

УДК 621.771.23

ББК 78.34

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА ПОДКАТА В ПРОЦЕССЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

Мещерякова А. О.<sup>1</sup>

(ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк)

*В работе предложена математическая модель, позволяющая отследить трансформацию поверхностных дефектов типа «раковина» на любой стадии деформации процесса холодной прокатки, а также приведены результаты исследования формоизменения дефекта с помощью конечно-элементного анализа. Материалы работы могут быть применены в металлургическом производстве для повышения качества поверхности холоднокатаных полос.*

Ключевые слова: пластическая деформация, холодная прокатка, конечно-элементный анализ, напряжения, поверхностные дефекты

## 1. Введение

В настоящее время этап развития прокатного производства характеризуется постоянным ростом требований к качеству металлопроката. Для определения качества прокатной продукции используется большое количество характеристик, таких как: химический состав, механические и химические свойства металла и др. Одной из наиболее значимых характеристик является

---

<sup>1</sup> Анастасия Олеговна Мещерякова, магистрант кафедры «Прикладная математика» (mao11077@rambler.ru).

наличие на поверхности металла дефектов, своевременное выявление которых исключают попадание брака на последующие этапы обработки.

Целью работы является исследование механизма формоизменения поверхностного дефекта горячекатаного подката типа «раковина» и полосы в процессе холодной прокатки, его моделирование, а также определение влияния технологических факторов процесса на выкатываемость дефектов поверхности для разработки режимов холодной прокатки, способствующих предотвращению образования поверхностных дефектов.

Исследование трансформации поверхностных дефектов проводилось путем построения математической модели процесса на основе теории плоской пластической деформации и кинематики прокатки, а также с помощью вычислительной системы конечно-элементного моделирования DEFORM-3D, которая предназначена для анализа трехмерного течения металла при различных процессах обработки металла давлением. Моделирование на ЭВМ с использованием МКЭ позволяет наглядно продемонстрировать картину видоизменения дефектов на каждом этапе прокатки листа и выполнить анализ дополнительных параметров.

## **2. Математическое моделирование процесса формоизменения поверхностного дефекта подката в процессе холодной прокатки**

### *2.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА*

В качестве математической модели трансформации поверхностного дефекта предложено рассматривать уравнение среднего контактного напряжения и критерий интенсивности сглаживания дефектов [4, 12].

Для вывода модели среднего контактного напряжения использовались основные уравнения плоской деформации, а также некоторые параметры очага деформации полосы и уравнение

равновесия Кармана [1, 4, 5, 7, 8]. Пренебрегая влиянием упругих деформаций валков и полосы, получим [13, 15]:

$$(1) \quad p_{cp} = 1.15\sigma_{\phi} \left(1 + \frac{\mu l}{2h_{cp}}\right),$$

где  $p_{cp}$  — среднее контактное напряжение,  $h_{cp}$  — средняя толщина полосы,  $\sigma_{\phi}$  — сопротивление металла пластичной деформации,  $\mu$  — коэффициент трения.

Для описания процесса прокатки полосы с дефектом был принят критерий интенсивности сглаживания дефекта [2]:

$$(2) \quad \zeta_{\delta} = 0.19(1 - e^{-0.9n_{\sigma}^3}) \left[1 + \left(\frac{h_0^2}{b_{\delta}^2} + \frac{9h_0^2}{l_{\delta}^2}\right) + (0.04 + 0.004 R_a^B)\right],$$

где  $n_{\sigma}$  — коэффициент напряженного состояния,  $b_{\sigma}$ ,  $l_{\sigma}$  — ширина и длина поверхностного дефекта,  $R_a^B$  — шероховатость поверхности рабочих валков.

Относительная глубина дефекта на  $i$ -ой стадии деформации определяется как:

$$(5) \quad \frac{b_i}{h_i} = \frac{b_0}{h_0} - \zeta_{\delta} \ln\left(\frac{h_0}{h_i}\right),$$

где  $b_i$ ,  $h_i$  — глубина дефекта и толщина полосы на  $i$ -ой стадии деформации.

