

УДК 669.012.2

Ткаченко Э. А., Гришин В. С., Ткаченко К. Э.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕНАСЫЩЕННОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА ТЕКСТУРИРУЮЩИХ ВАЛКОВ С ХОЛОДНОКАТАНЫМ ЛИСТОМ

Силовое взаимодействие микронеровностей текстурирующей поверхности прокатных валков с поверхностным слоем холоднокатаных листов значительно зависит от вида деформаций в зоне единичного контакта и степени насыщенности площадей фактического множественного контакта подвижного сопряжения. В общем случае, исходя из кинематики локального взаимодействия единичных выступов валков с текстурируемым поверхностным слоем холоднокатаного листа, имеют место упругие, упругопластические и пластические деформации. Условия перехода от упругого к упругопластическому контакту оцениваются отношением величины внедрения h к радиусу закругления вершины выступа r . Критерий перехода к пластическим деформациям выводится из условия существования некоторого критического значения средних нормальных напряжений на контакте, при котором материал полностью переходит в состояние пластического течения. Для оценки поведения текстурируемого материала в диапазоне практически используемых нагрузок введен индекс пластичности в виде соотношения твердости поверхностного слоя к модулю упругости материала листа [1]. Исходя из постоянства объема перedeформируемого материала подповерхностного слоя установлен эффект выдавливания материала холоднокатаного листа с равномерным его распределением по текстурирующему профилю валка [2]. При очень высоких удельных нагрузках, достигающих давления текучести материала, реализуется эффект интерференции пластических зон [3]. Принципиально новым в прикладном аспекте является установленная связь между технологией обработки рабочей поверхности валков и параметрами текстурированной поверхности [4]. Взаимодействие твердых тел при упругопластических деформациях, с учетом изменения в процессе эксплуатации микрогеометрии поверхности более жесткого элемента подвижного сопряжения, изучено недостаточно.

Целью работы является разработка механической модели текстурирования холоднокатаных листов и исследование механизма формирования программируемой рабочей поверхности валков, обеспечивающих повышенную параметрическую надежность текстурирования.

Применительно к механизму текстурирования холоднокатаного листа в установившемся режиме дросселирования имеют место упругопластические деформации. Циклическое приложение локальной нагрузки внедряющимися выступами происходит при нарушении согласованного движения валков относительно прокатываемых листов. В контакт вступают свежие недеформированные участки текстурируемой поверхности листов и деформация в зоне контакта происходит по неупрочненной поверхности листа.

Важность предела упругости в оценке триботехнического поведения микровыступов рабочей поверхности валков связана с задачей обеспечения их высокой износостойкости в процессе текстурирования холоднокатаных листов. Износостойкость растет с увеличением твердости и модуля упругости материала рабочей поверхности валков. Величина предела упругости, которая связана с соотношением твердости и модуля упругости, принята в качестве параметра наиболее адекватно оценивающего износостойкость рабочей поверхности валков.

При использовании нанослоев и при некоторых оптимальных толщинах многослойных покрытий, наблюдается непропорциональное повышение твердости поверхностных объемов композита. При правильном выборе материалов покрытия и технологии их нанесения твердость достигается за счет производства износостойких поверхностей с комбинацией свойств, ранее недоступных аддитивно. Нанопокрyтия эффективны в снижении износа в структурах, выдерживающих значительные постоянные и знакопеременные нагрузки, характерных при текстурировании холоднокатаного листа.

Наибольшее распространение для объяснения силового взаимодействия твердых тел при внешнем обкатывании с проскальзыванием получила сферическая модель шероховатой поверхности [5]. В модели взаимодействия прокатный валок – текстурируемый лист (рис. 1) приняты следующие допущения.

