



УДК 669.161

Поступила 11.01.2017

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОПРОКАТА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

COMPREHENSIVE INDEX OF QUALITY OF ROLLED STEEL AND ITS APPLICATION

А. Б. СТЕБЛОВ, Минск, Беларусь. E-mail: anver_steblov@mail.ru

A. B. STEBLOV, Minsk, Belarus. E-mail: anver_steblov@mail.ru

Рассмотрено понятие комплексного показателя качества сортового проката на примере подшипниковой стали ШХ15СГ как совокупности свойств, отражающих качество геометрии профиля, дефектов поверхности, макро- и микроструктуры, механических свойств. Выполнены квалиметрическая оценка достигнутого уровня качества, расчет вероятности появления брака, предложена методология управления технологией на основе статистической связи исследуемых показателей качества с параметрами промышленной технологии в сталеплавильном и прокатном цехах.

The concept of an integrated indicator of quality of rolled metals, for example bearing steel 1.3520(EN), as a set of properties reflecting the quality of the profile geometry, surface defects, macro and microstructure and mechanical properties was considered. The qualitative evaluation of the achieved quality level, the calculation of the probability of occurrence of defects was made. The methodology of technology management on the basis of statistical relations of the studied quality indicators with parameters of industrial technologies in steelmaking and rolling shops was established.

Ключевые слова. Управление качеством продукции, квалиметрия, показатель качества продукции, вероятность появления брака, статистически значимые параметры технологии.

Keywords. The product quality control, qualimetry, quality of products, probability of defects, the statistically significant parameters of technology.

В 1976–1978 гг. журнал «Сталь» проводил дискуссию по оценке качества металлопродукции, которая позволила сформулировать общие требования к оценке качества проката [1–3]. Сегодня на основе квалиметрического подхода создана методология управления качеством продукции, суть которой сводится к формулированию комплексного показателя качества, связанного с параметрами технологии металлургического производства.

Рассмотрим использование методологии управления качеством на примере производства проката ОАО «Днепроспецсталь», ориентированного на выпуск сталей специальных марок в объеме до 460 тыс. т в год. Завод производит 57 марок сталей нержавеющей, коррозионностойких, аустенитного класса. В общем объеме производства конструкционные углеродистые стали составляют 14–18%, конструкционно-легированные – 28–33 и подшипниковые – 26–31%. Количество брака по видам проката колеблется от 0,1 до 3,5% от общего объема производства в тоннах. В процессе исследования из производимых видов проката и марок сталей были выбраны марки стали с максимальным убытком от брака и рекламаций. Например, при общем заводском браке по прокату 1,32% – 3432,36 т потери составили в исследуемый период 28,1 млн. долл. в год. Можно добавить и рекламации по всем цехам в объеме 865,43 т. Была поставлена задача, разработать комплекс мероприятий, направленных на снижение потерь от брака по заводу. Для условий ОАО «Днепроспецсталь» была разработана методология комплексной оценки качества готового проката, которая показала свою эффективность на этапе внедрения и в процессе развития технологии на заводе уточняется и совершенствуется. В данной статье в качестве примера использования методологии расчета комплексного показателя качества продукции выбрана сталь марки ШХ15СГ (1.3520EN). На данный момент исследования приходился максимальный брак по заводу – 728,3 т.

Комплексный критерий Q_0 состоит из единичных показателей качества $q_{i,j}$, расположенных на низших уровнях управления. Сложность состоит в том, что различные показатели качества и параметры

технологии имеют разную размерность. Поэтому оценка качества по выбранному показателю выполняется на основе расчета вероятности попадания его значений в заданный интервал от K^H до K^B – нижняя и верхняя граница показателя качества. В случае нормального распределения дифференциальная оценка качества проката равна вероятности попадания в интервал $K^H...K^B$ и определяется по формуле:

$$P_{ij} = \text{вер} (K^H \leq Q_{ij} \leq K^B) = F(K^H) - F(K^B), \quad (1)$$

где $F(K^B)$ и $F(K^H)$ – значение интегральной функции распределения в точках K^H и K^B .

Для случая нормального распределения зависимость (1) имеет вид [4]

$$P_{ij} = \Phi\left(\frac{K^B - \bar{Q}}{S}\right) - \Phi\left(\frac{K^H - \bar{Q}}{S}\right), \quad (2)$$

где Φ – функция Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz; \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где S – среднее квадратическое отклонение; n – число измерений;

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^n Q_i / n, \quad (5)$$

где \bar{Q} – среднее значение по выборке из n элементов.

