

УДК: 621.771.06:669.721

Определение с помощью вычислительной среды DEFORM-3D влияния вибраций рабочего вала на формирование толщины полосы при холодной прокатке

М. Н. Скрипаленко¹, М. М. Скрипаленко^{1,а}, Чан Ба Хюи¹,
Д. А. Ашихмин², С. В. Самусев¹, А. А. Сидоров³

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Институт экотехнологий и инжиниринга, Россия, 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4

² ООО «ЭйДжиСи Индастрис», Россия, 115419, Москва, 2-ой Рощинский проезд, д. 8, стр. 7

³ ООО «Тесис», Россия, 127083, Москва, ул. Юннатов, д. 18

E-mail: ^а mms@misis.ru

Получено 01.11.2016, после доработки — 21.12.2016.

Принято к публикации 30.12.2016.

Современные тенденции развития технического диагностирования связаны с применением вычислительных сред для компьютерного моделирования, позволяющих во многом заменить реальные эксперименты, снизить затраты на исследование и минимизировать риски. Компьютерное моделирование позволяет еще на этапе проектирования оборудования провести диагностирование с целью определения допустимых отклонений параметров работы технической установки. Особенностью диагностирования прокатного оборудования является то, что работа технологического агрегата непосредственно связана с формированием заданного качества получаемой металлопродукции, в том числе по точности. При этом важная роль отводится разработке методик технической диагностики и диагностического моделирования процессов прокатки и оборудования. Проведено компьютерное диагностическое моделирование процесса продольной холодной прокатки полосы с вибрацией рабочего вала в горизонтальной плоскости по известным данным экспериментальных исследований на непрерывном стане 1700. Вибрация рабочего вала в прокатной клети возникла вследствие зазора между подушкой вала и направляющей в станине и приводила к формированию периодической составляющей в отклонениях толщины полосы. По результатам моделирования с помощью вычислительной среды DEFORM-3D получили прокатанную полосу, которая имела продольную и поперечную разнотолщинность. Визуализация данных геометрических параметров полосы, полученных при моделировании, соответствовала виду неоднородностей поверхности реально прокатанной полосы. Дальнейший анализ разнотолщинности проводили с целью определения возможности идентификации по результатам моделирования источников периодических составляющих толщины полосы, причиной которых являются отклонения в работе оборудования, обусловленные его неисправностями или неправильной настройкой. Преимущество компьютерного моделирования при поиске источников образования разнотолщинности состоит в том, что можно проверить различные предположения по формированию толщины проката, не проводя реальных экспериментов и сократив таким образом временные и материальные затраты, связанные с подготовкой и проведением экспериментов. Кроме того, при компьютерном моделировании толщина задаваемой полосы не будет иметь отклонений, что позволит рассматривать влияние на формирование толщины изучаемого источника без помех, связанных с наследственной разнотолщинностью, как это наблюдается в промышленных или лабораторных экспериментах. На основе спектрального анализа случайных процессов установлено, что в реализации толщины прокатанной полосы, полученной компьютерным моделированием процесса прокатки в одной клети при вибрации рабочего вала, содержится периодическая составляющая, имеющая частоту, равную заданной частоте колебаний рабочего вала. Результаты компьютерного моделирования согласуются с данными исследований на стане 1700. Таким образом, показана возможность применения компьютерного моделирования при поиске причин формирования разнотолщинности на промышленном прокатном оборудовании.

Ключевые слова: вибрация, холодная прокатка, рабочий валок, конечно-элементный анализ, DEFORM-3D, разнотолщинность

UDC:621.771.06:66

Detection of influence of upper working roll's vibration on thickness of sheet at cold rolling with the help of DEFORM-3D software

M. N. Skripalenko¹, M. M. Skripalenko^{1,a}, Tran Ba Hui¹,
D. A. Ashuhmin³, S. V. Samusev¹, A. A. Sidorov²

¹ National University of Science and Technology "MISIS",
4 Leninskiy pr., Moscow, 119049, Russia

² Tesis Ltd., 18 Yunnatov st., Moscow, 127083, Russia

³ AGC Industries Ltd., 8/7 Vtoroiy Roshinskiy proezd, Moscow, 115419, Russia

E-mail: ^a mms@misis.ru

Received 01.11.2016, after completion — 21.12.2016.

Accepted for publication 30.12.2016.