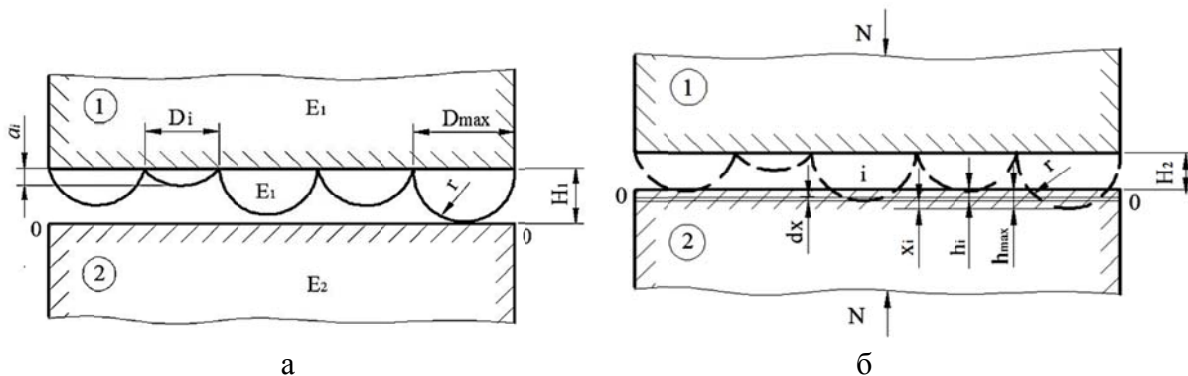


Рис. 1. Основная расчетная схема – контакт текстурирующей поверхности валка 1 с идеально гладкой поверхностью холоднокатаного листа 2:

а – исходное положение; б – после приложения сжимающей нагрузки

- прокатные валки имеют развитую микрогеометрию рабочей поверхности, а холоднокатаный лист – гладкую;
- микронеровности поверхности валков представляют собой абсолютно жесткие сферические сегменты одинакового радиуса;
- волнистость поверхностей валков и холоднокатаных листов, а также отклонения их геометрических характеристик пренебрежимо малы;
- текстура, формируемая выступами рабочей поверхности валков в пластически деформированном подповерхностном объеме холоднокатаного листа, идентична структуре механической модели, программируемой параметрами плотности и разновысотности сферических выступов заданных радиусов;
- при подвижном упругопластическом контакте имеет место проскальзывание;
- текстурируемый лист устойчив в плоскости движения и в очаге деформации моделируется распределенной нормальной нагрузкой, действующей на жесткое полупространство.

Упругий контакт имеет место, когда максимальные локальные напряжения в области наиболее внедренных выступов рабочей поверхности валков меньше твердости холоднокатаного листа. Это соответствует величине внедрения:

$$\frac{h}{r} = 2,4(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \quad (1)$$

и контурному давлению для шероховатой поверхности:

$$p_c = \frac{4}{\Delta} \frac{HB^3(1 - \mu^2)^2}{E^2} \quad (2)$$

Ввиду распределения неровностей по высоте (рис. 1), часть максимальных выступов, имеющих внедрение больше, чем определенное по формуле (1), пластически деформирует материал текстурируемого листа, выступы второго уровня рабочей поверхности прокатного валка, имеющие внедрение меньше, чем определенные по формуле (1), деформируют материал листа упруго, а неровности, внедрение которых изменяется в пределах:

$$2,4(1-\mu^2)^2\left(\frac{HB}{E}\right)^2 \leq \frac{h}{r} \leq 5,4(1-\mu^2)^2\left(\frac{HB}{E}\right)^2, \quad (3)$$

деформируют материал упругопластически. В отличие от упругого контакта фактическая площадь контакта при пластических деформациях не зависит от микрогеометрии поверхностей, а сближение определяется распределением материала подповерхностного объема листа в текстурирующем слое вала. В первом приближении можно считать, что после достижения контурных давлений, определенных формулой (2) при взаимодействии рабочей поверхности валков с текстурируемой поверхностью листа преобладает пластический контакт, что соответствует принятому допущению при выборе расчетной модели. При упругих и пластических деформациях в зонах взаимодействия прокатный валок – холоднокатаный лист, за период стойкости текстурирующей поверхности вала, имеют место ненасыщенный, а при предельном сближении насыщенный контакты. Ненасыщенный пластический контакт реализуется при контурных давлениях, определяемых по формуле [6]:

$$\frac{14,5\left(\frac{HB(1-\mu^2)}{E}\right)^4}{\Delta^2} \leq \frac{p_c}{HB} \leq 0,062. \quad (4)$$

