

© Кожевников А.В., Болобанова Н.Л., Селитриников И.В., 2017

Кожевников Александр Вячеславович

Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: avk7777@bk.ru

Kozhevnikov Aleksandr Vyacheslavovich

PhD (Technology), Associate Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: avk7777@bk.ru

Болобанова Наталия Леонидовна

Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: nlbolobanova@chsu.ru

Bolobanova Nataliya Leonidovna

PhD (Technology), Associate professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: nlbolobanova@chsu.ru

Селитриников Иван Викторович

Студент, Череповецкий государственный
университет (Череповец, Россия)
E-mail: ivanselittrnikov@mail.ru

Selitrinikov Ivan Victorovich

Student, Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: ivanselittrnikov@mail.ru

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С УЧЕТОМ ЕГО СТОХАСТИЧНОСТИ¹

STATISTICAL DATA PROCESSING IN THE ANALYSIS OF COLD ROLLING PROCESS IN TERMS OF ITS STOCHASTICITY

Аннотация. Представлены результаты статистического анализа параметров процесса холодной прокатки и механических характеристик полос из стали марки SAE 1015 в системе STATISTICA. Выполнено статистическое имитационное моделирование реального режима прокатки полосы на пятиклетевом стане 1700 из стали марки SAE 1015 толщиной 0,6 мм, шириной 1200 мм с обжатием 70 % с учетом возмущения процесса прокатки, дана оценка расчетных распределений энергосиловых параметров.

Abstract. The paper considers the results of the statistical analysis of parameters of cold rolling process and mechanical characteristics of steel SAE 1015 strips in the system STATISTICA. The statistical simulation of cold rolling of steel SAE 1015 with 0.6 mm thickness, 1200 mm width and 70 % drafting on five-stand mill 1700 in terms of its stochasticity was carried out. Evaluation of the estimated distributions of energy-power parameters is submitted.

Ключевые слова: стан холодной прокатки, стохастичность процесса, энергосиловые параметры, механические характеристики полос

Keywords: cold rolling mill, process stochasticity, energy-power parameters, mechanical characteristics of the strips

Введение

Непрерывным условием обеспечения высокого качества холоднокатаного листового проката является строгая регламентация деформационных режимов прокатки, реализация технологического процесса в жестко заданных диапазонах изменения параметров процесса. Это представляет определенные трудности из-за непостоянст-

¹ Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ.

ва и неоднородности химического состава и структуры стали, обуславливающих колебания величины исходного предела текучести, нестабильности толщины полосы на входе в стан и условий прокатки на непрерывном стане. Сложность составляет одновременное регулирование толщины и натяжения полосы при непостоянной скорости, величине обжатий и, соответственно, энергосиловых параметрах процесса прокатки, а также показателях точности, плоскостности и механических свойствах прокатываемых полос. В связи с этим, при моделировании и исследовании процесса холодной прокатки необходимо учитывать объективно существующие колебания технологических и энергосиловых параметров, что позволит предложить эффективные способы повышения стабильности процесса прокатки.

В основе исследований технологического процесса, подверженного воздействию случайных факторов, должна лежать процедура определения вероятностных характеристик его выходных параметров [4]–[6]. На практике, руководствуясь допущением о нормальном виде распределения этих параметров, обычно ограничиваются отысканием моментов этих распределений: математического ожидания, дисперсии, асимметрии и т.п. Но этого недостаточно, поскольку не учитывается взаимное влияние нестабильности исходных параметров и текущих возмущений, возникающих в ходе прокатки, на показатели качества готовой продукции и на энергосиловые параметры процесса.

В большинстве работ, посвященных исследованию и проектированию технологических режимов холодной прокатки, выполняется точечная оценка параметров процесса и прокатываемого металла без учета стохастичности прокатки [1]–[3], [7], [8]. В работе [6] предложена методика расчета параметров нестабильности параметров процесса холодной прокатки с учетом воздействия случайных факторов по критерию равенства усилий по всем клетям стана.

В силу недостаточной освещенности в технической литературе вопросов, связанных с исследованием процесса холодной прокатки с учетом стохастичности его параметров, данная статья направлена на дальнейший анализ и выявление закономерностей, взаимосвязей параметров технологии и качества холоднокатаного проката.

Основная часть

Для выявления взаимосвязи статистических характеристик действующих случайных факторов и выходных параметров (энергосиловых и механических характеристик) были исследованы полосы из малоуглеродистой стали марки SAE 1015 толщиной 0,6 мм, шириной 1200 мм с обжатием 70 %, прокатываемые в различные периоды эксплуатации пятиклетевого стана 1700. Доля стали марки SAE 1015 является наибольшей в объеме прокатанного металла для производителей промышленной упаковки.

