В соответствии с данными работы [9] дисперсия эксперимента по определению силы прокатки при КАП равна 0,2469, абсолютная погрешность (с  $p = 0,95$ ) равна 0,1114 кН, средняя относительная – 1,62%. Проверка воспроизводимости эксперимента по критерию Кохрена со стандартной доверительной вероятностью 0,95 показала, что данные воспроизводимы. Следовательно, дисперсия помех в эксперименте была постоянной и это дает возможность проводить регрессионный анализ полученных данных.

Для определения  $n_\sigma$  нужно знать величину сопротивления деформации свинца  $\sigma_n$  при тех  $\varepsilon$  и  $u$ , которые имели место в каждом опыте. В литературе имеются реологические данные свинца марки С1, полученные на пластометре [10]. Однако эти кривые получены при температурах 15 и 30<sup>0</sup>С. Поскольку наш эксперимент проводился при температуре 22<sup>0</sup>С, то данные работы [10] были интерполированы к указанной температуре. В результате интерполяции исходных данных, выполненной при помощи программы «Statistica», была получена зависимость  $\sigma_n$  от степени деформации  $\varepsilon$  и скорости деформации  $u$ :

$$\sigma_n = 2,0279 + 49,32\varepsilon + 4,4181 u - 59,0387\varepsilon^2 + 1,168 \varepsilon u - 0,2538 u^2 \quad (1)$$

Дисперсия неадекватности зависимости (1)  $S^2(\sigma_{и}) = 5,385$ . Абсолютная погрешность определения  $\sigma_{и}$  равна 0,42 МПа, средняя относительная при  $r = 0,95 - 2,1\%$ . Коэффициент множественной корреляции  $R = 0,838$ . График данной зависимости приведен на рисунке 1.

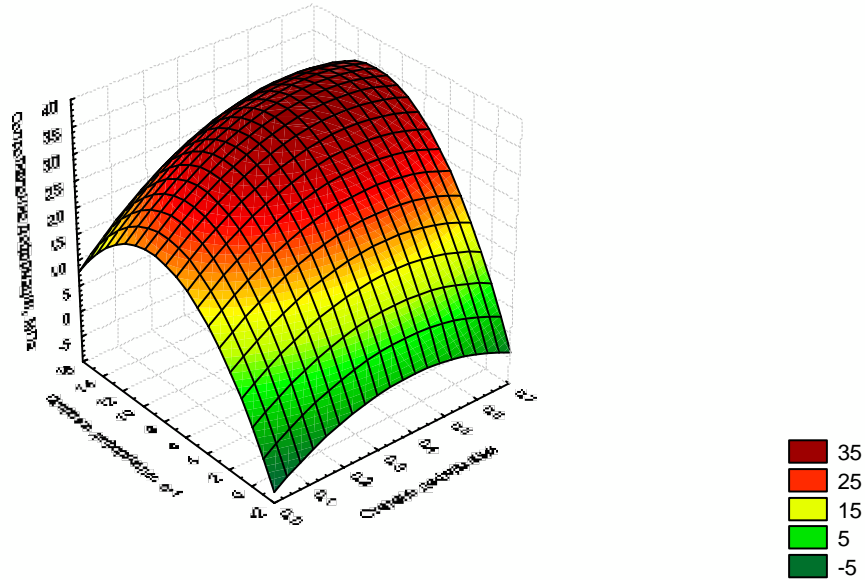


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления деформации свинца марки С1 от степени и скорости деформации

По (1) было найдено  $\sigma_{и}$  в каждом опыте и коэффициент  $n_{\sigma}$  как результат деления  $r_{ср}$  на  $\sigma_{и}$ . Это позволило рассчитать  $n_{\sigma}$ . На рисунке 2 показано, как меняется коэффициент напряженного состояния при изменении  $\epsilon$  и степени рассогласования скоростей валков.