Technical diagnosis' current trends are connected to application of FEM computer simulation, which allows, to some extent, replace real experiments, reduce costs for investigation and minimize risks. Computer simulation, just at the stage of research and development, allows carrying out of diagnostics of equipment to detect permissible fluctuations of parameters of equipment's work. Peculiarity of diagnosis of rolling equipment is that functioning of rolling equipment is directly tied with manufacturing of product with required quality, including accuracy. At that design of techniques of technical diagnosis and diagnostical modelling is very important. Computer simulation of cold rolling of strip was carried out. At that upper working roll was doing vibrations in horizontal direction according with published data of experiments on continuous 1700 rolling mill. Vibration of working roll in a stand appeared due to gap between roll's craft and guide in a stand and led to periodical fluctuations of strip's thickness. After computer simulation with the help of DEFORM software strip with longitudinal and transversal thickness variation was gotten. Visualization of strip's geometrical parameters, according with simulation data, corresponded to type of inhomogeneity of surface of strip rolled in real. Further analysis of thickness variation was done in order to identify, on the basis of simulation, sources of periodical components of strip's thickness, whose reasons are malfunctions of equipment. Advantage of computer simulation while searching the sources of forming of thickness variation is that different hypothesis concerning thickness formations may be tested without conducting real experiments and costs of different types may be reduced. Moreover, while simulation, initial strip's thickness will not have fluctuations as opposed to industrial or laboratorial experiments. On the basis of spectral analysis of random process, it was established that frequency of changing of strip's thickness after rolling in one stand coincides with frequency of working roll's vibration. Results of computer simulation correlate with results of the researches for 1700 mill. Therefore, opportunity to apply computer simulation to find reasons of formation of thickness variation of strip on the industrial rolling mill is shown.

Keywords: vibration, cold rolling, working roll, FEM, DEFORM-3D, thickness variation

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 111–116 (Russian).

Выявление факторов, приводящих к появлению разнотолщинности при продольной прокатке, и поиск способов для устранения их негативного влияния является актуальной задачей.

Одним из таких факторов является вибрация валков при прокатке. Исследованию вибрации валков, причин ее появления и ее влияния на формирование толщины полосы посвящен ряд работ как в России [Skripalenko, 2011; Mazur, 2011; Garber, 2011], так и за рубежом [Yang Xu, Tong C. N., 2012; Yang Xu, 2012; Shengli Wu, 2014].

Представляет интерес определение влияния вибрации валков на формирование толщины полосы и листа с помощью компьютерного моделирования. Эффективность такого подхода показана в [Skripalenko et al., 2013 (1); Skripalenko et al., 2013 (2)], где моделировался процесс прокатки, при котором рабочий валок совершал колебания в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси прокатки.

Цель данной работы — смоделировать в DEFORM-3D продольную прокатку полосы. При прокатке накладывали вибрации на верхний валок. При этом колебания валка происходили в плоскости, параллельной направлению прокатки, согласно данным, приведенным в [Garber, 2011]. По результатам моделирования необходимо было установить влияние данного характера вибрации валка на формирование толщины полосы.

Для того чтобы определить возможность моделирования процесса продольной прокатки с вибрацией верхнего рабочего валка (рис. 1), провели пробное моделирование в DEFORM-3D.

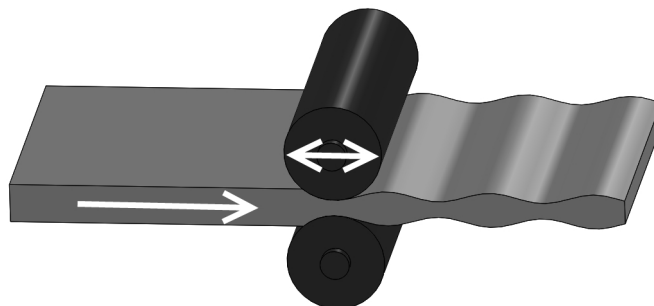
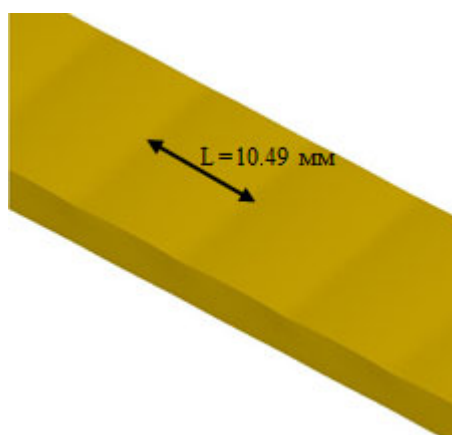


Рис. 1. Схема очага деформации с указанием направлений движения полосы и колебаний рабочего валка