Параметры процесса холодной прокатки рассчитывались с помощью математической модели [2], [3], основанной на упругопластическом деформировании полосы и обеспечивающей наименьшую погрешность по сравнению с другими известными моделями. Статистический анализ параметров процесса прокатки выполнен в системе STATISTICA.

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений усилий прокатки представлены на рис. 1. Ошибка в определении усилий прокатки находилась в пределах от 0,12 до 0,29 МН, что составляет 1–4,6 %. Из распределения усилий на примере первой клетки (рис. 1б) видно, что есть вероятность больших отклонений от наиболее часто встречающегося усилия прокатки, что необходимо учитывать при расчете деформационных режимов. Величины среднего квадратического отклонения расчетных значений от экспериментальных для усилий прокатки не превышают

0,03 МН. Таким образом, можно считать, что совпадение расчетных и экспериментальных данных – удовлетворительное.

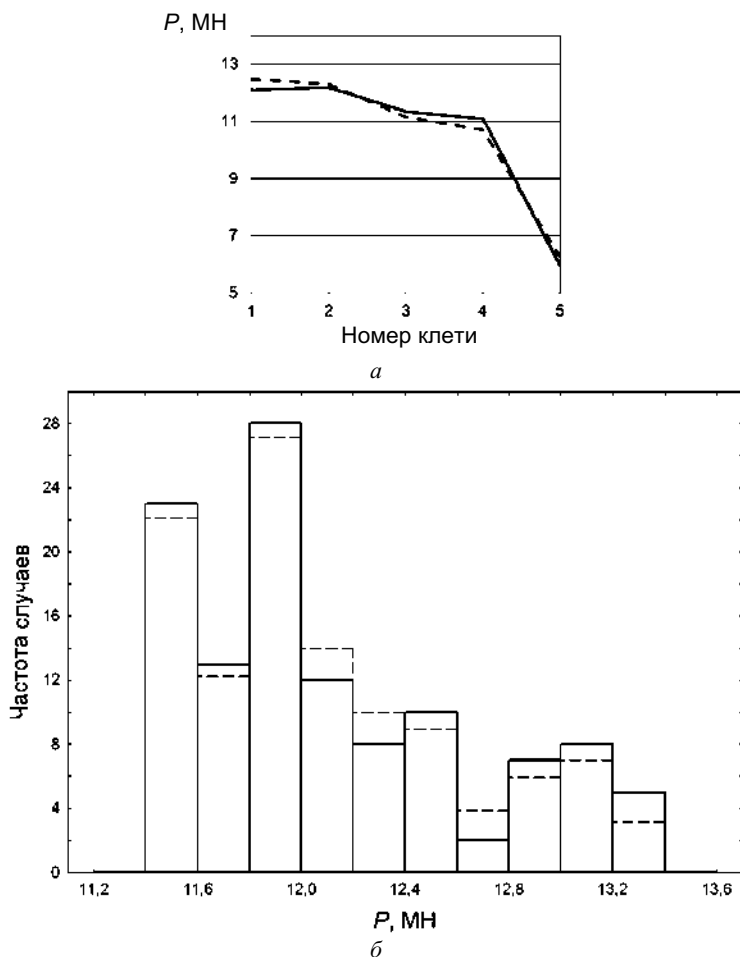


Рис. 1. Сравнение экспериментальных (сплошные линии) и расчетных (пунктирные линии) значений усилия прокатки:
 a – детерминированные величины; b – стохастические величины в первой клетке

В условиях промышленных станов такие характеристики прокатываемого металла, как предел текучести, показатели упрочнения, также представляют собой случайные величины, распределение которых определяется статистическими характеристиками (математическим ожиданием, средним квадратическим отклонением и др.). На рис. 2 показаны гистограммы распределения фактических пределов – текучести σ_T (a) и прочности σ_B (b), относительного удлинения δ_{50} ($в$) упрочненной в процессе холодной прокатки полосы из стали марки SAE 1015 с обжатием $\varepsilon = 70\%$. Результаты статистического анализа предела текучести, предела прочности и относительного удлинения после прокатки полос, выполненного в системе STATISTICA, приведены в табл. 1. Частотное распределение этих параметров близко к нормальному.

