

УДК 621.771.01

Кулик А. Н.
Данько А. В.
Юрков К. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ В ЧИСТОВЫХ КЛЕТЯХ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ СТАНОВ

Одним из самых доступных и, в то же время, достаточно эффективных способов устранения продольной разнотолщинности δh_L при прокатке листов и полос является кинематически асимметричная прокатка, т. е. прокатка с рассогласованием скоростей верхнего и нижнего рабочих валков при их примерно одинаковом диаметре. Этот способ был внедрен на толстолистовом стане (ТЛС) 3600 комбината «Азовсталь» [1, 2]. В результате его применения установлено, что рассогласование скоростей на $6 \div 7\%$ уменьшает силу прокатки P на 10% , что при неизменном растворе валков позволяет изменять толщину полосы в интервале $0 \div 0,25$ мм. Однако промышленные условия не позволили определить верхнюю границу уменьшения силы P , следовательно, диапазон регулирующего воздействия данного способа. Неясным остался характер изменения контактных напряжений при прокатке в чистовых клетях ТЛС, ведущий к уменьшению P , и их зависимость от основных параметров данного процесса. Это не позволяет рассчитывать необходимую степень кинематической асимметрии для устранения δh_L . Поэтому исследование контактных напряжений при кинематической асимметрии продолжает оставаться актуальной задачей.

Исследования локальных и интегральных параметров при асимметричной прокатке ведутся уже свыше 30 лет. Для случая холодной прокатки исследовано влияние не только кинематической асимметрии, но и разного диаметра валков, условий трения и т. д. [3]. Изучались и контактные напряжения при асимметрии, вызванной разным диаметром валков, однако для более низкого, чем при прокатке в чистовых клетях ТЛС, очага деформации ($l_0/h_{cp} > 4$) [4, 5]. Контактные напряжения при кинематически асимметричной прокатке при условиях, характерных для прокатки в чистовых клетях ТЛС, были исследованы методом фотоупругости [6]. Однако из-за малого модуля упругости валков из органического стекла ОНС относительно материала моделирования – свинца, имело место значительное сплющивание валков. В результате фактическая длина очага деформации оказалась существенно большей, чем расчетная. И хотя были получены важные результаты, но поскольку геометрия очага деформации оказалась искаженной, было решено данное исследование продолжить методом штифтовых месдоз, установленных в стальном деформирующем инструменте.

Целью данной работы является экспериментальное исследование распределения нормальных напряжений на поверхности контакта металла с валком при прокатке листов с толщиной, характерной для чистовых клеток ТЛС, как при обычной прокатке, так и при прокатке с кинематической асимметрией. Затем по найденным контактным напряжениям интегрированием их эпюр осуществить определение силы прокатки P и посредством регрессионного анализа установить эмпирическую зависимость изменения P от степени кинематической асимметрии и степени деформации.

Исследование было проведено физическим моделированием процессов кинематически симметричной и асимметричной прокатки. С целью повышения точности определения контактных напряжений, которая напрямую зависит от диаметра штифта месдозы, использовано устройство пластической деформации металлов (УПД) ДГМА [7]. Деформирующим инструментом этого устройства являются сегменты, моделирующие фрагменты образующих поверхностей бочек рабочих валков прокатных станов. Поскольку радиус деформирующих поверхностей сегментов равен 750 мм, то при диаметрах рабочих валков ТЛС $650 \div 950$ мм масштаб геометрических параметров очага деформации увеличивается в $1,6 \div 2,3$ раза. Следовательно, при фактическом диаметре штифта 2 мм его измерительный диаметр равен $0,86 \div 1,27$ мм, т. е. месдоза практически является точечной.

