

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПОЛОС

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FORMING THE MICRORELIEF OF COLD-ROLLED STRIPS

Ю.А.Мухин, А.В.Рыблов

¹ ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», prokatka@stu.lipetsk.ru

² ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

Abstract

The article deals with the development of a mathematical model for forming the microrelief of a strip surface during cold-rolling or temper-rolling. The mathematical model makes it possible to analyze the influence of various means of texturing the surface of working rolls and the conditions of rolling on the parameters of roughness of cold-rolled strips.

Одним из важных показателей качества холоднокатаной полосовой стали является микрогеометрия ее поверхности.

Формирование шероховатости поверхности полосы в процессе прокатки является сложной комплексной проблемой, включающей вопросы нанесения шероховатости с требуемыми параметрами на поверхность валков и анализ условий формирования шероховатости поверхности полосы за счет отпечатываемости вершин микрорельефа поверхности валков в поверхность полосы при холодной прокатке или дрессировке.

Разработка математической модели процесса формирования микрорельефа холоднокатаной полосы позволит выполнить анализ влияния различных текстур поверхности рабочих валков и параметров очага деформации в клети стана холодной прокатки на параметры шероховатости холоднокатаных полос.

Моделирование шероховатости поверхности рабочих валков

Микрорельеф поверхности валка и полосы представляет собой трехмерный пространственный объект - криволинейную поверхность. Поверхность рельефа может быть задана в виде непрерывной функции высоты $z = f(x, y)$ или в виде совокупности дискретных значений высот в узлах регулярной прямоугольной сетки.

Описать сложную трехмерную поверхность в виде непрерывной функции достаточно сложно, поэтому представим поверхность в виде двумерного массива значений высот z_{ij} для каждого узла с координатой x_i , y_j (i – порядковый номер узла по горизонтали, j – по вертикали). Количество узлов будет равно $n \times m$, где m , n – количество разбиений по оси X и Y, соответственно.

Принцип применяющихся на практике способов текстурирования поверхности рабочих валков состоит в том, что поверхность формируется в

результате точечных воздействий, создающих на поверхности валка какие-либо неровности. При создании микрорельефа дробеструйным, электроэрозионным, лазерным или электронно-лучевым способами происходит формирование на поверхности рабочего валка углублений различной формы.

Процесс образования впадины на поверхности валка, в результате пластической деформации частицами дроби, электроэрозионной или лазерной обработок, моделируем вычитанием из номинальной плоскости трехмерных геометрических объектов (рис. 1). Вычитаемый объект представляет собой геометрическое тело, образованное вращением криволинейной границы вокруг оси Z. Форму боковой границы опишем с помощью степенной зависимости:

$$z = a \cdot r^n.$$

Изменением коэффициента n в уравнении (1) можно моделировать различную форму впадины на поверхности валка.

При текстурировании поверхности описанными способами около впадины на поверхности валка образуется локальное утолщение. Объем локального утолщения равен объему образовавшейся впадины в материале валка. При формировании неровностей в результате пластической деформации дробью, форма локального утолщения может быть получена, исходя из решения задачи о внедрении жесткого индентора в пластическое полупространство [1].

При дробеструйном или электроэрозионном текстурировании поверхность рабочего валка формируется случайным образом. Данные технологии насечки не позволяют строго определить геометрические размеры и положение на поверхности каждой конкретной единичной впадины, указанные параметры являются случайными величинами. В связи с этим, шероховатость поверхности представляет собой пересекающиеся между собой стохастически расположенные выступы и впадины.