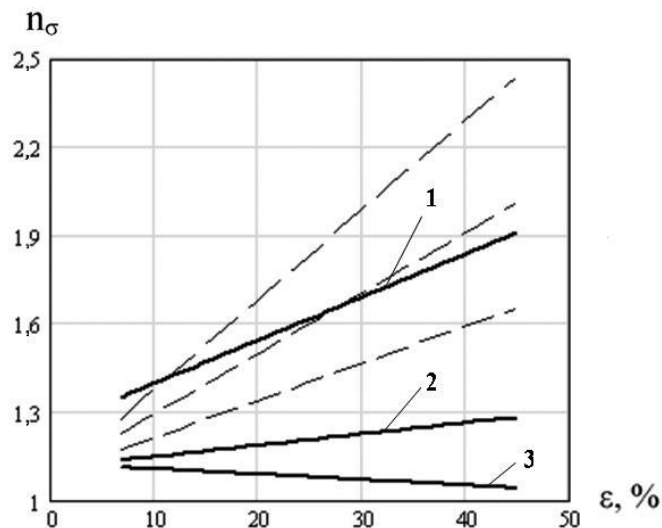


Рисунок 2 – Изменение коэффициента напряженного состояния от степени деформации и рассогласования скоростей валков:

1 -  $K_v = 1,0$ ; 2 -  $K_v = 1,08$ ; 3 -  $K_v = 1,16$ .

На этом же рисунке пунктирными линиями показано изменение  $n_\sigma$  по А.Королеву [11] при симметричной прокатке с коэффициентами трения от 0,23 (нижняя линия) до 0,38 (верхняя линия). Значения коэффициента трения взяты по данным работы [12], при прокатке свинца в стальных валках, с шероховатостью по 7 классу без смазки, т.е. для условий, в которых проводился эксперимент. Из рисунка 2 видно, что при  $K_V = 1$  имеет место достаточно хорошее соответствие формуле А.Королева.

Видно также, что рассогласование валков существенно уменьшает коэффициент напряженного состояния. Однако влияние степени деформации при этом ослабевает, а при  $K_V = 1,16$  с увеличением  $\varepsilon$  происходит некоторое снижение  $n_\sigma$ . Следовательно, эффект кинематической асимметрии не только в большей степени проявляется при больших обжатиях, но и компенсирует увеличение степени деформации. Если уменьшение силы прокатки при рассогласовании скоростей валков происходит за счет снижения продольных подпирющих напряжений  $\sigma_x$ , то это явление можно объяснить тем, что при увеличении  $K_V$  происходит уменьшение  $\sigma_x$ , и если это уменьшение опережает рост сжимающих напряжений  $\sigma_y$ , возникающий при увеличении  $\varepsilon$ , то коэффициент  $n_\sigma$  уменьшается.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость коэффициента  $n_\sigma$  от степени деформации  $\varepsilon$  и степени рассогласования скоростей валков  $K_V$  :

$$n_\sigma = 27,486 + 16,973 \varepsilon - 8,842 \varepsilon^2 - 49,039 K_V - 11,269 \varepsilon K_V + 22,425 K_V^2 .$$

Коэффициент множественной корреляции  $R = 0,944$ . Дисперсия неадекватности равна 0,0094. Абсолютная погрешность определения отклика равна 0,0282, средняя относительная (при  $p = 0,95$ ) 2,17% в исследованном диапазоне изменения факторов:  $\varepsilon = 8 \div 40\%$ ,  $K_V = 1 \div 1,16$ .

Для проверки значимости были найдены величины t-критерия Стьюдента для свободного члена и коэффициентов регрессии:  $t_0 = 4,0115$ ;  $t_1 = 6,4876$ ,  $t_2 = -5,4800$ ,  $t_3 = -3,8674$ ,  $t_4 = 3,8279$ ,  $t_5 = -5,0042$ . Проверка значимости была осуществлена по критерию Стьюдента:

$$t_i \geq |t_{f,\alpha}^T| = t_{24; 0,05}^T = 1,7109,$$

где  $t_{f,\alpha}^T$  – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы  $f = N(m-1) = 12(3-1)$  и уровне значимости  $\alpha = 5\%$ .

Следовательно, все коэффициенты регрессии и свободный член значимы, и поэтому все факторы существенно влияют на отклик. Про-

верка адекватности регрессионной модели была выполнена по критерию Фишера. Установлено, что полиномиальная модель адекватна с вероятностью  $p = 0,95$ .

Представляет интерес значимость парного эффекта  $\varepsilon K_V$ , означающая, что интенсивность влияния  $\varepsilon$  и  $K_V$  в отдельности зависит от уровня другого фактора. Так как парный эффект имеет знак минус, то при переходе  $\varepsilon$  со своего нижнего уровня на верхний усиливается отрицательное влияние  $K_V$  в виде снижения силы прокатки, что согласуется с рисунком 2.