Для комплексного критерия Q_0 рассчитывается вероятность P_0 . На каждом более низком иерархическом уровне качества рассчитываются значения P_{ij} . Под этим понимается вероятность попадания на i -м уровне j -го показателя в исследуемый интервал $K^H...K^B$, например, единичный показатель q_{ij} – (j) твердости 179–217 HRC (i)-м уровне (механические свойства). На рис. 1 показана область, образованная границами K^H и K^B , в которую заключен объем значений годной продукции.

Каждый единичный показатель, как и качество проката в целом, формируется под воздействием множества технологических факторов. Зачастую различные факторы влияют на конкретный показатель (свойство) диаметрально противоположно. Поэтому нахождение критериев управления комплексным критерием качества – это поиск компромиссных решений. Влияние параметров технологии на величину показателя качества q_{ij} носит стохастический (вероятностный) характер.

Показатели качества на уровнях $I = 1$ и 2 в свою очередь подразделяются на показатели как совокупные (интегральные) для своего уровня $Q_{i,j}$, так и конечные (дифференциальные) показатели $q_{i,j}$. Например, в интегральный показатель уровня $I = 1$ – качество металла $Q_{1,2}$ входят химический состав, макро- и микроструктура. На следующем уровне $I = 2$, например микроструктура, каждый из единичных показателей нормируется по НТД в баллах и обязательно контролируется. Известно, что ОСТ МЧМ 1438-79 «Стали и сплавы. Микроструктура. Термины и определения» нормируют 114 разновидностей дефектов микроструктуры. Каждый из них связан с параметрами технологии и имеет свою цену в рублях при отбраковке продукции. Расчет вероятности P_0 при оценке комплексного показателя качества Q_0 выполняется с принятой доверительной вероятностью 95–99%:

$$P_0 = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n (p_{i,j}) W_{i,j}, \quad (6)$$

где \prod – операция конъюнкции (логического произведения); $p_{i,j} = F(K_{i,j}^B) - F(K_{i,j}^H)$ – вероятность попадания в заданный интервал, ограниченный с двух сторон: $K_{i,j}^B$ – сверху и $K_{i,j}^H$ – снизу; m – число уровней подчиненности по иерархии ($0 < i < m$); n – число показателей качества ($1 < j < n$); $W_{i,j}$ – коэффициент «вето».

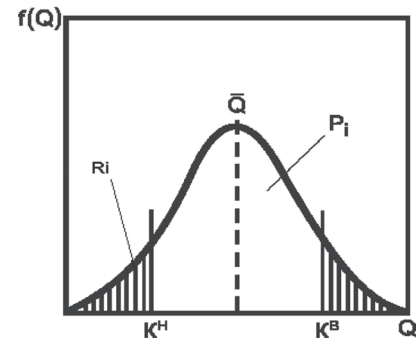


Рис. 1. Кривая плотности распределения показателя качества при двухстороннем ограничении K^H и K^B

Коэффициент $W_{i,j}$ предусматривает случаи, когда низкая дифференциальная оценка может перекрываться высокой оценкой по другому показателю, тогда комплексная оценка Q_0 будет неоправданно высокой. Чтобы этого не происходило, вводится условие обращения в нуль комплексной оценки на рассматриваемом уровне при определенных условиях:

$$W_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } R_{i,j}^H \leq [R]_{i,j}^H \text{ и } R_{i,j}^B \leq [R]_{i,j}^B, \\ 0, & \text{если } R_{i,j}^H > [R]_{i,j}^H \text{ и } R_{i,j}^B > [R]_{i,j}^B, \end{cases} \quad (7)$$

где $[R]$ – предельно допустимое значение; R – количество металла, т, или, %, за исследуемый период со значением конкретного показателя, вышедшего за пределами требований стандарта.

Для случая одностороннего ограничения (сверху или снизу) коэффициент вето (7) может быть вычислен по упрощенной зависимости:

$$W_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{ij} \geq (1 - [R]_{ij}), \\ 0, & \text{если } p_{ij} < (1 - [R]_{ij}). \end{cases} \quad (8)$$

Рассмотрим структуру комплексного критерия качества Q_0 сортового проката. Качество продукции в целом определяется совокупностью показателей Q_j на i -м уровне.

Иерархическая совокупность показателей качества продукции составлена с учетом всех требований, предъявляемых к прокату из подшипниковой стали по ГОСТ Р 56299-2014 (табл. 1).