В качестве базовой технологии текстурирования рабочей поверхности валков принят электроэрозионный способ нанесения матового рельефа заданной микрогеометрии [4]. Свойства текстурированной поверхности равномерны во всех направлениях и задаются режимами электроискровой насечки (табл. 1). Оценка качества текстурированной поверхности валков базируется на методике профилографирования поверхности, позволяющей определить параметры опорной кривой профиля v и b . Параметры v и b текстурированного листа рассчитываются по методике [7] на основании известного закона распределения пластически передеформированного материала в шероховатом слое рабочей поверхности вала.

По найденному r экспериментально определена высота неровностей, формируемых в поверхностном слое холоднокатаного листа в процессе текстурирования. Значения параметров h и r приняты в качестве исходных в расчетной схеме.

Отношение среднего расстояния между отпечатками выступов внедрения к их среднему диаметру при пластической деформации определяет взаимное влияние микрогеометрии рабочей поверхности валков на текстуру холоднокатаного листа. Область распространения пластических деформаций вокруг единичного выступа (индентора) соизмерима с диаметром отпечатка. Ограничение для свободного распространения пластических деформаций наступает в момент, когда $d/S \approx 0,33$, что близко к полученным результатам, представленным в табл. 2 для отпечатков внедрения максимальных выступов ($d/S = 0,15 \div 0,28$). Эффект взаимного влияния реализуется при включении в процесс взаимодействия выступов второго уровня, которые резко изменяют соотношение $d/S \geq 1,0$. Следовательно, определенный эффект при больших деформациях начинается при взаимодействии текстурируемого слоя холоднокатаного листа с тем «фундаментом», на котором расположены максимальные и промежуточные выступы рабочей поверхности валков. Установленные [5] три стадии в процессе деформирования единичными выступами модельных систем адекватно распространяются для множественного контакта всего ансамбля выступов рабочей поверхности валков. На первой стадии при $0 < d/D < 0,5$ (где d – диаметр площадки смятия шаровым индентором) деформируемый материал вытекает через боковую поверхность сферы и скапливается в виде валика примыкающего к текстурирующей поверхности вала.

Общий объем материала валика остается неизменным и средние давления текучести не зависят от деформации. Это равносильно прямой пропорциональности между фактической площадью контакта и приложенной нагрузкой, установленной в трибоконтакте в работе [6].

Таблица 1

Параметры рабочей поверхности текстурирующих валков, изготовленные по технологии электроэрозионной насечки и нанокпозиционного покрытия напылением из газовой фазы

№ реж.	Режим формирования микротопографии поверхности валков	Параметры микрогеометрии рабочей поверхности валков				Параметры опорной кривой профиля		Микротопография рабочей поверхности		
		R_a , мкм	R_{max} , мкм	R_p , мкм	t_m	v	b	средний шаг выступов S , мкм	плотность выступов, шт/мм ²	радиус закругления вершин выступов r , мкм
1	шлифованная поверхность									
2	электроэрозия по режиму № 1	1,64	17,5	5,33	0,33	1,15	1,27	53,4	350	10,2
3	электроэрозия по режиму № 2	3,73	32,8	15,1	0,47	2,8	2,5	108	86	19,1
4	электроэрозия по режиму № 3	4,82	33,4	17,2	0,5	2,57	2,67	193	27	18,3
5	электроэрозия по режиму № 4	5,26	41,7	21,2	0,5	3,03	3,82	182	30	19,5
6	электроэрозия по режиму № 5	6,92	558	30,8	0,5	3,45	3,88	203	24	21,9
7	электроэрозия по реж. № 4 с нанокпозиционным покрытием AlCrN (3 мкм)	6,5	56,6	30,1	0,47	3,35	3,89	199	25	21,1
8	электроэрозия по режиму № 5 с нанокпозиционным покрытием W (C) 14 % (2 мкм)	3,6	28,7	12,2	0,5	2,38	3,82	203	24	43,6
9	электроэрозия по режиму № 3 с нанокпозиционным покрытием B-Si-PЗМ (1 мкм)	4,5	37,2	14,1	0,5	2,13	3,96	199	25	35,4
		4,3	30,2	16,6	0,5	2,86	2,77	182	30	24,9

Вторая стадия охватывает диапазон $0,5 < d/D < 1$ (где D – диаметр основания выступа).