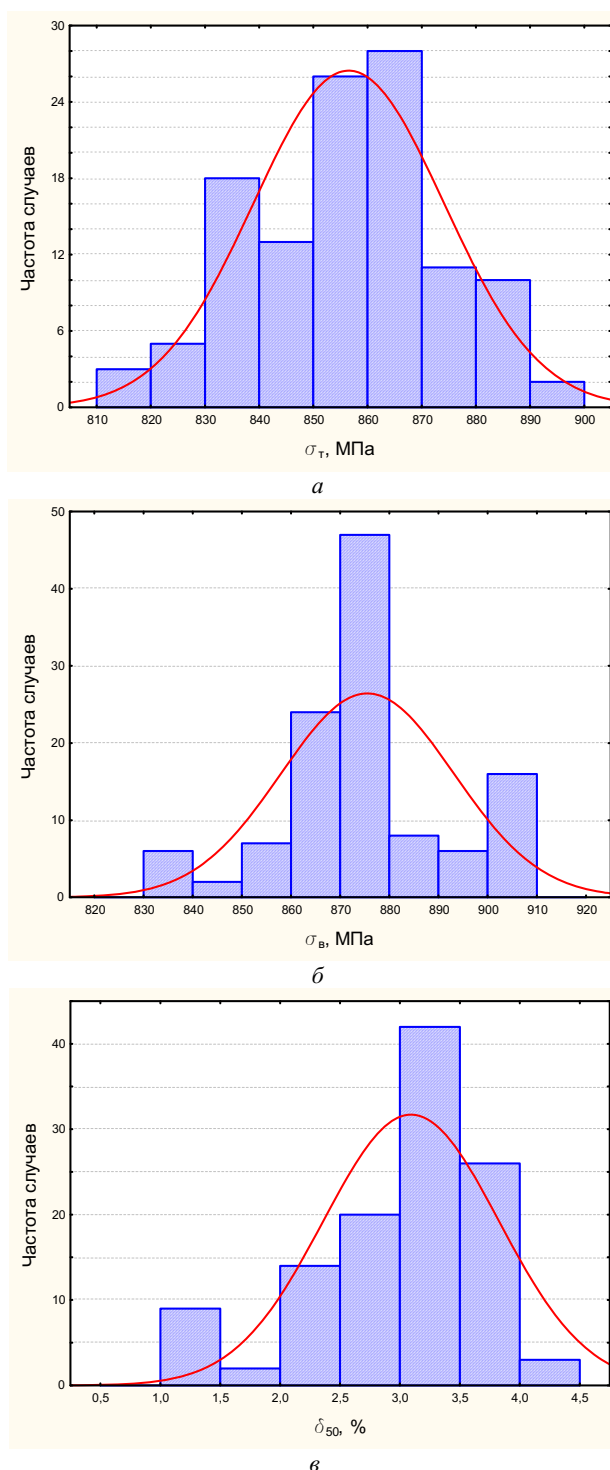


Рис. 2. Гистограммы распределения фактических пределов – текучести (а) и прочности (б) и относительного удлинения (в) холоднокатаной стали SAE 1015 после обжатий 70 %

Результаты статистического анализа механических характеристик полос из стали марки SAE 1015 после обжатий 70 % (объем выборки $n = 116$)

Параметры	$\bar{X}$	S	Асимметрия	Экссесс
$\sigma_{0,2}$, МПа	856,28	17,49	-0,017	-0,47
σ_B , МПа	875,24	17,51	-0,12	0,31
δ_{50} , %	3,07	0,73	-0,92	0,38

$\bar{X}$ – математическое ожидание; S – среднее квадратическое отклонение

Выбор режимов обжатий и натяжений, энергосиловые и кинематические параметры процесса холодной прокатки полос в основном зависят от характера упрочнения деформируемой стали, поэтому важно получение гистограмм распределения предела текучести холоднокатаной стали в зависимости от степени суммарного обжатия, без проведения механических испытаний. В работе [2] для описания изменения предела текучести σ_T в зависимости от степени суммарного обжатия предложена формула:

$$\sigma_T = \sigma_{0,2\text{исх}} + \frac{A}{B+1} \cdot \frac{\varepsilon_{\Sigma_i}^{B+1} - \varepsilon_{\Sigma_{i-1}}^{B+1}}{\varepsilon_{\Sigma_i} - \varepsilon_{\Sigma_{i-1}}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{0,2\text{исх}}$ – предел текучести материала полосы в исходном, недеформированном состоянии; A , B – эмпирические величины, определяемые пластическими свойствами стали; $\varepsilon_{\Sigma_{i-1}}$, ε_{Σ_i} – суммарное относительное обжатие за $i-1$ и i проходов.