Анализируя результаты, представленные на рисунке 1 можно сделать вывод, что дефекты небольшой глубины выкатываются интенсивнее нежели дефекты с большей начальной относительной глубиной, но при высоких суммарных обжатиях есть риск повторного образования дефекта.

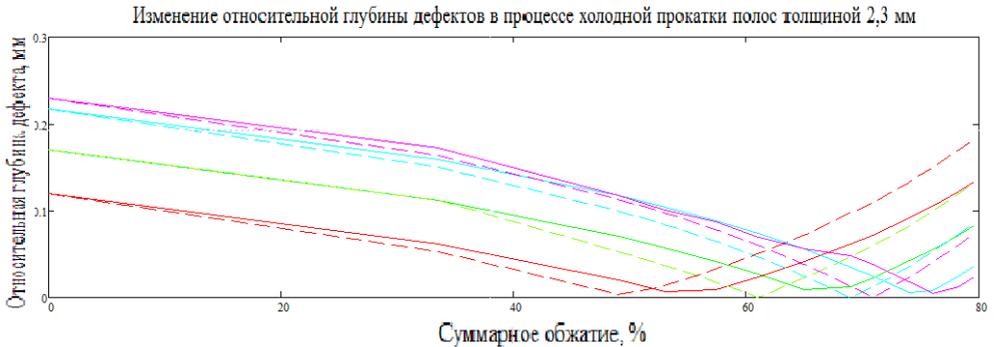


Рис. 1. График исследования зависимости относительных глубин дефектов от различных значений величин коэффициентов трения

Для повышения качества прокатываемых полос путем устранения поверхностных дефектов типа «вытравленная окалина» и «рябизна» предложено осуществлять прокатку со степенью суммарной относительной деформации, определяемой из выражения [14]:

$$(6) \quad \varepsilon_{\Sigma(onn)} = 0.366 - 1.255 \mu + 1.749 \frac{\delta_0}{h_0}.$$

## 2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА С ПОМОЩЬЮ МКЭ

Далее, с использованием результатов работ [8, 9, 10, 11], было проведено математическое моделирование процесса формоизменения поверхностных дефектов типа «раковина» при холодной прокатке полосы на непрерывном пятиклетевом стане 1700 холодной прокатки с помощью специализированного программного комплекса DEFORM-3D.

Программный комплекс DEFORM-3D базируется на следующих основных зависимостях:

Дифференциальное уравнение равновесия:

$$(7) \quad \frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{iz}}{\partial z} + G_i = 0,$$

Уравнение зависимости между вектором перемещений и компонентами тензора деформаций:

$$(8) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right).$$

Поле допустимых скоростей узловых точек конечных элементов в матричном виде:

$$(9) \quad v_i = [N] \{v_B\},$$

где  $[N]$  — функция формы элемента,  $\{v_B\}$  — вектор узловых скоростей.

Условие пластичности Губера-Мизеса:

$$(10) \quad \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} = \bar{\sigma}^2,$$

где  $\sigma'_{ij}$  — девиатор напряжений;

(11)  $\bar{\sigma} = \sigma_{\phi} = \sigma_{ucx} + a\varepsilon^b$  — предел текучести, представленный известным соотношением Третьякова–Зюзина, применимым для процессов холодного деформирования.

Напряжения трения на контактной поверхности определяется согласно закону Кулона-Амонтона:

$$(12) \quad \bar{\tau} = \mu \bar{\sigma},$$

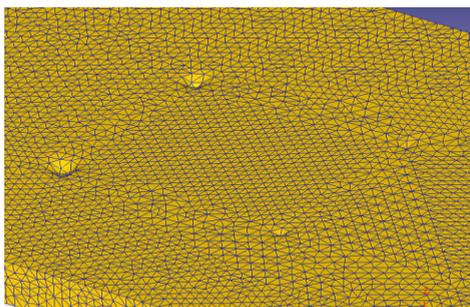
где  $\mu$  — коэффициент трения.

