

УДК 621.771.01

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ К60***Яновский Андрей Олегович**Студент 6 курса, специалитет**кафедра «Оборудование и технологии прокатки»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: А. В. Мунтин,**кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»*

Сопротивление деформации является одним из основных параметров для модели материала, используемой при инженерных расчетах и математическом моделировании прокатки. Существует большое количество методов определения сопротивления деформации, основанных на проведении экспериментов: испытания на сжатие, растяжение, кручение, метод базисного давления, испытания на пластометрах, а также на пластометрических комплексах Gleeble. Некоторые из них могут быть использованы лишь с рядом допущений, другие не позволяют использовать результаты испытаний для моделирования [1].

В то же время существует ряд работ, применяющих методы машинного обучения для определения физических свойств стали, усилий прокатки и т.д. [2, 3]. Предпосылкой использования этих методов является большой объем статистических данных о прокатке, который уже накоплен на современных промышленных станах. Внедрение такого подхода планируется на стане 5000 АО «ВМЗ».

Целью данной работы является уточнение существующей на АО «ВМЗ» модели материала для стали К60 на основе статистических данных о прокатке со стана 5000.

В первом приближении описать изменение сопротивления деформации при прокатке можно с помощью известного уравнения [4]:

$$\sigma_{\phi} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \varepsilon^{m_1} \cdot u^{m_2} \cdot e^{m_3 \cdot T} \cdot \sigma_6 \quad (1)$$

где  $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3$  – регрессионные коэффициенты;  
 $\varepsilon$  – степень деформации;  
 $u$  – скорость деформации, с<sup>-1</sup>;  
 $T$  – температура прокатки, °С;  
 $\sigma_6$  – базовое сопротивление деформации, МПа.

Коэффициенты  $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3$  уравнения (1) определяются регрессией, для чего уравнение приводится к виду регрессионного полинома. Для регрессии собрана выборка данных о прокатке стали класса прочности К60. Выборка составлена таким образом, чтобы в нее попал весь прокатываемый сортамент. Размер выборки составил 676 листов или 16065 проходов.

В данной задаче существует ряд проблем. Во-первых, линейная регрессия неустойчива к мультиколлинеарности признаков [5]. В исследуемой выборке коллинеарными являются обжатие  $\varepsilon$  и скорость деформации  $u$ . Во-вторых, отсутствие прямой зависимости  $\sigma_{\phi}(\varepsilon)$  в чистовой фазе прокатки, из-за чего получить адекватную зависимость  $\sigma_{\phi}(\varepsilon)$  с помощью линейной регрессии возможно только для черновой фазы прокатки.

В виду этих особенностей было построено две модели: для черновой фазы отдельно и для полного процесса прокатки. Адекватность полученных коэффициентов была проверена на соответствие общим принципам теории прокатки и сравнением с моделью, полученной на установке Gleeble. Качество моделей численно оценено на отложенной выборке. Коэффициенты первой модели полностью соответствуют логике, в то время как коэффициент  $m_1$  второй модели имеет отрицательное значение, что противоречит здравому смыслу.

### Литература

1. Зинягин, А.Г. Совершенствование процессов прокатки и охлаждения листов из трубных марок сталей на стане-5000. дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 159 с.
2. Q. Xie, M. Suvarna, J. Li et al. Online prediction of mechanical properties of hot rolled steel plate using machine learning // Materials & Design. Elsevier. Электрон. журн. 2020. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026412752030736X> (дата обращения: 10.02.2021)
3. J.-S. Son et al. A study on on-line learning neural network for prediction for rolling force in hot-rolling mill // Journal of Materials Processing Technology. Электрон. журн. 2005. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013605000920> (дата обращения: 21.02.2021)
4. А. Хензель, Т. Шпиттель. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: пер. с нем. / под ред. В.П. Полухина. М.: Metallurgiya 1982. 360 с. [Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren Prof. Dr. sc. techn. Arno Hensel und Dr. sc. techn. Thilo Spittel VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig. 1967.]
5. Н. Дрейпер, Г. Смит. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. / под ред. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. М.: Финансы и статистика 1986. 205 с. [Norman R. Draper, Harry Smith. Applied Regression Analysis, 1981.]