

# Optimizing the process parameters of the thin-sheet cold-rolled strip production basing on the significance of their qualimetric estimates

Anatoliy Dolzhanskiy<sup>1</sup>, Oksana Bondarenko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Ukrainian State University of Science and Technology (Institute of Industrial and Business Technologies), Dnipro, Ukraine*

\*Corresponding author: [sana105oksana105@gmail.com](mailto:sana105oksana105@gmail.com)

**Abstract.** The aim of the study is to determine the optimal (rational) levels of technical and/or technological and/or organizational factors used while managing a stochastic object, by maximizing its comprehensive quality indicator, other things being equal, to meet stakeholders' requirements for the object properties. According to the corresponding algorithm developed by the authors, the process of maximizing the generalized quality in the manufacturing of steel strip is considered. That took into account a number of significant factors, coefficients of weight of individual quality indicators, and corresponding values of the indicator of incompleteness of the object description. The method effectiveness was judged by the sensitivity of the complex quality indicator to changes in the management factors. The obtained data are consistent with the theory and production practice of rolling production.

**Keywords:** *qualimetry, complex and single quality indicators, control factors, incomplete object description, optimization*

## Оптимізація параметрів процесу виробництва тонколистової холоднокатаної штаби на основі їх кваліметричних оцінок

Анатолій Должанський<sup>1</sup>, Оксана Бондаренко<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Український державний університет науки та технологій (Інститут промислових та бізнес-технологій), Дніпро, Україна*

\*Відповідальний автор: [sana105oksana105@gmail.com](mailto:sana105oksana105@gmail.com)

**Анотація.** Метою дослідження є визначення оптимальних (раціональних) рівнів технічних та/або технологічних, та/або організаційних факторів, які використовуються при управлінні стохастичним об'єктом, шляхом максимізації його комплексного показника якості при інших рівних умовах задоволення вимог стейкхолдерів до властивостей відповідних об'єктів. За розробленим авторами відповідним алгоритмом розглянутий процес максимізації узагальненої якості при виготовленні сталеної штаби. При цьому врахували кількість значущих факторів, коефіцієнти вагомості одиничних показників якості та відповідне значення показника неповноти опису об'єкта. Про ефективність методу судили за чутливістю комплексного показника якості до зміни управляючих факторів. Отримані дані узгоджуються з теорією та виробничою практикою прокатного виробництва.

**Ключові слова:** *кваліметрія, комплексні та поодинокі показники якості, керуючі фактори, неповний опис об'єкта, оптимізація*

### 1. Вступ

Для управління якістю будь-якого об'єкта необхідно оцінювати рівень та значущість сукупності всіх його суттєвих показників (властивостей) ще на етапі планування виробництва. За цих обставин слід розуміти, що «абсолютної» якості

немає, а «узагальнена» якість може сприйматися зацікавленими сторонами (стейкхолдерами) лише при зіставленні показників однорідних об'єктів, які виконують аналогічні функції [1].

Адекватними інструментами визначення раціональних керуючих впливів на об'єкти є підходи кваліметрії, як науки, що вивчає і реалізує методи і засоби кількісної оцінки якості. Це передбачає структуроване уявлення об'єкта (продукції та/або процесу та/або системи) на кількох рівнях [2]:

- вищий системний рівень, який описує об'єкт у цілому у вигляді комплексного показника якості  $Q$ ;
- підсистема *одиничних показників якості*  $y_i$  об'єкта, кожен з множини  $1 \leq i \leq n$  яких, описує одну із властивостей об'єкта;
- *впливні фактори*  $x_j$ , з множини  $1 \leq j \leq m$ , які окремо або разом у керованому режимі формують одиничні показники якості  $y_i$  і ґрунтуються на технічних засобах (фізичних явищах) та/або технологічних процесах, та/або певних організаційних діях.

## 2. Методика проведення досліджень

Кожен фактор  $x_j$  може впливати на один або одночасно на декілька одиничних показників якості  $y_i$  об'єкта, підвищуючи або знижуючи рівень узагальнюючого показника якості  $Q$ . У свою чергу, управляючі фактори можуть поділятися на свої складові [3,4].

Для можливого зіставлення в рамках комплексного показника якості зазначених параметрів, що мають різну природу та розмірність, їх представляють у безрозмірному (нормованому) вигляді шляхом поділу рівня відповідного параметра на його базове (зазвичай - максимальне) значення. Це забезпечує діапазон кожного з них у межах  $0 \dots 1$  [3].