При таких деформациях пластическое течение материала текстурируемого листа происходит по всей боковой поверхности сферического сегмента и частично захватывает фундамент единичного выступа. Первоначальные размеры отпечатка увеличиваются за счет включения основания выступов в процесс пластического деформирования. Мелкие впадины профиля второго уровня (рис. 1), примыкающие к максимальным выступам, заполняются и наблюдается подъем формируемого профиля в окрестностях деформирующих выступов. При этом наблюдается некоторое повышение давления текучести.

Таблица 2
 Параметры сформированной текстуры на поверхности холоднокатаной листовой стали 08кп
 толщиной 2 мм

Параметры рабочей поверхности вала табл. 1 № п/п	Параметры сближения		Параметры формируемой текстуры				Параметры опорной кривой	
	Безразмерная величина внедрения h/r	радиус закругления вершины выступов r , мкм	шероховатость Ra , мкм	плотность отпечатков внедрения выступов n_r , шт/мм ²	средний диаметр отпечатков выступов d , мкм	средний шаг отпечатков максимального и второго уровня Sr , мкм	v	b
1	$\frac{0,283}{0,409}$	10,2	$\frac{1,16}{1,75}$	350	$\frac{15,3}{18,3}$	$\frac{53}{13,7}$	2,06	0,9
2	$\frac{0,268}{0,381}$	19,1	$\frac{2,11}{3,02}$	$\frac{57}{86}$	$\frac{28}{33,4}$	$\frac{108}{23,7}$	2,37	1,51
3	$\frac{0,321}{0,486}$	18,3	$\frac{2,35}{3,56}$	$\frac{18}{27}$	$\frac{29,12}{36,6}$	$\frac{193}{28,8}$	2,45	2,26
4	$\frac{0,361}{0,547}$	19,5	$\frac{2,82}{4,27}$	$\frac{20}{30}$	$\frac{31,1}{40,8}$	$\frac{182}{39,5}$	2,65	1,90
5	$\frac{0,399}{0,604}$	21,9	$\frac{3,49}{5,29}$	$\frac{16}{24}$	$\frac{39,1}{48,12}$	$\frac{203}{41,9}$	2,50	1,89
6	$\frac{0,410}{0,583}$	21,1	$\frac{3,46}{4,93}$	$\frac{17}{25}$	$\frac{38,2}{46,86}$	$\frac{199}{40,8}$	2,41	1,67
7	$\frac{0,109}{0,156}$	43,6	$\frac{1,80}{2,72}$	$\frac{16}{24}$	$\frac{39,5}{48,7}$	$\frac{203}{41,9}$	2,87	1,96
8	$\frac{0,160}{0,228}$	35,4	$\frac{2,27}{3,44}$	$\frac{17}{25}$	$\frac{40,04}{47,80}$	$\frac{199}{40,8}$	2,55	1,77
9	$\frac{0,205}{0,310}$	24,9	$\frac{2,04}{3,09}$	$\frac{20}{30}$	$\frac{31,80}{39,20}$	$\frac{182}{39,5}$	2,38	2,19

Примечания:

1. Числитель – значения параметров при внедрении $h = 0,33Rp$ (Rp – наибольшая высота выступов); знаменатель – $h = 0,5Rp$.

2. Средний шаг Sr максимальных (числитель) и второго уровня (знаменатель) отпечатков программируется микро топографией рабочей поверхности валков (табл. 1).