Таблица 1. Иерархический уровень показателей качества

| $I=0$ | $I=1$ | $I=2$ | $I=3$ | $I=4$ |
|-------|-----------|---------------------|---------------------|------------|
| Q_0 | $Q_{1.1}$ | $q_{2.1}-q_{2.5}$ | – | – |
| | $Q_{1.2}$ | $Q_{2.6}$ | $q_{3.1}$ | – |
| | | | $q_{3.2}-q_{3.11}$ | |
| | | | $q_{3.12}-q_{3.21}$ | |
| | | | $q_{3.22}$ | |
| | | | $q_{3.23}$ | |
| | | | $q_{3.24}-q_{3.30}$ | |
| | $Q_{1.3}$ | $Q_{2.7}$ | $q_{3.31}-q_{3.36}$ | – |
| | | | $Q_{2.8}$ | |
| | | | $Q_{2.9}$ | $q_{3.37}$ |
| | | $Q_{2.10}-q_{2.17}$ | $q_{3.38}$ | – |

Примечание. Уровень иерархии:

- $I=0$ Q_0 – качество продукции в целом, комплексный показатель;
- $I=1$ $Q_{1.1}$ – качество геометрических размеров;
 $Q_{1.2}$ – качество металла;
 $Q_{1.3}$ – качество поверхности;
- $I=2$ $q_{2.1}$ – отклонение от номинального диаметра, мм +8,0 –2,0;
 $q_{2.2}$ – отклонение от заданной мерной длины, мм +25;
 $q_{2.3}$ – кривизна по длине, % ≤ 0,45;
 $q_{2.4}$ – косина реза, мм ≤ 5;
 $q_{2.5}$ – фаска, мм < 6(45°±15°);
 $Q_{2.6}$ – качество марки стали;
 $Q_{2.7}$ – качество механических свойств;
 $Q_{2.8}$ – качество макроструктуры;
 $Q_{2.9}$ – качество микроструктуры;
 $Q_{2.10}-q_{2.17}$ – (раскатанные загрязнения, трещина, плена, закат, риска, отпечаток, вкатанная окалина);
- $I=3$ $q_{3.1}$ – сквозная прокаливаемость;
 $q_{3.2}-q_{3.11}$ – химический состав стали, % (C, Mn, Si, S, P, Cr, Ni, Mo, Cu);
 $q_{3.12}-q_{3.21}$ – отклонение химического состава от заданных пределов, ±;
 $q_{3.22}$ – испытание на осадку;
 $q_{3.23}$ – твердость HB 179–217;
 $q_{3.24}$ – центральная пористость, балл – 2;
 $q_{3.25}$ – точечная неоднородность, балл – 2;
 $q_{3.26}$ – ликвационный квадрат, балл – 0,5;
 $q_{3.27}$ – осевая ликвация, балл – 2,0;
 $q_{3.28}$ – ликвационные полосы, балл – 1,0;
 $q_{3.29}$ – подусадочная ликвация, балл – 2,0;
 $q_{3.30}$ – излом;
 $q_{3.31}$ – ОБЗ мм, ≤ 1,1;

- $q_{3.32}$ – форма и степень перлита, балл – 3;
- $q_{3.33}$ – карбидная сетка, балл – 3;
- $q_{3.34}$ – структурная полосчатость, балл – 4;
- $q_{3.35}$ – карбидная ликвация, балл – 2;
- $q_{3.36}$ – микропористость;
- $q_{3.37}$ – неметаллические включения;
- $q_{3.38}$ – глубина дефектов, $mm \leq 0,5-0,8\%D_H$;
- $I = 4$ $q_{4.1}$ – оксиды, балл – 2,5;
- $q_{4.2}$ – сульфиды, балл – 2,5;
- $q_{4.2}$ – глобулы, балл – 2,0;
- $q_{4.2}$ – загрязненность по шкале IR.

Химический состав стали $q_{3,2}-q_{3,11}$ для ШХ15СГ является квалификационным, следовательно, эти показатели при расчете комплексного показателя не используются. Качество поверхности (суммарные дефекты поверхности) $Q_{1,3}$ и показатели качества $Q_{2,10}-Q_{2,17}$ второго уровня оцениваются по каждому показателю на уровне $q_{3,38}$, где контролируется глубина дефекта. Для определения конкретного вида функции вполне очевидным является использование формулы (2), согласно которой вычисления дифференциальной оценки и вероятности попадания исследуемых значений показателя качества P_{ij} внутрь заданного интервала предшествуют определению величина P_o , поэтому сначала следует найти зависимости:

$$P_{ij} = \gamma_{ij}(\bar{X}), R_{ij} = \varphi_{ij}(\bar{X}), W_{ij} = \omega_{ij}(\bar{X}). \quad (9)$$