Привод деформирующих сегментов УПД осуществляется посредством тяг, шарнирно сопряженных с сегментами и с ползуном, совершающим возвратно-поступательные перемещения от передачи винт-гайка. Вращает тянущий винт электродвигатель переменного тока мощностью 10 кВт через моторную муфту, двухступенчатый цилиндрический зубчатый редуктор и зубчатую муфту. От перемещений в осевом направлении тянущий винт фиксируется дополнительной опорой с упорным подшипником качения, а от вращения ползун фиксирован направляющими планками. При работе сегменты перемещаются по направляющим подушек, которые соединены своими опорными поверхностями с нажимными винтами, обеспечивающими возможность установки предварительного зазора на требуемую величину. При исследовании асимметричной прокатки одна из тяг отсоединялась от ползуна и фиксировалась шарнирно на дополнительной рычаге, сопряженном шарнирно своими свободными концами с ползуном и с дополнительной опорой. Это позволяет изменять степень кинематической асимметрии $K_V = V_{\text{вн}}/V_{\text{вд}}$ (где $V_{\text{вн}}$, $V_{\text{вд}}$ – скорости ведущего и ведомого сегментов соответственно) в диапазоне $1 \div 1,285$.

По данным технологических инструкций и наблюдений при прокатке в чистовых клетях ТЛС параметры, характеризующие геометрию очага деформации в продольном направлении, в среднем находятся в пределах: $\varepsilon = 0,1 \div 0,5$; $l_{\delta}/h_{\text{ср}} = 0,9 \div 3,9$. Поскольку конечной целью данного исследования является устранение δh_L , которое осуществляется в последних проходах при низком очаге деформации, то сочли целесообразным несколько сузить диапазон изменения фактора $l_{\delta}/h_{\text{ср}}$. Приняли, что $l_{\delta}/h_{\text{ср}} = 2,0 \div 4,0$.

Моделирование осуществили на свинце марки С1, т. к. скоростная асимметрия влияет на коэффициент напряженного состояния n_{σ} , следовательно, обеспечивать реологическое подобие модели и натуры нет необходимости. Масштаб моделирования $L_n/L_m = 900/1500 = 0,6$, где для определенности взят номинальный диаметр валков чистовой клетки ТЛС 3000 ОАО «АМК». Деформирование осуществляли при скорости движения металла 3,5 мм/с. Половина образцов была деформирована без кинематической асимметрии, а вторая половина – с кинематической асимметрией $K_V = 1,285$. Столь большая степень асимметрии была применена для того, чтобы найти верхнюю границу влияния этого фактора на силу прокатки P .

Тарировка штифтовой месдозы осуществлялась с использованием специального устройства в виде шарнирно укрепленной балки, на конце которой устанавливаются калиброванные грузы определенной массы. Запись сигнала месдозы производилась помощи компьютера со встроенным аналого-цифровым преобразователем АЦП-ADC16-32. Коэффициент парной корреляции между интенсивностью сигнала АЦП и контактным напряжением оказался равным 0,9972. С доверительной вероятностью 0,95 при трехкратном дублировании измерений максимальная абсолютная погрешность тарировки составила $\pm 0,878$ МПа, средняя относительная – 2,34 %.

Сглаживание данных было осуществлено посредством программы «Statistica» [8]. На рис. 1 и 2 показаны характерные распределения нормального контактного напряжения σ_n при деформировании без и с кинематической асимметрией.

Из рис. 1–2 хорошо видно, что скоростная асимметрия приводит к снижению максимума эпюр σ_n и уменьшению их площади. Этому соответствует снижение среднего удельного усилия $p_{\text{ср}}$, которое находилось интегрированием эпюр σ_n . Размеры образцов, условия деформирования и результаты расчетов площади эпюр S и $p_{\text{ср}}$ представлены в табл. 1. По ней видно, что в некоторых опытах при деформировании геометрические параметры вышли за пределы заданного интервала, что, впрочем, не имеет значения, т. к. данные были подвергнуты регрессионному анализу для определения $p_{\text{ср}}$ в заданном интервале.

Для производственных условий интерес представляет влияние K_V на коэффициент напряженного состояния n_{σ} , который, будучи безразмерным параметром, таким же образом будет изменяться и при прокатке сталей. Однако трудности с моделированием скоростных условий деформирования, ведущие к невыполнению условий пластического подобия, заставили ограничиться исследованием влияния асимметрии на относительное изменение $p_{\text{ср}}$.