Важливість кожного одиничного показника якості  $y_i$  відображають коефіцієнтом вагомості  $K_i$ , сума яких з урахуванням усіх  $n$  одиничних показників якості разом із так званим «показником неповноти  $u$  опису об'єкта» дорівнює 1,0 (100%) [3]. Тоді на залишок суми коефіцієнтів вагомості зостається:

$$\sum_{i=1}^n K_i = 1 - u \quad (1)$$

Функціонал  $Q$  як основу моделі управління властивостями об'єкта створюють таким чином, щоб зростанню одиничних показників  $y_i$  якості зі своїми коефіцієнтами вагомості  $K_i$  відповідало б *збільшення* комплексного показника якості, а одиничні показники якості  $y_i$  формують з урахуванням впливу  $x_j$  на них [1]:

$$Q = f(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m; m; K_1, \dots, K_i, \dots, K_n; n) \quad (2)$$

де «прихованими» є функції  $y_i = \varphi(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m)$ . Тоді відповідна задача аналітичної оптимізації набуває вигляду:

$$\frac{\partial Q}{\partial x_1} = 0; \dots \frac{\partial Q}{\partial x_j} = 0; \dots \frac{\partial Q}{\partial x_m} = 0 \quad (3)$$

Може виявитися, що математичний максимум показника  $Q$  відсутній або вимагає забезпечення рівнів  $x_j$ , які формально знаходяться поза межами їхньої можливої практичної реалізації. У таких випадках ці рівні визначають таким чином, щоб максимізувати  $Q$  в реальному діапазоні існування  $x_j$  (зазвичай – на межі відповідних діапазонів).

Особливістю та метою цієї роботи стала оцінка впливу одиничних показників  $y_i$  на ефективність управління об'єктом шляхом раціонального обмеження їх кількості.

Для цього запропоновано визначати мінімально прийнятне значення коефіцієнта вагомості  $K_{\min}$  відповідно до рівняння:

$$K_{\min} = (K_{cp} - a \cdot s_k), \quad (4)$$

де  $K_i$  – середня величина первісного переліку:

$$K_{cp} = \frac{1 - u_1}{n_1}, \quad (5)$$

де  $s_k$  – відповідний стандарт відхилення розподілу  $K_{i1}$  від  $K_{cp}$ ,  $0 \leq a \leq 0,9$  – коефіцієнт (своєрідний аналог «квантилю розподілу»), за допомогою якого в рамках конкретної задачі обмежують кількість  $y_{i2}$  об'єкта, що враховують на другому (індекс «2») етапі аналізу (після виключення відносно малозначущих факторів).

При деякому  $a$  і відповідному  $K_{\min}$  всі одиничні показники якості, у яких  $K_i < K_{\min}$  ігнорують.

Використання на другому етапі аналізу скоригованого переліку  $y_{i2}$  (у кількості  $n_2$ ) та  $u_2$  для забезпечення вимог кваліметрії [3] вимагає перерозподілу «невикористаної» частини суми коефіцієнтів вагомості та показника неповноти опису об'єкта таким чином, щоб їх нова сума дорівнювала одиниці. В результаті, для другого етапу аналізу:

$$K_{i2} = \left(1 + \frac{\sum_{K_{i1} < K_{\min}} K_{i1}}{1 - \sum_{K_{i1} < K_{\min}} K_{i1}}\right) \cdot K_{i1}; \quad u_2 = \left(1 + \frac{\sum_{K_{i1} : u_1 < K_{\min}} K_{i1}}{1 - \sum_{K_{i1} : u_1 < K_{\min}} K_{i1}}\right) \cdot u_1. \quad (6)$$

### 3. Результати та обговорення

Представлений підхід застосували для аналізу процесу виготовлення холоднокатаної штаби номінальною шириною 1200 мм та товщиною 0,5 мм із Сталі 08кп.