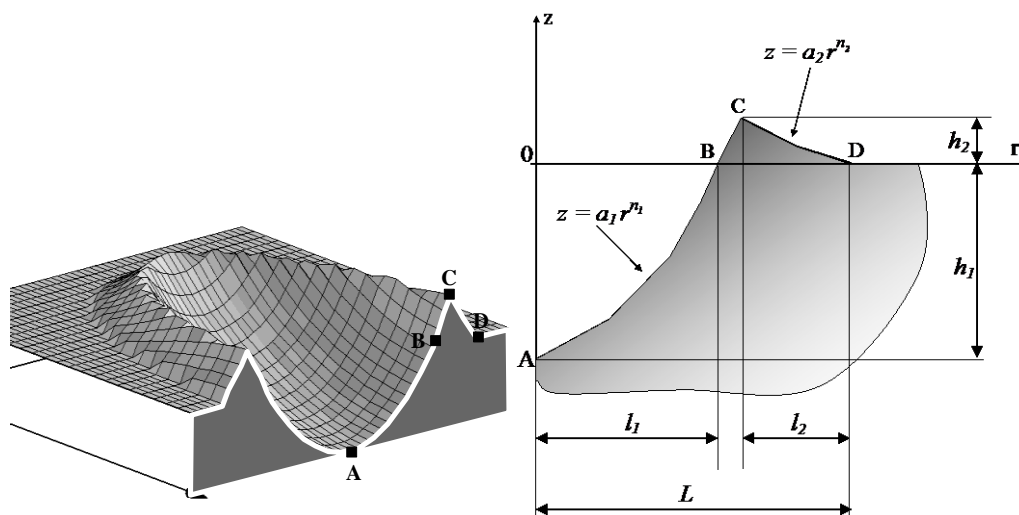


Рис. 1. Схема единичного вычитаемого объекта и его вертикальное сечение

Значения случайных факторов при моделировании микрорельефа поверхности вала будем генерировать с помощью датчиков псевдослучайных чисел по заданному закону распределения. Предположим, что случайные элементы имитационной модели приведут к результатам, которые также носят вероятностный характер. Разброс данных, полученных в ходе имитационного эксперимента, зависит в первую очередь от точности заложенных в модель вероятностных распределений.

Процесс имитационного моделирования участка микрорельефа поверхности будет состоять

в последовательном вычитании из горизонтальной плоскости заданного количества геометрических объектов (рис. 2), форма и размеры которых определяются исходя из режима и способа насечки.

Положение конкретной единичной впадины на поверхности определяется координатой центра вычитаемого геометрического объекта (x_0, y_0) на плоскости и является равномерно распределенной, дискретной случайной величиной, которая может принимать значения из интервала $[1 \dots x_{\max}] [1 \dots y_{\max}]$, где x_{\max}, y_{\max} - размеры участка моделирования.

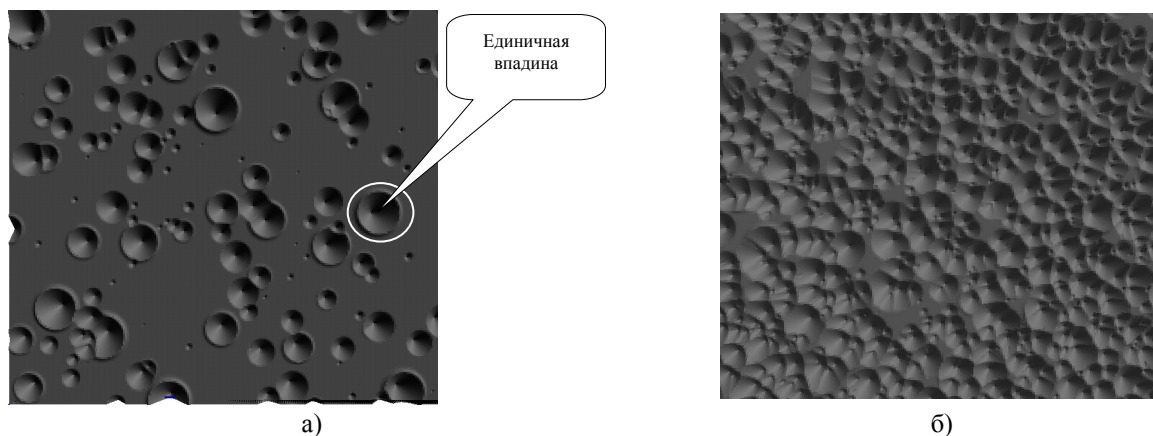


Рис. 2. Моделирование стохастической поверхности. Начальный (а) и конечный (б) этапы моделирования

Так как геометрические характеристики микровпадины (глубина и форма боковой поверхности) являются величинами, зависящими от большого количества случайных факторов, то они также являются случайными величинами и, подчиняясь нормальному закону распределения.

Моделирование процесса переноса шероховатости поверхности вала на полосу

Перенос шероховатости поверхности вала на полосу происходит в результате последовательного внедрения микронеровностей шероховатости поверхности рабочего вала в гладкую поверхность холоднокатаной полосы (рис. 3).