При моделировании процесса холодной прокатки были приняты следующие допущения:

- влияние упругих деформаций валков и полосы не учитывается;
- скорость прокатных валков постоянна на протяжении каждого прохода;
- отсутствие уширения полосы.

При помощи SolidWorks и КОМПАС-3D, программных комплексов САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, была смоделирована некоторая область подката начальной толщиной 4,5 мм. На поверхности полосы было смоделировано четыре поверхностных дефекта типа «ра-

ковина» разной глубины и с разным переходом к кратеру дефекта (рисунок 2).



*Рис. 2. Поверхность фрагмента смоделированной полосы с дефектами*

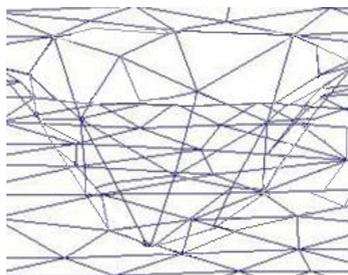
Диаметр рабочих валков принимали равным 600 мм. В качестве материала полосы задавали конструкционную углеродистую качественную сталь из базы программного комплекса DEFORM-3D, аналогичную стали 08кп. Предел текучести был рассчитан в соответствии с данными, предложенными базой DEFORM-3D для конкретной марки стали. Начальные глубины дефектов принимали равными 0,45 мм и 0,99 мм. Скорость прокатных валков полагали постоянной на протяжении каждого прохода. Температуру прокатки задавали стандартной величиной для процессов холодной деформации - равной 20°C. На контакте полосы с прокатными валками были заданы коэффициенты трения равные 0,03 и 0,07, что соответствует условиям холодной прокатки.

Координатная сетка для области подката была задана оптимальной для решения данной задачи величиной – 150 000 элементов.

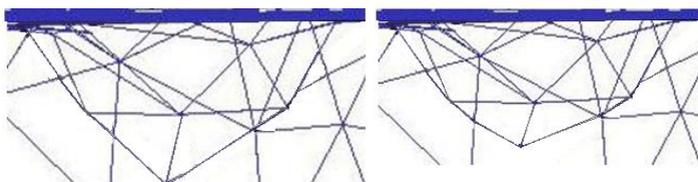
Согласно работе [3, 6] поверхностный дефект горячекатаных полос «раковина» имеет округлую форму, иногда вытянутую вдоль направления прокатки и, чаще всего, с плавным переходом от поверхности металла к кратеру дефекта. Данный дефект отличается от дефекта «рябизна» большим размером. В ра-

боте рассматривается модель поверхностного дефекта с конусообразным дном, что соответствует наблюдениям о пологом переходе к кратеру дефекта, а также дефекты округлой формы небольшой относительной глубины.

Процесс формоизменения поверхностного дефекта типа «раковина» с начальной глубиной 0,99 мм с конусообразным видом кратера представлен на рисунках 3 – 6.



*Рис. 3. Исходная форма дефекта с конусообразным кратером относительной глубиной 0,23 мм*



*Рис. 4. Формоизменение дефекта при  $\epsilon_{\Sigma}=19,9\%$  и  $\mu=0,03$ ,  $\mu=0,07$*



*Рис. 5. Формоизменение дефекта при  $\epsilon_{\Sigma}=35,11\%$  и  $\mu=0,03$ ,*



Рис. 6. Формоизменение дефекта при  $\varepsilon_{\Sigma}=35,11\%$  и  $\mu=0,07$

При увеличении суммарного обжатия до  $\varepsilon_{\Sigma}=45,56\%$  поверхностные дефекты в процессе холодной прокатки в обоих случаях полностью выкатываются.