На основі вимог нормативно-технічної документації [5] експертним шляхом попередньо (індекс «1») визначили наступний перелік  $n_1$  одиничних показників якості об'єкта  $y_{i1}$  з їх коефіцієнтами вагомості  $K_{i1}$  та показником неповноти опису об'єкта  $u_1$ :

- для  $i = 1$  – «модуль відхилення товщини штаби  $\Delta h$  від номінального значення  $h$ » з коефіцієнтом вагомості  $K_1 = 0,03$  (зростання показника зменшує комплексний показник якості  $Q$ );

- для  $i = 2$  – «межа міцності  $\sigma_B$ » з  $K_2 = 0,27$  (зростання показника збільшує  $Q$ );

- для  $i = 3$  – «межа текучості  $\sigma_T$ » з  $K_3 = 0,1$  (зростання показника збільшує  $Q$ );

- для  $i = 4$  – «твердість  $HB$ » з  $K_4 = 0,07$  (зростання показника збільшує  $Q$ );

- для  $i = 5$  – «відносне подовження  $\delta$ » з  $K_5 = 0,18$  (зростання показника збільшує  $Q$ );

- для  $i = 6$  – «висота шорсткості  $R_a$ » з  $K_6 = 0,05$  (для цього конкретного прикладу прийняли, що зростання цього показника в певних межах збільшує комплексний показник якості, оскільки сприяє стабілізації процесу прокатки [5]);

- для  $i = 7$  – «неплоскостність штаби  $P$ , яку можна виправити в процесі наступної прокатки», з  $K_7 = 0,06$  (зростання цього показника збільшує  $Q$  на відміну від абсолютної неплоскостності штаби, яка зменшує якість прокату [6]);

- для  $i = 8$  – «питомі енерговитрати  $A$  під час виробництва цієї продукції» з  $K_8 = 0,21$  (зростання показника зменшує  $Q$ );

- показник неповноти опису об'єкта  $u_1 = 0,03$ .

Контрольна сума 1,00 при попередньо визначеному  $n_1 = 8$ .

Аналіз виконали в порівнянні з первісним переліком параметрів для випадків:

-  $a_1 = 0$  з відповідним  $K_{\min 1} = 0,12$ , з трьома одиничними показниками якості під номерами 2, 5, 8 та  $u_{21} = 0,038$ ;

-  $a_2 = 0,25$  з  $K_{\min 2} = 0,098 \approx 0,10$ , чотирма  $y_{i1}$  з номерами 2, 3, 5, 8 та  $u_{22} = 0,043$ .

Відповідно, вирази для комплексного показника якості набули вигляду:

- для першого варіанту аналізу:

$$Q_1^1 = 0,391 \cdot \sigma_B + 0,261 \cdot \delta + 0,304 / A ; \quad (7)$$

- для другого варіанту аналізу:

$$Q_2^1 = 0,342 \cdot \sigma_B + 0,127 \cdot \sigma_T + 0,228 \cdot \delta + 0,265 / A ; \quad (8)$$

- для третього варіанту (вихідного повного переліку одиничних показників якості):

$$Q_3^1 = \frac{0,03}{\Delta_{\%}} + 0,27 \cdot \sigma_{\epsilon} + 0,10 \cdot \sigma_T + 0,07 \cdot HB + 0,18 \cdot \delta + 0,05 \cdot Ra + 0,06 \cdot P + 0,21 / A . \quad (9)$$

Ці варіанти представляють *різні* імітаційні моделі *одного об'єкта*. Тому зіставлення абсолютних значень  $Q_1^1$ ,  $Q_2^1$  та  $Q_3^1$  не є коректним. Проте, представлений підхід дозволяє зіставити *чутливість* розглянутих моделей до зміни керуючих факторів, а також визначити перелік і раціональні рівні одиничних показників якості, які необхідні для максимізації якості всього об'єкта.

Відповідно до рівняння (2) та на основі відомих даних щодо формування властивостей прокатоної сталевий штаби [6] - [9] визначили в якості *технологічного керуючого фактору* – «сумарний ступінь деформації  $x_1 = \epsilon_{\%}$ », *організаційно-технічного фактору* – «хімічний склад сталі (в мас. %)\», а також реальний діапазон їх практичного застосування. При цьому у зв'язку з наявністю у складі сталі кількох хімічних компонентів (залізо *Fe*, вуглець *C*, манган *Mn* та ін.) на основі даних джерела [6] узагальнений склад матеріалу представили вуглецевим еквівалентом *CE* (тобто  $x_2 = CE$ ). Прийнятий діапазон зміни для  $x_j$ :  $\epsilon_{\%} = 66 \dots 92\%$ ;  $C = 0,07 \dots 0,10\%$ ;  $Mn = 0,35 \dots 0,45 \%$ ;  $CE = 0,13 \dots 0,175$ .