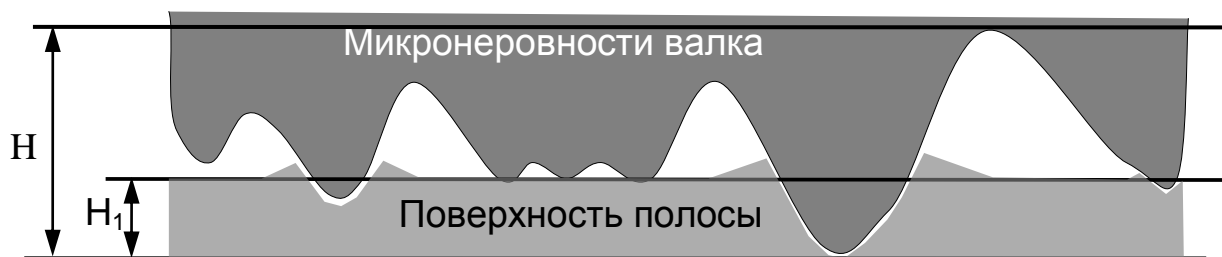


Рис. 3. Схема процесса переноса микронеровностей поверхности вала на полосу
(H – расстояние между линией выступов и линией впадин,
 H_1 – глубина проникновения микровыступов поверхности вала в полосу)

Данный непрерывный процесс представим в виде массива последовательных дискретных состояний, каждое из которых соответствует определенной глубине внедрения микронеровностей поверхности вала в полосу. Каждое из состояний будет определяться следующими характеристиками:

- площадью поверхности контакта вала и полосы;
- распределением напряжений на контактной поверхности;
- моделью трехмерной поверхности, отражающей микрорельеф поверхности полосы.

Для вычисления величины усилия, необходимого для внедрения микронеровностей вала в поверхность полосы на заданную глубину, необходимо определить площадь контактной поверхности и распределение напряжений на ней.

Смоделированный микрорельеф рабочего вала с помощью разработанной модели представляет собой трехмерную поверхность, заданную с помощью двухмерного массива значений высоты Z_{ij} для каждого узла с координатой X_{ij} , Y_{ij} .

Разобьем контактную поверхность на отдельные плоские элементы. Для этого, используя четыре рядом расположенные точки карты высот, зададим четырехугольник, который впоследствии разобьем на два прямоугольных треугольника.

Задача определения контактных напряжений при внедрении трехмерного микрорельефа является объемной задачей пластического течения. Для данного типа задач не разработано достаточно простых и быстродействующих методов ее решения, поэтому целесообразным является приведение условия задачи к плоской или осесимметричной схеме пластического течения.

Предположим, что существует такое сечение, проходящее через узел N_i , для которого справедлива гипотеза плоской деформации (то есть перемещения частицы параллельны некоторой плоскости (r, z)).

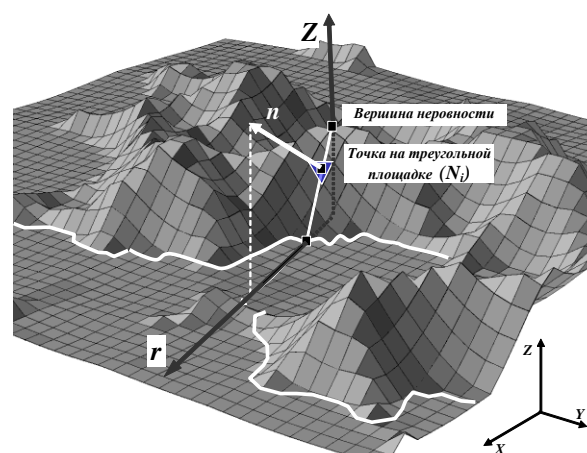


Рис. 4 Схема построения плоского сечения

Плоское сечение будет совпадать с плоскостью, перпендикулярной плоскости XOY , проведенной из узла N_i и направленной по нормали к боковой поверхности треугольной площадки на которой он расположен (рис. 4).

Для нахождения значения напряжения в точке N_i на контактной поверхности используем метод линий скольжения (метод характеристик), описание которого приведено в работе [2].

Задача внедрения жесткой неровности вала в пластическое полупространство полосы (рис. 5) относится к классу задач неустановившегося пластического течения, при котором пластическая область изменяется так, что ее конфигурация все время сохраняет геометрическое подобие некоторому исходному состоянию [3]. Линией раздела пластической и жесткой областей материала полосы является линия ABCD.