Поскольку P_{ij} – есть вероятность попадания в интервал $[K^H, K^B]$, то ее величина зависит от параметров $p = F(\bar{Q}, S, K^H, K^B)$, где статистическое значение исследуемого параметра по выборке из генеральной совокупности S и \bar{Q} рассчитывается по формулам (4)–(5) и изменяется в зависимости от параметров технологии; K^H, K^B в конкретных условиях – величины постоянные. Наиболее приемлемой формой представления математической модели технологического процесса являются многочлены первой степени:

$$\bar{Q} = a_o + \sum a_z x_z, S = b_o + \sum b_z x_z, \quad (10)$$

где a, b – коэффициенты регрессии; x_z – параметры технологии.

В процессе исследований было установлено, что 94% всего брака на стали ШХ15СГ приходится на показатель $Q_{1,2}$ – качество металла. В свою очередь, на поверхностные дефекты приходится 35%, на брак по УЗК – 38,2%. Далее по основным показателям качества поверхности, макро- и микроструктуре были сделаны выборки за несколько лет и выполнена статистическая обработка данных с определением доли плавок, выходящих за установленные границы требований ГОСТ с установленной вероятностью 0,97.

После статистической обработки массива данных годных и забракованных плавок по исследуемому показателю качества были получены статистические данные для расчета комплексного показателя конкретного вида дефекта и произведен расчет вероятности соответствия каждого показателя требованиям НТД с доверительной вероятностью 95% при двухстороннем ограничении и 97% при ограничении только сверху или снизу. Расчет выполнен по формуле (1) с использованием таблицы интегральной функции Лапласа Φ (3).

Таблица 2. Расчетные значения показателей качества

| $I = 0$ | $I = 1$ | $I = 2$ | $I = 3$ | $I = 4$ |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,74 | 0,977 | 0,977 | – | – |
| | 0,777 | 0,959 | 0,999 | – |
| | | | 0,981 | |
| | | | 0,988 | |
| | | | 0,971 | |
| | | | 0,933 | |
| | | | 0,911 | |
| | | | 0,989 | |
| | | | 0,991 | |
| | 0,974 | 0,974 | 0,974 | – |

Из табл. 2 следует, что расчетный комплексный критерий $Q_o = 0,74$. В основном единичные, дифференциальные показатели качества имеют одностороннее ограничение.

Сам по себе данный показатель условно оценивает уровень качества конкретного вида продукции в сравнении с остальными. Но если рассматривать вероятность появления дефектов по каждому показателю совместно со статистическими уравнениями, в которых установлена корреляционная связь с пара-



Рис. 2. Схема работы по контролю и анализу уровня качества и технологии

метрами технологии, то исследовательский персонал завода приобретает мощный инструмент для количественной оценки уровня качества в зависимости от соблюдения требований принятой технологии.

На рис. 2 приведены последовательность действий по оценке уровня качества и связь полученных расчетов с параметрами технологии. Такой подход позволяет осуществлять как контроль и анализ действующей технологии, так и оперативно вмешиваться в процесс управления качеством на последующем переделе.

При проведении исследовательской работы на ОАО «Днепроспецсталь» для ряда сталей были выполнены статистические исследования регистрируемых параметров технологии в сталеплавильном и прокатных цехах и одновременно выполнен сопоставительный анализ с данными по браку, рекламациям и затратам на исправление брака.

По каждой марке стали были получены десятки статистически значимых уравнений регрессии, которые постоянно дополняются и совершенствуются. Приведем пример нескольких уравнений, относящихся к слиткам массой 3,6–6,2 т и сортовому термообработанному прокату диаметром 130–300 мм:

$$B = 0,19D_{\text{пр}} - 0,02[\text{Mn/S}] - 0,94[\text{Al/S}] - 20,6V_{\text{кр}} - 32,1, \quad (11)$$

где B – брак по УЗК, изменяющийся в интервале от 0 до 45%; $D_{\text{пр}}$ – диаметр проката (интервал 130–300 мм); $[\text{Mn}, \text{S}, \text{Al}]$ – содержание марганца, серы и алюминия по данным окончательного химического анализа; $V_{\text{кр}}$ – скорость кристаллизации 0,2–0,8 см/мин.