Как известно, величина коэффициентов регрессии зависит не только от степени влияния факторова на отклик, но и от их размерности. Чтобы установить относительную интенсивность влияния каждого из них на  $n_\sigma$ , нашли нормированные коэффициенты регрессии. В нормированном виде зависимость  $n_\sigma$  такова:

$$n_\sigma = 7,171 \varepsilon - 1,811\varepsilon^2 - 11,48 K_V + 11,348K_V^2 - 5,151\varepsilon K_V. \quad (2)$$

По (2) видно, что в исследованном диапазоне наибольшее влияние на отклик оказывает степень асимметрии  $K_V$ , а  $\varepsilon$  является следующим по силе влияния фактором.

Полученная зависимость удовлетворяет требованию 1-й теоремы подобия о представлении данных модельного эксперимента в виде безразмерных критериев подобия и поэтому может быть использована в промышленных условиях. Зная отклонение силы прокатки от требуемых значений, можно по ней найти ту величину  $K_V$ , при которой сила прокатки уменьшится до требуемого уровня.

### **Выводы.**

В результате экспериментального исследования влияния степени скоростной асимметрии и степени деформации на силу прокатки установлено, что эффект кинематической асимметрии увеличивается с увеличением степени деформации и при кинематически асимметричной прокатке влияние степени деформации на коэффициент напряженного состояния существенно меньше, чем при симметричной. Наибольшее влияние на этот параметр оказывает степень рассогласования скоростей валков. Получена регрессионная зависимость коэффициента напряженного состояния от параметров очага деформации и рассогласования скоростей валков, пригодная для использования в промышленных условиях.

### **Библиографический список**

1. Грудев А. П. *Технология прокатного производства* / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Металлургия, 1994. – 651 с. : ил.
2. Пименов А. Ф. *Асимметричные процессы прокатки – анализ, способы и перспективы применения* / А. Ф. Пименов, В. Н. Скороходов, А. И. Трайно и др. // *Сталь*. – М. 1982. – № 1. – С. 53–56.
3. Бровман М. Я. *Исследование асимметричной прокатки. Сообщение 1* / М. Я. Бровман // *Изв. вузов*. – М. : Черная металлургия, 1982. – № 3. – С. 50–53.
4. Бровман М. Я. *Исследование асимметричной прокатки. Сообщение 2.* / М. Я. Бровман // *Изв. вузов*. – М. : Черная металлургия, 1982. – № 5. – С. 38–41.
5. Коновалов Ю.В., Будаква А.А., Гончаров В.Е., Завражний А.Н. *Регулирование разнотолщинности листов на толстолистовых станах управлением скоростным режимом прокатки.* // *Металл. и горнорудн. промышленность*, 1987, №1.- С.25÷26.
6. Горелик В.С. *Освоение прокатки толстых листов со скоростной асимметрией на стане 3600.* /В.С.Горелик, А.А.Будаква, П.С.Гринчук и др. // *Сталь*, 1984,- №7.- С.31–33.
7. Митьев А.П. *Силовые параметры асимметричной прокатки толстых листов.*/А.П.Митьев, Э.А.Орнатский, П. С. Гринчук и др.// *Прокатка и термообработка толстого листа: Темат. отр. сб.- М.: Металлургия, 1986.-С.28-31.*
8. Клименко И.В. *Загруженность чистой клетки толстолистового стана 3000 при асимметричной прокатке.*/ И.В.Клименко, В.М.Щербак, А.В.Заря и др. // *Интенсификация производства листовой стали: Темат. отр. сб.- М.: Металлургия, 1988.-С.37-39.*
9. Кулик А. Н. *Влияние кинематической асимметрии на силу прокатки в чистовых клетях ТЛС* / А. Н. Кулик, А. В. Данько, К. Ю. Юрков и др. // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тем. сб. наук. праць*. – Краматорськ, 2008. – С. 269–273.
10. Шломчак Г.Г. *Основы научных исследований.* Днепрпетровск, «Пороги», 2005. – 161с.
11. Василев Я.Д., Сафьян М.М. *Производство полосовой и листовой стали.* К: «Вища школа», 1976. – 191 с.
12. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. *Трение и смазки при обработке металлов давлением.* М.: Металлургия, 1982. – 310 с.

*Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Луценко В.А.*