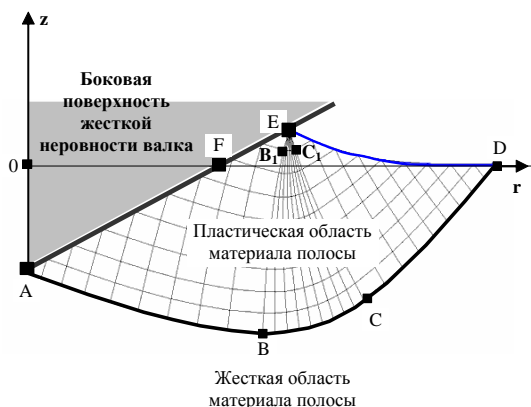


Рис. 5. Схема построения сетки линий скольжения при решении о внедрении изолированной неровности

Свободная граница материала (ED) задана при помощи значений координат узловых точек и может быть описана уравнением $z = f(r)$. Ее форма определяется следующими условиями:

1) объем вытесняемого на поверхность материала равен объему внедренной части микронеровности;

2) нормальные компоненты скорости на границе индентора (AE) и на свободной границе (ED) пропорциональны расстояниям от этих элементов до точки O, которая в процессе расширения пластической области остается неподвижной.

Условие прекращения процесса отпечатываемости для дискретного, триангулированного микрорельефа запишется в виде:

$$p_{np} \cdot S = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot s_i,$$

где p_{np} – удельное давление в очаге деформации;

σ – напряжение в i -ом узле, расположенном на фактической (контурной) поверхности касания;

S – площадь участка моделирования;

n – количество узлов;

s_j – площадь элементарной площадки.

При увеличении глубины проникновения микронеровностей OC_1 , произойдет увеличение размеров пластической области, при этом возникает взаимодействие между пластическими зонами соседних микронеровностей, которое вызовет рост значения среднего нормального напряжения на боковой контактной поверхности [4].

Для определения влияющих на процесс пластического течения соседних микроконтактов находим пересечение границ смежных пластических областей. Для этого проведем отрезки направленные из вершины микронеровности по направлению нормали к треугольной площадке.

Для двух микронеровностей с вершинами в точках G и C (рис. 6), используя решение задачи о внедрении одиночного индентора, определим границу вытесненного на поверхность материала. Материал среды, вытесняемый на поверхность при

внедрении микронеровности, будет накладываться на вытесняемый материал соседней микронеровности. Таким образом, определим форму границы АВ.

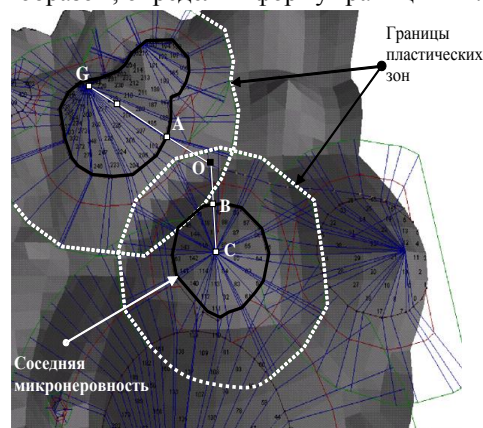


Рис. 6. Схема определения пересечения границ жестко-пластических зон соседних микронеровностей

Для построения сетки характеристик при решении задачи о вдавлении двух смежных микронеровностей сделаем допущение о том, что точки A, B, C, G, O расположены на одной прямой.

При известной форме свободной границы АВ решение данной задачи сводится к последовательному решению различных типов краевых задач для каждой из областей: ABE – решение задачи Коши;

AFE, BDE – решение задачи Римана;

AGF, BCD – решение смешанной задачи (рис.7).

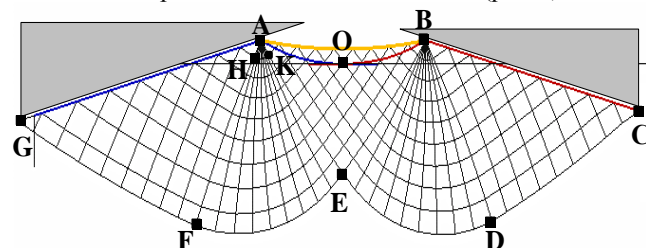


Рис. 7. Схема линий скольжения при контакте соседних микронеровностей

После построения поля напряжений, удовлетворяющего уравнениям равновесия и условиям пластичности, можно найти усилия, действующие на боковую поверхность микронеровности. Для учета расположения микронеровностей относительно друг друга в трехмерном пространстве, используем значение величины угла между отрезками GO и OC.