Рассмотрим процесс изменения относительной глубины дефекта с конусообразной и округлой формой кратеров при различных величинах обжатия с коэффициентом трения равным  $\mu=0,07$ :



Рис. 7. Процесс выкатывания дефектов с относительной глубиной 0,1 мм при  $\mu=0,07$ , где красной линией обозначено изменение относительной глубины дефектов с конусообразной формой кратера, зеленой – с округлой

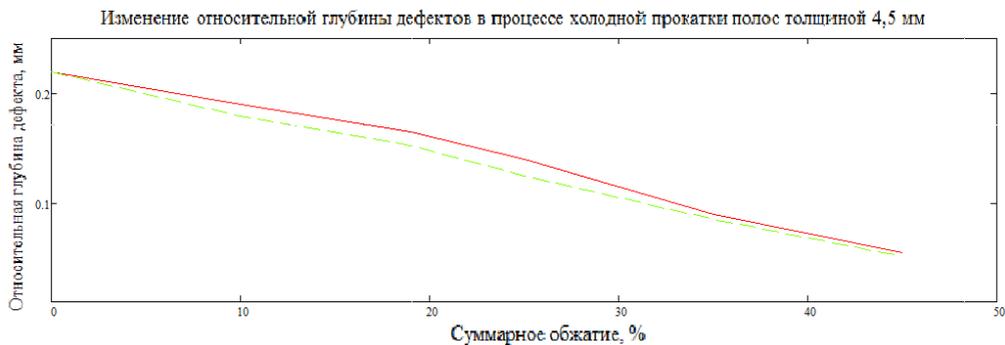


Рис. 8. Процесс выкатывания дефектов с относительной глубиной 0,22 мм при  $\mu=0,07$ , где красной линией обозначено изменение относительной глубины дефектов с конусообразной формой кратера, зеленой – с округлой

Далее был проведен анализ напряженного состояния на участках поверхности дефектов в центре кратера и на середине стенки дефекта.

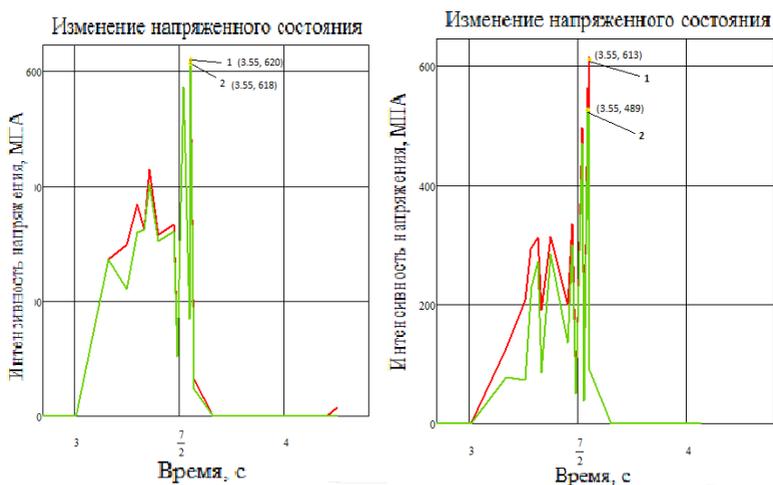


Рис. 9. Напряженное состояние в точках дефекта с округлой и конусообразной формой кратера

Анализируя полученные графики на рис. 9 можно сделать вывод, что дефекты с округлой формой кратера являются менее критичными недостатками подката, так как разность направлений в точках минимальна, что позволяет говорить о равномерном распределении напряжений.

Проведено исследование процесса трансформации поверхностных дефектов типа «раковина» путем построения математической модели, разработанной на основе теории плоской пластической деформации и кинематики прокатки, а также при использовании возможностей вычислительной системы конечно-элементного моделирования DEFORM-3D для получения более точных результатов и построения графической картины формоизменения дефектов и анализа дополнительных параметров, таких как уровень напряжения.