Для расчета распределения предела текучести холоднокатаной стали был применен метод Монте-Карло с использованием уравнения (1). Гистограммы распределения предела текучести упрочненной в процессе холодной прокатки с обжатиями 60 и 70 % стали показаны на рис. 3.

После прокатки с обжатием 60 % среднее значение $\sigma_T(\varepsilon)$ равно 802,8 МПа и среднее квадратическое отклонение $\sigma_T(\varepsilon)$ равно 18,03 МПа. После суммарной деформации 70 % эти характеристики имели значения 852,1 и 18,18 МПа.

Сравнение полученного расчетным путем распределения $\sigma_{0,2}$ с экспериментальным (рис. 2а) свидетельствует о достаточно полном учете в расчетах влияния случайного характера процесса.

Также было выполнено статистическое имитационное моделирование реального режима прокатки полосы на пятиклетевом стане 1700 из стали марки SAE 1015 толщиной 0,6 мм, шириной 1200 мм с обжатием 70 % (табл. 2) с учетом возмущения процесса прокатки.

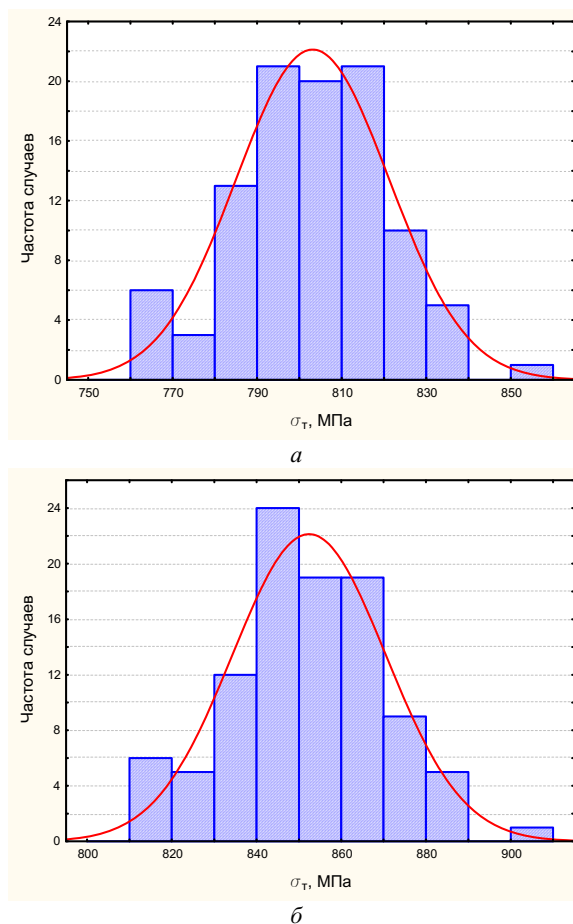


Рис. 3. Гистограммы распределения величины предела текучести $\sigma_T(\epsilon)$ холоднокатаной стали SAE 1015 после обжартий: *a* – 60 %; *б* – 70%

Таблица 2

Технологические параметры режима холодной прокатки полосы из стали марки SAE 1015 толщиной 0,6 мм и шириной 1200 мм на 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь»

Клеть №	v_i , м/с	h_{i-1} , мм	h_i , мм	ϵ_i , %	N_{i-1} , кН	N_i , кН
1	5,39	2,0	1,49	25,5	118	249
2	7,51	1,49	1,1	26,17	249	203
3	10,05	1,1	0,82	25,45	203	171
4	13,52	0,82	0,62	24,39	171	138
5	13,87	0,62	0,6	3,23	138	27

v_i – скорость полосы на выходе из i -й клетки; h_{i-1} , h_i – толщина полосы на входе и выходе из $(i-1)$ -й и i -й клетки; ϵ_i – частное относительное обжатие полосы в i -й клетке; N_{i-1} , N_i – силы заднего и переднего натяжения полосы

Изначально для каждой точки полосы выполнена процедура имитации значения предела текучести и толщины полосы перед входом в первую клеть. Процесс имитации реализован с использованием процедуры генерации случайного числа по закону нормального распределения со стандартным отклонением 20 МПа для предела текучести и 0,035 мм для толщины подката, что соответствует попаданию в поле допуска ГОСТ 19904-90. Межклетевые натяжения, скорости и коэффициенты трения принимались постоянными по клетям. Также сохранялось базовое соотношение обжатий по клетям.