Смоделировали процесс холодной прокатки без учета теплообмена, при этом верхний валок колебался с частотой 25 Гц и амплитудой 0.4 мм. Полоса шириной 15 мм, длиной 300 мм и толщиной 5 мм прокатывалась в валках диаметром 150 мм и длиной бочки 300 мм. Зазор между валками 4 мм, материал полосы — AL-3003 (ближайший отечественный аналог — АМцС), температура полосы была постоянной и равнялась 20 °С. Коэффициент трения приняли равным 0.25 (по Зибелю). Угловая скорость валков была задана равной 6 рад/с. По результатам моделирования установили, что полоса после прокатки имеет волнистую поверхность, при этом период колебаний составил порядка 10 мм (рис. 2). Согласно современным представлениям о процессе продольной прокатки, появление подобных полос объясняется именно вибрацией валков [Garber, 2011], подобной заданной при моделировании.

После этого перешли к моделированию процесса холодной прокатки листа, описанному в [Garber, 2011] при проведении экспериментальных исследований. Согласно [Garber, 2011] в работе в качестве объекта исследования были взяты 4-я и 5-я рабочие клетки пятиклетевого стана холодной прокатки 1700 ЧерМК ОАО «Северсталь». Проведенные при этом измерения параметров вибрации 4-ой рабочей клетки позволили установить собственную частоту колебаний рабочего валка в сборе с подушками, равную 390 Гц. Эти колебания явились причиной продольной разнотолщинности полосы из автолистовой стали (дефект ребристости).

Для создания моделей валков и полосы использовали SolidWorks. При создании моделей выбрали масштаб 20 : 1 вследствие того, что смоделировать прокатку реальных размеров, при которых полоса имеет толщину менее 1 мм, для вычислительных сред конечно-элементного анализа является затруднительным.

Рис. 2. Фрагмент полосы с волнистостью периода L

Полученные в SolidWorks модели спозиционировали в сборку, сохранили в формате .stl и загрузили в Pre-processor DEFORM-3D. Моделировали прокатку полосы толщиной 20 мм, зазор между валками 8 мм, диаметр валков 12 000 мм. Угловую скорость валков задали равной 45 рад/с. Коэффициент трения для пар «верхний валок – лист» и «нижний валок – лист» задали равным 0.3 (по Зиббелю). Материалом прокатываемой полосы была выбрана сталь AISI-1045 (аналог российской стали 45). Для задания вибрации верхнего рабочего валка во вкладке «Движение» в Pre-processor DEFORM-3D выбрали опцию «Function of time». График колебаний задавали исходя из того, что согласно данным [Garber, 2011] валок имел частоту колебаний 390 Гц и амплитуду 12 мм с учетом принятого масштаба. Для сокращения времени расчета моделировали прокатку половины полосы. Плоскость симметрии при этом была горизонтальной и проходила через середину полосы по толщине. Моделировали прокатку без уширения. Для этого задали граничное условие: на боковых поверхностях заготовки скорость перемещения металла в направлении, перпендикулярном боковой поверхности, равнялась нулю.

По завершении расчета в DEFORM-3D для определения изменения толщины по длине прокатанной полосы воспользовались функцией «Point tracking» в Post-processor DEFORM-3D. На поверхность недеформированной заготовки (рис. 3) нанесли 50 точек с шагом, равным 10 мм. После этого рассчитали координаты этих точек с помощью функции «Point tracking» по окончании процесса прокатки. Определили значение толщины в поперечных сечениях полосы, проходящих через каждую из точек. Построили график, на котором по оси X указаны номера точек, а по оси Y — значения толщины полосы в поперечных сечениях, проходящих через каждую из 50 точек (рис. 4).

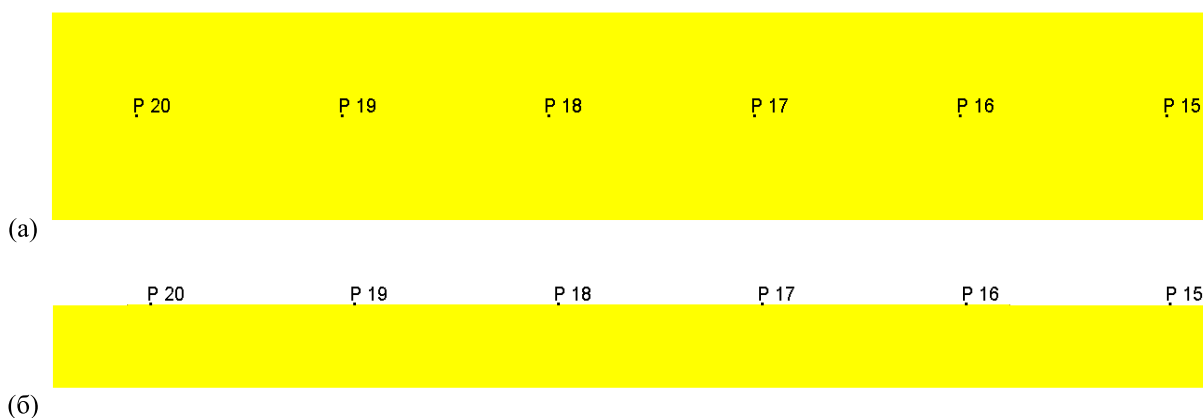


Рис. 3. Точки, нанесенные с помощью функции «Point tracking», посередине полосы: а) вид сверху; б) вид сбоку