Вплив факторів  $x_j$  на одиничні показники якості представили у нормованому вигляді (ідентифікатор з верхньою рискою) такими формулами:

- для межі міцності:

$$\overline{\sigma_{\epsilon}} = \overline{\sigma_{\epsilon_{\%}}} \cdot \overline{\sigma_{\epsilon CE}} = 0,29 + 0,0009 \cdot (CE \cdot 10)^{8,89} + 0,013 \cdot \epsilon_{\%}^{0,75} + 3,99 \cdot 10^{-5} \cdot \epsilon_{\%}^{0,75} \cdot (CE \cdot 10)^{8,89} ; \quad (10)$$

- для межі текучості:

$$\overline{\sigma_T} = \overline{\sigma_{T \epsilon_{\%}}} \cdot \overline{\sigma_{T CE}} = 0,28 + 0,04 \cdot \epsilon_{\%}^{0,6} + 0,0016 \cdot (CE \cdot 10)^{5,34} + 0,00023 \cdot \epsilon_{\%}^{0,6} \cdot (CE \cdot 10)^{5,34} ; \quad (11)$$

- для відносного подовження:

$$\overline{\delta_{\%}} = \overline{\delta_{\% \epsilon_{\%}}} \cdot \overline{\delta_{\% CE}} = 10^{1,724 - 0,028 \cdot \epsilon_{\%} + 0,001 \cdot \epsilon^2} \cdot \frac{0,42}{0,725 + CE} ; \quad (12)$$

- для питомих енерговитрат:

$$\begin{aligned} \overline{A} = \overline{A_{\varepsilon_{\%}}} \cdot \overline{\sigma_T} = 6,9 \cdot \{ (0,28 + 0,04 \cdot \varepsilon_{\%}^{0,6} + 0,0016 \cdot (CE \cdot 10)^{5,34} + \\ + 0,00023 \cdot \varepsilon_{\%}^{0,6} \cdot (CE \cdot 10)^{5,34} ) \cdot (\lg \cdot \frac{100 + \varepsilon_{\%}}{100})^{1,12} \}; \end{aligned} \quad (13)$$

- для відхилення товщини:

$$\overline{\Delta}_{\%} = \frac{1}{\Delta} = 3,03 - 0,031 \cdot \varepsilon_{\%}; \quad (14)$$

- для міцності:

$$\overline{HB} = \overline{HB_{\varepsilon_{\%}}} \cdot \overline{HB_{CE}} = 0,29 + 0,49 \cdot CE + 0,052 \cdot \varepsilon_{\%}^{0,55}; \quad (15)$$

- для висоти мікрорельєфу:

$$\overline{Ra} = \overline{Ra_{\varepsilon_{\%}}} = \frac{1}{-2,151 + 0,0475 \cdot \varepsilon_{\%}}; \quad (16)$$

- для відносної неплоскостності, що виправляється:

$$\overline{P} = \overline{P_{\varepsilon_{\%}}} = -1,15 + 0,023 \cdot \varepsilon_{\%}. \quad (17)$$

У даному випадку використання системи (3) не виявило математичних максимумів величин  $Q_1^I$ ,  $Q_2^I$  та  $Q_3^I$ . Тому із застосуванням комп'ютерних засобів багатопараметричного аналізу визначили значення  $x_{2j}$ , які максимізували відповідні комплексні показники якості. Строго кажучи, отримані в такий спосіб значення  $x_{2j}$  слід вважати не *оптимальними*, а *«раціональними»* з урахуванням меж їх можливої реалізації при найбільших значеннях  $Q$ .

Про чутливість кожного з  $Q$  судили відповідно до їх відносної зміни у діапазоні від максимуму (індекс «max») до мінімуму (індекс «min») при порівнянні варіації кожного  $x_{2j}$  та їх сумарному (індекс « $\Sigma$ ») впливу. Виявлено, що при варіанті 1 ( $n = 4$ ) зміна  $\varepsilon_{\%}$  обумовлює зміну  $Q$  в 1,27...1,37 разів, зміна  $CE$  – в 1,08...1,16 разів, а загальний можливий діапазон чутливості цієї моделі – до 1,5 разів.