Для каждой точки полосы был выполнен расчет параметров процесса прокатки, в результате чего были сформированы соответствующие массивы значений, которые, в связи с имитацией возмущений, являлись случайными числами. Расчетные распределения энергосиловых параметров процесса прокатки полосы приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Энергосиловые параметры процесса прокатки полос
из стали марки SAE 1015 толщиной 0,6 мм и шириной 1200 мм на 5-клетевом стане**

Параметры	Клеть				
	1	2	3	4	5
$\bar{P}$, МН	12,37	12,05	11,25	10,74	6,29
S_P , МН	0,73	0,45	0,32	0,31	1,29
$\bar{N}$, кВт	1957	4316	3098	3261	3538
S_N , кВт	179	129	123	119	83
$\bar{M}$, кН·м	108,9	172,4	140,8	110,1	76,5
S_M , кН·м	9,94	5,14	3,68	2,65	1,29

$\bar{P}$, $\bar{N}$, $\bar{M}$ – средние значения усилий, мощности и моментов прокатки; S_P , S_N , S_M – средние квадратические отклонения усилий, мощности и моментов прокатки

Согласно полученным данным, усилие прокатки имеет наибольшее колебание в первой и последней клетях стана. Значительный диапазон колебаний усилий в последней клетке свидетельствуют о том, что именно эту клетку в первую очередь необходимо оснащать средствами оперативного воздействия на плоскостность полосы. Нестабильность мощности и момента прокатки в первых клетях стана и усилия прокатки в первой клетке связана со значительными колебаниями исходных предела текучести и толщины подката. В связи с этим приводы первых клетей работают в существенно нестабильном режиме. Поэтому при выборе деформационных режимов должны учитываться возможные значительные отклонения энергосиловых параметров, приводящие к динамическим нагрузкам в приводных линиях и вибрациям клетей непрерывных станов холодной прокатки.

Выводы

Выполнена оценка диапазонов разброса значений параметров процесса прокатки и механических характеристик металла после прокатки. Показано, что учет стохастического аспекта при проектировании технологических режимов холодной прокатки позволит повысить достоверность результатов и дать более полную картину о надежности разрабатываемой технологии.

Литература

1. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. М., 1995. 368 с.
2. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). М., Череповец, 2004. 416 с.
3. Гарбер Э. А., Кожевникова И. А. Теория прокатки. Старый Оскол, 2015. 312 с.
4. Железнов Ю.Д., Коцарь С.Л., Абиев А.Г. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки. М., 1974. 240 с.
5. Лель Р.В., Двинский В.М., Рудаков В.А. Оптимизация процесса холодной листовой прокатки. Свердловск, 1980. 130 с.
6. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). Днепропетровск, 2010. 493 с.
7. Робертс В. Холодная прокатка стали. М., 1988. 544 с.
8. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. М., 1980. 320 с.

References

1. Vasilev Ia.D. *Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov kholodnoi prokatki*. [Engineering models and algorithms of calculation of parameters of cold rolling]. Moscow, 1995. 368 p.
2. Garber E.A. *Stany kholodnoi prokatki (teoriia, oborudovanie, tekhnologiia)*. [Cold rolling mills (theory, equipment, technology)]. Moscow, Cherepovets, 2004. 416 p.
3. Garber E.A., Kozhevnikova I.A. *Teoriia prokatki* [Rolling theory]. Staryi Oskol, 2015. 312 p.
4. Zheleznov Iu.D., Kotsar' S.L., Abiev A.G. *Statisticheskie issledovaniia tochnosti tonkolistovoi prokatki* [Statistical study of precision sheet rolling]. Moscow, 1974. 240 p.
5. Le' R.V., Dvinskii V.M., Rudakov V.A. *Optimizatsiia protsessa kholodnoi listovoi prokatki* [Optimization of cold sheet rolling process]. Sverdlovsk, 1980. 130 p.
6. Mazur V.L., Nogovitsyn A.V. *Teoriia i tekhnologiia tonkolistovoi prokatki (chislennyy analiz i tekhnicheskie prilozheniia)* [Theory and technology of thin sheet rolling (numerical analysis and engineering applications)]. Dnepropetrovsk, 2010. 493 p.
7. Roberts V. *Kholodnaia prokatka stali* [Cold rolling steel: Translation from English]. Moscow, 1988. 544 p.
8. Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotian S.E. *Teoriia prodol'noi prokatki* [Theory of lengthwise rolling]. Moscow, 1980. 320 p.

Кожевников А.В., Болобанова Н.Л., Селитриников И.В. Статистическая обработка информации при анализе процесса холодной прокатки с учетом его стохастичности // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №3(78). С. 20–27.

For citation: Kozhevnikov A.V., Bolobanoba N.L., Selitrnikov I.V. Statistical data processing in the analysis of cold rolling process in terms of its stochasticity. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 3 (78), pp. 20–27.