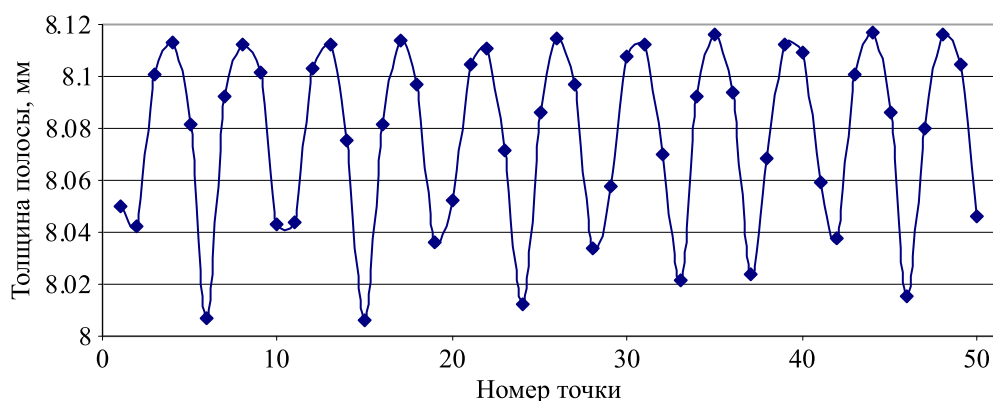


Рис. 4. График продольных колебаний толщины полосы по выбранным точкам

Из рис. 4 видно, что изменение толщины полосы по длине имеет явный периодический характер. Аналогично тестовой модели удалось визуально определить наличие волнистости, определить период этих полос, который оказался равным порядка 54 мм (с учетом масштаба).

С целью определить, повлияла ли вибрация верхнего валка на формировании толщины полосы, провели анализ значений толщины полосы, полученных для каждой из 50 точек, с помощью функции спектральной плотности аналогично методике, использованной в [Skripalenko, 2011]. Требовалось определить наличие всплесков на графике функции спектральной плотности, значения частот ω (Гц), соответствующих данным всплескам, а также определить, совпадают ли какие-либо из выявленных частот с заданной в DEFORM-3D частотой колебаний валков, которая равнялась 390 Гц. Для повышения точности анализа исследовали диапазон частот 365–415 Гц. Получили график зависимости оценки функции спектральной плотности $S(\omega)$ от частоты ω (рис. 5).