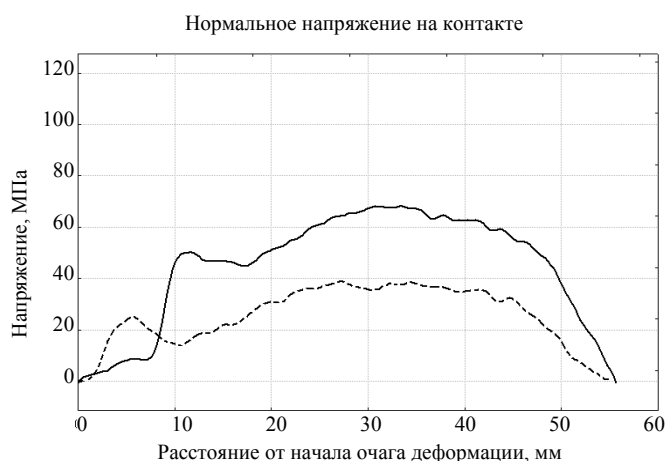


Рис. 1. Распределение контактного напряжения :

— $K_v = 1,0$; $\varepsilon = 15,74\%$; $l_\delta/h_{cp} = 2,289$;
 $K_v = 1,285$; $\varepsilon = 14,81\%$; $l_\delta/h_{cp} = 2,191$



Рис. 2. Распределение контактного напряжения:

— $K_v = 1,0$; $\varepsilon = 25,18\%$; $l_\delta/h_{cp} = 3,647$;
 $K_v = 1,285$; $\varepsilon = 25,02\%$; $l_\delta/h_{cp} = 4,174$

Таблица 1

Условия проведения и результаты эксперимента

№ опыта	K_v	H , мм	h , мм	Δh , мм	ε , %	l_δ , мм	l_δ/h_{cp}	$S_{эторь}$, Н/мм	p_{cp} , МПа
1.1	1,000	26,55	22,37	4,18	15,74	55,991	2,289	2495,631	44,572
1.2		26,67	9,57	17,1	64,12	113,25	4,550	6868,046	60,645
1.3		26,70	23,08	3,62	13,56	52,106	2,093	2126,446	40,810
2.2		13,73	11,05	2,68	19,52	44,833	3,618	2125,802	47,416
2.3		13,74	11,79	1,95	14,19	38,243	2,996	1679,977	43,929
3.1		14,02	11,20	2,82	25,18	45,989	3,647	2537,121	55,168
3.2		13,99	10,7	3,29	30,75	49,674	4,024	2816,864	56,707
3.3		13,68	11,43	2,25	19,69	41,079	3,272	2123,004	51,681
4.1		20,08	12,8	7,28	36,25	73,892	4,495	4312,337	58,360
4.2		20,29	13,00	7,29	35,93	73,943	4,442	4118,181	55,694
5.1	1,285	27,00	23,00	4,0	14,81	54,772	2,191	1288,840	23,531
5.2		27,20	19,03	8,17	30,04	78,278	3,386	2107,400	26,922
5.3		26,75	22,25	4,5	16,82	58,095	2,371	1583,031	27,249
6.2		14,07	12,06	2,01	14,29	38,923	2,979	1116,506	28,685
6.3		14,08	11,34	2,74	19,46	45,332	3,567	1172,920	25,874
7.1		14,07	10,55	3,52	25,02	51,381	4,174	2402,113	46,751
7.3		14,07	12,78	1,29	9,17	31,105	2,317	880,831	28,318
8.1		20,08	14,56	5,52	27,49	64,343	3,715	1984,789	30,847
8.2		20,03	13,15	5,47	27,31	64,051	3,861	1822,443	28,453
8.3		20,09	14,11	5,98	29,77	66,97	3,916	2414,804	36,058

Поскольку также не удалось обеспечить идентичность условий деформирования при $K_v = 1$ и $K_v = 1,285$, то пришлось эмпирические данные подвергнуть регрессионному анализу для того, чтобы можно было взять отношение p_{cp} в сходственных точках факторного пространства.

В данном эксперименте изучались зависимости p_{cp} от двух факторов (при разных K_v) – степени деформации ε и параметра формы очага деформации l_δ/h_{cp} . Однако было выяснено, что коэффициент корреляции между этими факторами очень велик: $r = 0,9197$, что нарушает одну из основных предпосылок регрессионного анализа. В таких случаях рекомендуется один из факторов исключить из регрессионной модели [9]. Из рис. 3 и 4, на которых показаны регрессии p_{cp} соответственно от ε и l_δ/h_{cp} видно, что линейная аппроксимация является вполне

достаточной в обоих случаях (коэффициент корреляции r_{yx} между зависимой и независимыми переменными равен 0,9241). Поэтому можно обойтись линейным регрессионным анализом от одной из переменных.