Третья стадия ($1,25 > d/D > 1$) отличается масштабным фактором протекающих процессов, сопровождаемых резким увеличением давления текучести. При $d/D > 1$ возвышение плоской поверхности текстурируемого холоднокатаного листа над условной границей сопрягаемых тел в исходном состоянии при соприкосновении без внедрения выступов (рис. 1, а) соизмеримо с величиной объема межконтактного пространства. В данной ситуации пластически деформируемый объем материала холоднокатаного листа соприкасается не только с микровыступами рабочей поверхности вала, но и с прилегающими объемами пространства впадин структуры его шероховатого слоя, что объясняет завышенные давления текучести.

В пределах $d/D < 0,4$ существенного различия в давлении текучести для множественного и единичного контактов не обнаружено. Однако при $d/D > 0,4$ для всех d/S давление текучести для множественного контакта с участием выступов второго уровня (табл. 2) начинает заметно возрастать. При $d/D \approx 1,0$ оно примерно в 1,5 раза выше, чем для единичного выступа. Очевидно, это является результатом взаимодействия близлежащих выступов в процессе их совместного пластического деформирования поверхностного слоя холоднокатаного листа и возникновения гидростатического давления в замкнутых локальных областях сопряжения.

При использовании нанокпозиционных покрытий различной толщины на рабочей поверхности валков отмечено существование такого интервала значений глубины внедрения выступов, в пределах которого процесс вдавливания протекает наиболее эффективно при оценке по соотношению H/E текстурируемого листа. При малых глубинах внедрения область конечных пластических деформаций ограничивается твердой пленкой вторичных структур поверхностного слоя текстурируемого листа. При критической глубине внедрения $[h]$ пластическая область распространяется на всю толщину пленки. Процесс внедрения выступа при $h > [h]$ существенно определяется толщиной пленки и удельным усилием вдавливания. При сближении валков и текстурируемого листа (рис. 1, б) на величину $\varepsilon = H_1 - H_2$ часть выступов внедрится на глубину, меньшую критической. Эти выступы испытывают одинаковое давление, численно равное твердости пленки. Максимальные выступы, находящиеся в контакте, испытывают более высокое давление, которое определяется не только свойствами пленки, но и глубиной их внедрения, величиной радиусов закругления вершин выступов и толщиной пленки (табл. 2).

ВЫВОДЫ

Модель ненасыщенного упругопластического контакта текстурирующих валков с холоднокатаным листом адекватно отражает механизм формирования текстуры в реальном процессе текстурирования.

Взаимное влияние при высокой плотности контакта проявляется при больших пластических деформациях. Оценочный расчет на базе модели ненасыщенного пластического контакта позволяет получить порядок отношения S/d , при котором реализуется эффект взаимного влияния текстурирующих выступов рабочей поверхности валков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Greenwood J. A. Contact of Nominally Flat Surface / J. A. Greenwood, J. B. P. Williamson // Proc. Roy. Soc. Ser. A. – 1996. – Vol. 295, № 1442. – P. 300.
2. Williamson J. B. P. The Real Area of Contact between Plastically Loaded Surface / J. B. P. Williamson, R. T. Hunt // Mecanique, materiaux electricile. Numero special. – L'Usure, 1972. – № 1. – P. 22–25.
3. Uppal A. H. The Plastic Contact between a Rough and a Flat Surface / A. H. Uppal, S. D. Probert // Wear. – 1972. – Vol. 20. – P. 381–400.
4. Гришин В. С. Технологические аспекты параметрической надежности дроссировочных валков листопрокатных станков / В. С. Гришин, К. Э. Ткаченко // Сб. научн. трудов. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – Вып. 42. – С. 90–97.
5. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Трение, изнашивание и смазка : справочник. В 2-х кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алипина. – М. : Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.
7. Ткаченко К. Э. Методика экспериментального определения параметров микротопографии текстурируемых холоднокатаных листов / К. Э. Ткаченко // Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельное состояние элементов конструкций : материалы между. науч.-техн. конф. – Севастополь, 2012. – С. 27–31.

Статья поступила в редакцию 04.05.2012 г.