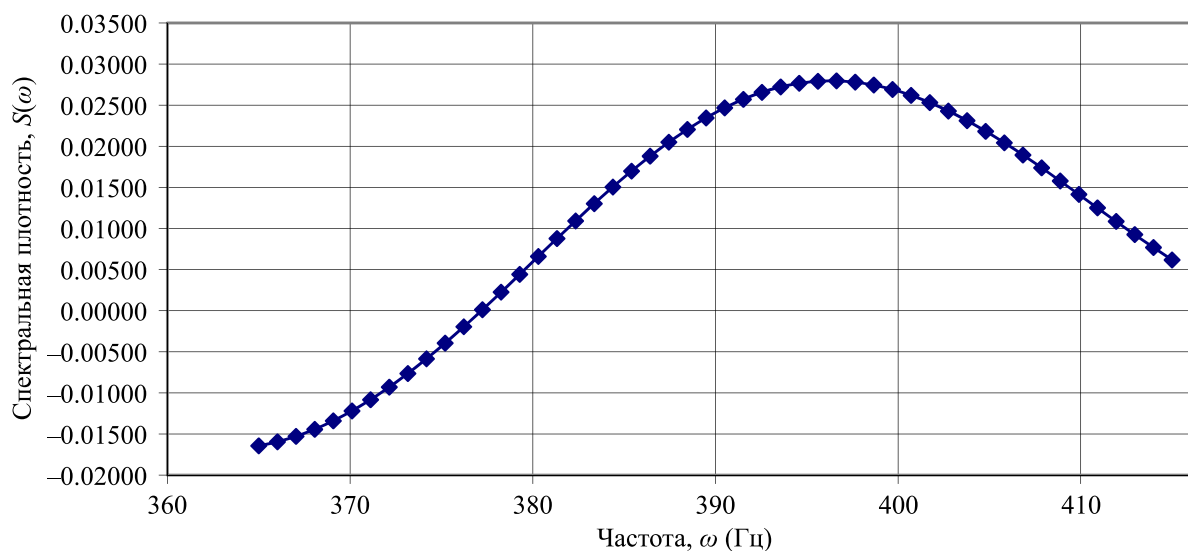


Рис. 5. График изменения оценки функции спектральной плотности в диапазоне частот 365–415 Гц

График имеет ярко выраженный пик, которому соответствует частота 396 Гц. На валок при вводе данных в Pre-processor DEFORM-3D накладывали колебания с частотой в 390 Гц. Отклонение составляет 1.5 %.

Таким образом, установили, что при моделировании процесса холодной прокатки полосы с вибрацией верхнего рабочего валка в DEFORM-3D прокатанная полоса имела волнистость поверхности определенного периода. Волнистость сравнительно легко можно наблюдать, варьируя «источниками света» с помощью соответствующей опции в Post-processor DEFORM-3D.

Полученные по результатам моделирования данные соответствуют имеющимся теоретическим представлениям и экспериментальным данным, иллюстрирующим влияние вибрации рабочего вала по направлению и против направления прокатки в горизонтальной плоскости. Анализ полученных по результатам компьютерного моделирования данных об изменении толщины прокатанной полосы по ее длине был проведен с помощью функции спектральной плотности. С погрешностью 1.5 % частота, с которой воздействует на изменение толщины полосы возмущающий фактор в диапазоне 365–415 Гц, совпала с частотой колебаний вала в процессе прокатки, смоделированной в DEFORM-3D. Полученные данные позволяют сделать вывод об эффективности применения DEFORM-3D для исследований влияния вибраций вала различного характера на формирование толщины полосы при холодной прокатке. Проводя моделирование, можно однозначно отслеживать влияние вибрации на формирование толщины. При этом (в отличие от реальной продольной прокатки) получаемые данные об изменении толщины не будут подвержены влиянию различного рода случайных, непериодических возмущающих воздействий и помех, которые затрудняют анализ данных опытно-промышленных экспериментов, и, следовательно, могут быть гораздо эффективнее проанализированы с помощью математического аппарата.

Список литературы (References)

- Garber E. A., Pavlov S. I., Kozhevnikova E. A., Timofeeva M. A., Kuznetsov V. V.* Eliminating surface defects in rolled sheet due to vibration of the working cells // *Steel in translation*. — 2011. — Vol. 41, no. 4. — P. 332–337.
- Mazur I. P.* Monitoring the surface quality in sheet rolling // *Steel in translation*. — 2011. — Vol. 41, no. 4. — P. 326–331.
- Shengli Wu, Liming Wang, Yimin Shao, Yilin Yuan.* Vibration characteristic analysis of twenty-high rolling mill with local defect on roll surface based on the time-varying contact stiffness // *Engineering Failure Analysis*. — 2014. — Vol. 42. — P. 297–310.
- Skripalenko M. N., Skripalenko M. M., Ashikhmin D. A., Yang Xu.* Use of the software deform 2D to model the process of rolling with vibration of the top work roll // *Metallurgist*. — 2013. — Vol. 56, Issue 11–12. — P. 844–847.
- Skripalenko M. N., Skripalenko M. M., Sidorov A. A., Yang Xu.* Wavelet Analysis of Fluctuations in the Thickness of Cold-Rolled Strip // *Metallurgist*. — 2013. — Vol. 57, Issue 7–8. — P. 606–611.
- Skripalenko M. N., Skripalenko M. M., Zhigulev G. P., Ashihmin D. A.* Technical diagnosis and diagnostic modeling of mechanisms in the main line of a rolling mill // *Metallurgist*. — 2011. — Vol. 54, Nos. 11–12. — P. 744–752.
- Yang Xu Li Q., Tong C. N. et al.* Vertical Vibration Model for Unsteady Lubrication in Rolls-Strip Interface of Cold Rolling Mills // *Advances in Mechanical Engineering*. — 2012. — Article ID 734510. — 7 p. doi:10.1155/2012/734510
- Yang Xu, Tong C. N.* Coupling Dynamic Model and Control of Chatter in Cold Rolling // *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. Transactions of the ASME. — 2012. — Vol. 134 (4). — P. 1–8.