### ***Литература***

1. АРКУЛИС Г. Э., ДОРОГОБИД В. Г. *Теория пластичности*. // 3-е, стереотип. — М.: Металлургия, 1987. — 352 с.
2. БАРМИН Г. Ю. РЕГЛАМЕНТАЦИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОДКАТА, РЕЖИМОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ И ДРЕССИРОВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОНКОЙ И ТОНЧАЙШЕЙ ЖЕСТИ: Автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. — М.: Ин-т черной металлургии им. И. П. Бардина, 1990. — 350 с.
3. БАХТИНОВ В. Б. *Технология прокатного производства*. — М.: Металлургия, 1983. — 448 с.
4. БРЕЖНЕВА Д. А., ГАЛКИН А.В., МЕЩЕРЯКОВА А.О. *Моделирование процессов деформации дефектов поверхности при холодной прокатке*. Управление большими системами (УБС'2016). — М.: ИПУ РАН, 2016. — 553 с.

5. ВАСИЛЬБЕВ Я. Д. *Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки*. — М.: Металлургия, 1995. — 368 с.
6. ВУСАТОВСКИЙ З. А. *Основы прокатки*. — М.: Металлургия, 1963. — 575 с.
7. ДЖОНСОН У., МЕЛЛОР П. *Теория пластичности для инженеров*. — М.: Машиностроение, 1979. — 567 с.
8. ЕРЖАНОВ А.С. *Оптимизация параметров листовой прокатки низкоуглеродистых сталей на основе обеспечения выкатываемости поверхностных дефектов*: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Темиртау, 2016. – 18 с.
9. КАЧАНОВ Л. М. *Основы теории пластичности*. — М.: Наука, 1969. — 420 с.
10. КОЛМОГОРОВ В. Л. *Напряжения, деформации, разрушения*. — М.: Металлургия, 1970. — 229 с.
11. ПАРШИН В. С., КАРАМЫШЕВ А. П., НЕКРАСОВ И. И., ПУГИН А. И., ФЕДУЛОВ А. А. *Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D*. — Екатеринбург. — УрФУ, 2010. — 265 с.
12. ПИМЕНОВ В.А., ГАЛКИН А.В., МЕЩЕРЯКОВА А.О. *Моделирование и исследование процессов деформации дефектов поверхности проката* — Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы Двенадцатой Всероссийской научной-практической конференции, Том II, 25-27 ноября 2017 г. – Старый Оскол, 2015. – 217 с.
13. СОКОЛОВСКИЙ В. В. *Теории пластичности*. — М.: Высшая школа, 1969. — 608 с.
14. ФЕДОРОВ В. В. *Теория оптимального эксперимента*. — М.: Наука, 1971. — 256 с.
15. ЦЕЛИКОВ А. И., НИКИТИН Г. С., РОКОТЯН С. Е. *Деформация металла при прокатке*. — М.: Металлургия, 1980. — 320 с.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FORMING OF SURFACE DEFECTS OF THE PROCESS OF COLD ROLLING WITH THE USE OF THE FINITE ELEMENT ANALYSIS COMPLEX PROGRAM**

**Anastacia Mescheryakova**, Lipetsk State Technical University, undergraduate ([mao11077@rambler.ru](mailto:mao11077@rambler.ru)).

*Abstract: Nowadays the stage of development of rolling is characterized with a constant growth of quality specifications of metal-rolls. A vast quantity of different characteristics is used for the metal-rolling output performance measurement. They are the chemical composition, macro- and microstructure, mechanical properties and processing characteristics, the fraction of non-metallic inclusions, special characteristics, etc. The timely exposure of superficial defects excludes defective goods occurrence during further procedures, it can also be helpful in defining the possibilities of refuse birth, in decided about the reasons of waste and taking measures to prevent defect formation. The defining of dependence of smoothing of superficial defects named "scale pit" from its size, mechanical characteristics of the deformed body and technological factors of cold rolling for the defining of quality specifications to the hot-rolled sheet is an urgent problem. The mathematical model offered in this work allows tracking the transformation of hole defects at any deformation stage of the cold rolling process as well as well as the results of the investigation of defect deformation with the use of the finite-element analysis. Work materials can be applied in metallurgical engineering to improve the surface quality of cold rolled steel.*

**Keywords:** fundamentals of plastic deformation; cold rolled strip; finite-element analysis; stresses; surface defects.