При степени кинематической асимметрии $K_v = 1,285$ корреляция между факторами также достаточно велика для использования однофакторной регрессии ($r = 0,8807$), но r_{yx} заметно ниже и равен 0,6364 и 0,6210 (для зависимостей от ε и l_δ/h_{cp} соответственно). Это свидетельствует о меньшей стабильности процесса асимметричного деформирования по сравнению с симметричным.

По уравнениям регрессии от ε нашли отношение средних удельных усилий при $K_v = 1$ и $K_v = 1,285$ в исследованном диапазоне изменения $\varepsilon = 10 \div 30$ %. Эта зависимость была аппроксимирована уравнением:

$$\frac{P_{cp1}}{P_{cp1,285}} = 1,576 + 0,0051 \cdot \varepsilon. \quad (1)$$

Коэффициент корреляции r_{yx} для уравнения (1) равен 0,991.

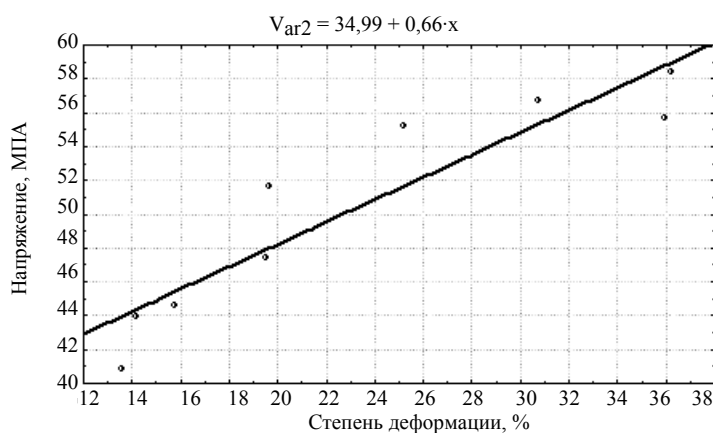


Рис. 3. Зависимость p_{cp} от ε при $K_v = 1$

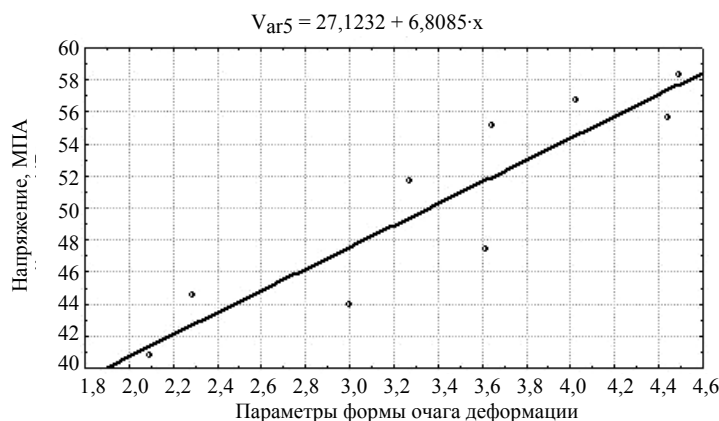


Рис. 4. Зависимость p_{cp} от параметра l_δ/h_{cp} при $K_v = 1$

Из уравнения (1) видно, что с увеличением степени деформации влияние кинематической асимметрии на среднее удельное усилие увеличивается. Отсюда следует, что при использовании рассогласования скоростей валков для устранения разнотолщинности в чистовых клетях ТЛС следует прокатку вести с максимально допустимыми обжатиями, что согласуется с требованием максимального использования производительности клетей.

Сравнение с данными работы [6] показало наличие систематического занижения величин p_{cp} , полученных методом фотоупругости, в сравнении с полученными методом штифтовых месдоз. При $K_v = 1,0$ разница составляет 3,74 МПа (7,05 %), а при $K_v = 1,18-10,11$ МПа (23,8 %). Т. о., сплющивание валков из органического стекла, ведущее к увеличению длины очага деформации, заметно влияет на точность определения контактных напряжений.