Аналогічні дані для другого варіанту ( $n = 3$ ):  $\left( \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \right)_{\varepsilon} = 1,37..1,51$ ,  $\left( \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \right)_{CE} = 1,08...1,19$ , та  $\left( \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \right)_{\Sigma} \sim 1,6$ , а для повного переліку  $y_i$  ( $n = 8$ ):  $\left( \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \right)_{\varepsilon} = 1,22...1,28$ ,  $\left( \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \right)_{CE} = 1,07...1,12$ , та  $\left( \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \right)_{\Sigma} = 1,37$ .

#### 4. Висновок

Виявлено, що чутливість моделей до зміни фактору  $CE$  приблизно однакова. Тоді з урахуванням фактору  $\varepsilon\%$  може бути визначена оптимальна (раціональна) кількість одиничних показників якості, яка одночасно забезпечує ефективне управління якістю об'єкта та адекватно відображає його властивості, необхідні стейкхолдерам.

Показано також, що в рамках прийнятих обмежень, найбільші значення комплексного показника якості забезпечуються мінімально можливими рівнями ступеня деформації  $\varepsilon\%$  та максимально можливими значеннями вуглецевого еквівалента  $CE$ . На практиці збільшення  $CE$  досягають підбором хімічного складу сталі [5], [6], [8], а необхідне зменшення  $\varepsilon\%$  забезпечують вибором заготовки з мінімальною вихідною товщиною при фіксованій товщині штаби [9], [10]. У цілому, отримані результати узгоджуються з даними виробничої практики [6], [8], але вони апіорі не є очевидними, оскільки має місце різноспрямований вплив параметрів імітаційних моделей на  $Q$ : збільшення  $\varepsilon\%$  і  $CE$  супроводжується збільшенням вагомих одиничних показників якості: межі текучості  $\sigma_T$  і межі міцності  $\sigma_B$ . Це у межах прийнятих умов збільшує  $Q$ . Однак при цьому відносне подовження  $\delta$  зменшується, а показник  $A$ , пов'язаний з питомими енерговитратами під час виробництва, зростає, що знижує рівень  $Q$ .

Перспективним напрямом розвитку представленого підходу є його застосування для оптимізації з підвищенням рівня загальної якості інших реальних об'єктів (продукції, послуг, процесів, систем) з оцінкою економічної ефективності.

#### Література

1. Dolzhansky, A.M., Mospan, N.M., Lomov, I.M., & Maksakova, O.S (2017). *Quality management systems*. Dnipro: Svidler AL, 563 p.
2. Motalo, V., Stadnyk, B., Mykyjchuk, M., & Motalo, A. (2019). Qualimetrical measurements: methodology based on relationship between qualimetry and metrology. *Metrology and measurement systems*, 2(26), 431-443. <https://doi.org/10.24425/mms.2019.128361>
3. Gunasekaran, A., Subramanian, N., & Ngai, W.T.E. (2019). Quality management in the 21st century enterprises: Research pathway towards Industry 4.0. *International Journal of Production Economics*, (207), 125-129. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.005>
4. Kuts, V.R., Stolyarchuk, P.G., & Druzyuk, V.M. (2012). *Qualimetry*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 256 p.
5. ASTM A366/A366M-91. *Standard Specification for Steel, Carbon Cold-Rolled Sheet, Commercial Quality*.
6. Mazur V.L., & Nogovitsyn A.V. (2010). *Theory and technology of sheet metal rolling (numerical analysis and technical applications)*. Dnepropetrovsk: RVA «Dnipro – VAL», 500 p.
7. Garber, E.A., & Kozhevnikova, I.A (2017). *Rolling theory*. Cherepovets: TNT Publishing House, 312 p.
8. Sun, J., Peng, Y., & Liu, H. (2014). Dynamic characteristics of cold rolling mill and strip based on flatness and thickness control in rolling process. *Journal of Central South University*, 21(2), 567-576. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-1975-7>
9. Li, S., Li, N., Peng, X., Lu, X., & Li, J. (2013). Fatigue Property of Hot Rolled and Cold Rolled Strips. *Journal of Iron and Steel Research International*, 20(2), 48-51. [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(13\)60055-2](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(13)60055-2)
10. Vasilev, Ya.D., & Minaev, A.A (2010). *The theory of longitudinal rolling*. Donetsk: UNITECH, 456 p.