При этом значение среднего нормального напряжения будет равно:

$$\sigma = K_{cross} \cdot \sigma,$$

$$K_{cross} = \frac{\angle GOC}{\pi},$$

где $\angle GOC$ – величина угла между отрезками GO и OC (рад.).

В случае, когда происходит контакт пластических зон нескольких микронеровностей, применим принцип суперпозиции:

$$\sigma = \sigma \cdot k_{multi},$$

$$K_{multi} = 1 + \sum_i^n k_i,$$

$$k_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_0},$$

где n – количество влияющих микронеровностей;

σ_0 – величина среднего напряжения, полученная из решения задачи о внедрении единичного индентора;

σ_i – величина среднего напряжения, полученная из решения задачи о внедрении двух инденторов.

Определив из условия (2) величину сближения между поверхностями вала и полосы, построим трехмерный микрорельеф поверхности, отражающий конечную шероховатость полосы после прокатки.

Построение зависимости, описывающей формирование микрорельефа холоднокатаной полосы

Для создания зависимости, отражающей влияние параметров шероховатости поверхности рабочих валков и параметров прокатки на микрогеометрию поверхности холоднокатаной полосы, использовали разработанную методику математического моделирования. С ее помощью моделиро-

$$Ra_{полоса} = 1,22 + 0,3 \cdot Ra_{валок} + 0,002 \cdot Pc(0,5)_{валок} + 0,97 \cdot h_k - 0,0017 \cdot \sigma_m + 0,0032 \cdot \sigma_0 + 0,0058 \cdot \sigma_1 - 0,0065 \cdot R - 0,00042 \cdot B;$$

(7)

где $Ra_{полоса}$ – среднеарифметическое отклонение микронеровностей поверхности полосы, мкм; $Ra_{валок}$ – среднеарифметическое отклонение микронеровностей поверхности рабочего вала, мкм; $Pc(0,5)_{валок}$ – количество выступов на 1 см длины поверхности вала; h_k – конечная толщина полосы, мм; B – ширина полосы, мм; σ_m – исходный предел текучести материала полосы, МПа; σ_0 – заднее натяжение, МПа; σ_1 – переднее натяжение, МПа.

Одним из основных параметров, влияющих на величину усилия прокатки, является радиус рабочих валков, влияющий на протяженность длины дуги контакта в очаге деформации. Используя разработанную имитационную модель, исследуем возможность перераспределения части обжатия в последнюю клетку стана путем использования рабочих валков меньшего диаметра. Анализируя полученные зависимости, сделаем вывод о том, что применение рабочих валков с меньшим радиусом позволит повысить величину относительного обжатия тонких полос в последней клетке стана холодной прокатки. Что в свою очередь увеличит коэффициент отпечатываемости микрогеометрии рабочих валков на поверхности полосы.

вали процесс формирования шероховатости поверхности полосы при прокатке на валках с различным микрорельефом поверхности при различных режимах прокатки. Параметры шероховатости смоделированных поверхностей рабочих валков различаются между собой, но при этом находятся в пределах значений, характерных для микрогеометрии поверхности, создаваемой при помощи дробеструйного и электроэрозионного текстурирования.

Диапазон изменения параметров прокатки при имитационном моделировании выбирался таким образом, чтобы отразить весь сортамент прокатываемых на стане холоднокатаных полос.

Для выбора параметров шероховатости, характеризующих микрорельеф поверхности рабочего вала, исходили из того, что включаемые в исследование параметры должны быть независимыми друг от друга, так как наличие сильной корреляционной зависимости между ними свидетельствует о том, что они в значительной степени дублируют друг друга.

Статистически обработав полученные результаты имитационного моделирования, построим регрессионную зависимость, связывающую рассматриваемые параметры между собой:

Список литературы

1. Огарков Н.Н., Залетов Е.Е., Беляев А.И. Формирование требуемого микрорельефа при прокатке ленты из сплава АМг2 путем определения режимов дробеметной обработки рабочих валков математическим моделированием. // Сборник «Обработка металлов давлением», вып.17. УПИ, 1970. С. 93 – 97.
2. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке. - М.:Металлургия, 1991. – 264 с.
3. Соколовский В.В. Теория пластичности. М.: Гостехиздат, 1950. - 354 с.
4. Лемберский В.Б., Шайняк И.Р. О взаимном влиянии микронеровностей при контактировании. // Трение и износ. 1983. №2. С. 301-307.