Зависимость (1) позволила определить максимально возможное уменьшение силы прокатки за счет кинематической асимметрии. При $\varepsilon = 30\%$ при прочих равных условиях уменьшение скорости ведомого валка на 28,5% приведет к уменьшению силы прокатки в 1,724 раза, т. е. на 72,4%, что существенно больше достигнутого на стане 3600 снижения в 10%. На ТЛС возможная величина K_v ограничена началом пробуксовки, возникающей при $K_v \approx 1,18$. По литературным данным известно, что зависимость уменьшения силы прокатки от степени кинематической асимметрии в чистовых клетях ТЛС, близка к линейной [9]. Это позволило интерполяцией полученных данных найти, что при $K_v = 1,18$ силу прокатки можно уменьшить на $\approx 30\%$. При модуле жесткости чистовых клетей листовых станов $6 \div 8$ МН/мм и силе прокатки $20 \div 40$ МН диапазон регулирования толщины составит $1,0 \div 1,5$ мм, что более чем достаточно для устранения любой продольной разнотолщинности максимальной величины.

ВЫВОДЫ

Получены распределения нормального контактного напряжения при условиях, характерных для прокатки в чистовых клетях ТЛС при симметричном и кинематически асимметричном процессах. Форма эпюр напряжений подобна, но при наличии асимметрии их максимумы и площади уменьшаются. Интегрированием эпюр найдены их площади и величины среднего нормального напряжения p_{cp} . Регрессионным анализом получена зависимость относительного снижения p_{cp} при асимметричной прокатке от степени деформации. Установлено, что при степени кинематической асимметрии 1,285 величина p_{cp} , а, следовательно, и сила прокатки, могут быть уменьшены на 72%. При K_v до 18% уменьшение силы прокатки будет равно примерно 30%, что позволит устранять продольную разнотолщинность от 1,0 до 1,5 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Регулирование разнотолщинности листов на толстолистовых станах управлением скоростным режимом прокатки / Коновалов Ю. В., Будаква А. А., Гончаров В. Е., Завражный А. Н. // *Металл. и горнорудн. промышленность*. – 1987. – № 1. – С. 25–26.
2. Освоение прокатки толстых листов с кинематической асимметрией на стане 3600 / В. С. Горелик, А. А. Будаква, П. С. Гринчук и др. // *Сталь*. – 1984. – № 7. – С. 31–33.
3. Синицын В. Г. Несимметричная прокатка листов и лент / В. Г. Синицын. – М.: *Металлургия*, 1984. – 167 с.
4. Полухин В. П. Контактное взаимодействие металла с валками при несимметричной прокатке тонких полос. Сообщение 1. / В. П. Полухин, В. Н. Скороходов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1976. – № 12. – С. 81–84.
5. Полухин В. П. Контактное взаимодействие металла с валками при несимметричной прокатке тонких полос. Сообщение 21. / В. П. Полухин, В. Н. Скороходов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1977. – № 1. – С. 72–73.
6. 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. сб. наук. праць*. – Краматорськ. – 2007. – С. 369–373.
7. А. с. 1380814 СССР, МКИ В 21 В 31/00. Устройство для пластической деформации металла / В. Ф. Потапкин, В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, В. П. Орел (СССР). – № 4137489; заявлено 21.10.86; опубл. 1988, Бюл. № 10.
8. Боровиков В. *Statistica. Искусство анализа данных на компьютере* / В. Боровиков. – С.-Петербург: «Питер», 2001. – 656 с.
9. Красовский Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Г. Филаретов. – Минск: БГУ, 1982. – 302 с.
10. Асимметричная прокатка толстых листов в чистовой клетке стана 3600 / А. П. Митьев, П. С. Гринчук, А. А. Будаква и др. // *Усовершенствование технологии производства толстолистовой стали: темат. отр. сб.* – М.: *Металлургия*, 1981. – С. 29–34.

Кулик А. Н. – канд. техн. наук, доц. ДГМА;
Данько А. В. – ассистент ДонГТУ;
Юрков К. Ю. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;
ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: danko_av@mail.ru