Оценка степени влияния параметров технологии по коэффициентам эластичности (оценивает влияние каждого исследуемого фактора, %) показывает, что отбраковка сортового проката по результатам УЗК зависит от диаметра проката на 76,4%, далее следует скорость кристаллизации слитка – 19,1%, соотношение Al/S – 3,1% и соотношение Mn/S – 1,4%. Первый из факторов $D_{\text{пр}}$ характеризует степень деформации при использовании существующих на заводе типоразмеров слитков. При малых степенях деформации осевая рыхлость не заваривается. Остальные факторы определяют характер распределения и морфологию сульфидных включений:

$$T_p = 4,613 \cdot \text{Cr} + 16,6 \cdot \text{Al} + 72,74 \cdot \text{S} - 28,01 \cdot \text{P} - 0,0032 \cdot \text{Z} + 0,0191 \cdot \text{HB} - 0,0005 \cdot T, \quad (12)$$

где T_p – расчетная вероятность появления трещины на поверхности проката при абразивной зачистке (1 – появление трещины, 0 – отсутствие трещины); содержание химических элементов: Cr – 1,38–1,56%, Al – 0,002–0,069, S – 0,005–0,016, P – 0,011–0,019%; Z – размер зерна 23–168, мкм; HB – твердость поверхности (315–385 HB); T – температура подогрева проката перед зачисткой (20–200 °C).

$$KC = 17,4 - 0,0094\bar{T} - 0,007T_4 + 0,004T_{\text{кп}}, \quad (13)$$

где \bar{T} – средняя температура в нагревательной печи, °С; T_4 – температура в томильной зоне, °С; $T_{\text{кп}}$ – температура конца прокатки, °С.

Всего для проката из стали ШХ15 СГ-В было получено 52 уравнения регрессии со статистической оценкой надежности по F - и T -критериям. Коэффициенты множественной корреляции уравнений находятся в интервале 0,49–0,89.

Описанный выше комплексный подход в оценке качества сортового проката позволяет связать прогнозируемый уровень качества с затратами по каждому переделу, дает возможность оценить необходимость технологических воздействий на последующих переделах в реальном времени, определить приоритетность затрат как по технологическим агрегатам и направлениям исследовательских работ, так и конкретно по маркам стали и видам выпускаемой продукции. Описанный выше подход был успешно использован на других предприятиях, в частности, для улучшения качества арматурного проката на ГУП «ЛПЗ», г. Ярцево [5].

Литература

1. Зусман Л. Л. Об оценке качества металлопродукции // Сталь. 1976. № 6. С. 549–552.
2. Фрейдэнзон М. Е., Соколкин Б. П., Винокуров И. Я. и др. К вопросу комплексной оценки качества металлопроката // Сталь. 1977. № 1. С. 82–84.
3. Маневич В. А., Глущенко В. Г., Галаев И. П. Об оценке качества металлопродукции // Сталь. 1977. № 6. С. 556–559.
4. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. 512 с.
5. Стеблов А. Б., Тулупов О. Н., Наливайко А. В., Кинзин Д. И. Разработка комплексного показателя качества арматурной стали и обоснование рационального применения слиттинг-процесса в условиях отечественного мини-завода // Вестн. МГТУ, 2011. № 1, С. 52–54.

References

1. Zusman L. Ob otsenke kachestva produktsii [On the estimation of the steel products quality]. *Stal' = Steel*, 1976, no. 6, pp. 549–552.
2. Freidenzon M. E., Sokolkin B. P., Vinokurov I. Ya. et al. K voprosu kompleksnoy otsenki kachestva metalloprokata. [To the question of a complex estimation of the quality of rolled metal products]. *Stal' = Steel*, 1977, no. 1, pp. 82–84.
3. Manevich V. A., Glushchenko V. B., Galaev I. P. Ob otsenke kachestva metalloproduktsii [On the estimation of the steel products quality]. *Stal' = Steel*, 1977, no. 6, pp. 556–559.
4. Smirnov N. V., Dunin-Barkovski I. V. *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tehnicheskikh prilozheniy* [The course of probability theory and mathematical statistics for applications]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 512 p.
5. Steblov A. B., Tulupov O. N., Nalivayko A. V., Kinzin D. I. Razrabotka kompleksnogo pokazatelya kachestva armaturnoy stali i obosnovaniye racionalnogo primeneniya slitting-processa v usloviyah otechestvennogo mini-zavoda [The development of the complex index of reinforcing steel quality and substantiation of rational use of slitting process in the conditions of domestic mini-mill]. *Vestnik MGTU = Bulletin of MGTU*, 2011, no. 1, pp. 52–54.