

УСКОРЕННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ СОРТОВОГО ПРОКАТА С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ОХЛАДИТЕЛЯ

В. А. ТРУСОВ, М. Б. ЗИНКЕВИЧ*

В статье описан способ перемещения охладителя в установках ускоренного охлаждения сортовых профилей. Создана экспериментальная установка термического упрочнения арматурных профилей, позволяющая достигать заданной температуры нагрева, снабженная устройством подачи проката (трайб-аппаратом) и контрольно-измерительными средствами мониторинга изменений гидродинамических параметров устройства охлаждения и температуры окончания ускоренного охлаждения. Определен коэффициент теплоотдачи при различных скоростях и температурах ускоренного охлаждения проката и влияние гидродинамических параметров устройства охлаждения на формирование структуры и комплекса механических свойства профилей. Экспериментально установлена возможность получения стабилизированной структуры проката (в пределах плавки), даны рекомендации по совершенствованию технологии производства периодических профилей класса прочности А600С из низкоуглеродистой стали.

Ключевые слова: прокат, охлаждение, термическое упрочнение, поступательно-вращательное движение, коэффициент теплоотдачи, класс прочности проката, температура, структура, свойства, арматурный профиль.

Развитие сортопрокатного производства направлено на повышение производительности и качественных показателей профилей, в процессе изготовления которых применяются различные виды термомеханического упрочнения. Устройство ускоренного охлаждения металла в линии прокатки должно обеспечить высокую интенсивность и равномерность охлаждения заготовки по сечению и длине, при ограниченных размерах охлаждающего участка на действующем прокатном стане.

На практике наибольшее распространение получили прямоточные устройства проходного типа для охлаждения сортового проката водой в процессе его движения [1]. Коэффициент теплоотдачи α , влияющий на скорость и интенсивность охлаждения в таких устройствах, определяют из следующего выражения [2]:

$$\alpha = 4,2 \cdot 10^{-10} \frac{\lambda_w d_{пр}}{v_n^2} \left[\bar{\omega}_{абс}^2 \left(\frac{d_k}{d_{пр}} \right)^2 + \bar{\omega}_{отн}^2 \left(\frac{v_w}{v_{нас}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где λ_w , v_w — теплопроводность (Вт/м·К) и кинематическая вязкость воды (m^2/c), отнесенные к средней температуре воды в камере охлаждения; $v_{нас}$ — кинематическая вязкость воды (m^2/c) в пограничном слое

с металлом, отнесенная к температуре насыщения при среднем давлении воды по длине камеры; $d_{пр}$, d_k — диаметр проката (м) и камеры охлаждения (м).

Под относительной скоростью перемещения понимается разность скорости воды ($\omega_{абс}$, м/с) и проката ($\omega_{пр}$, м/с):

$$\bar{\omega}_{отн} = \bar{\omega}_{абс} - \bar{\omega}_{пр}. \quad (2)$$

Так как температура на поверхности проката значительно превышает температуру насыщения, то это приводит к образованию паровой пленки, которая ограничивает теплообмен между металлом и водой. На наличие паровой пленки влияет абсолютная ($\omega_{абс}$) и относительная ($\omega_{отн}$) скорости воды и проката в камере охлаждения. Чем больше значения этих скоростей, тем выше разрушающее воздействие на паровую пленку, оказываемое турбулентным движением частиц жидкости.

Таким образом, коэффициент теплоотдачи по длине камеры охлаждения зависит от скорости охлаждения, диаметра проката и от физических свойств охладителя, которые, в свою очередь, зависят от температуры и давления воды в установке. Диаметр камеры охлаждения, при прочих равных условиях, оказывает противоречивое влияние на коэффициент теплоотдачи α . При постоянном расходе воды, согласно закону Бернулли [3], увеличение диаметра охлаждающей камеры (d_k) приводит к росту статического давления в устройстве и, следовательно, к повышению температуры насыщения ($t_{нас}$) и

* Докт. техн. наук, профессор В. А. Трусов; М. Б. Зинкевич, аспирант, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия; prof.trusov@mail.ru

коэффициента теплоотдачи. Однако в результате увеличения давления охладителя уменьшается скорость движения (динамического давления) воды в камере $\omega_{абс}$, что приводит к снижению коэффициента теплоотдачи и интенсивности охлаждения.

С целью увеличения скорости движения охладителя в камере $\omega_{абс}$ разработано, сконструировано и реализовано устройство прямоточного типа для термического упрочнения движущегося сортового проката с принудительным вращением воды внутри камеры охлаждения. Схема такого устройства представлена на рис. 1.

Поток воды в камере охлаждения совершает поступательно-вращательное (винтовое) движение вокруг поверхности проката. Скорость движения воды $\omega_{абс}$ в любой точке, отстоящей от оси проката на расстоянии $d_{пр}/2$, можно рассчитать по формуле

$$\omega_{абс} = \sqrt{\omega_{пост}^2 + \left(\frac{\omega_{врщ} d_{пр}}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

где $\omega_{пост}$ — скорость поступательного движения охладителя, м/с; $\omega_{врщ}$ — скорость вращательного движения охладителя, рад/с.

Скорость движения воды относительно проката $\omega_{отн}$ можно найти из следующей зависимости:

$$\omega_{отн} = \sqrt{\omega_{пост}^2 + \left(\frac{\omega_{врщ} d_{пр}}{2}\right)^2} - \omega_{пр}. \quad (4)$$

Анализ выражений (3) и (4) позволяет заключить, что повышение скорости вращения охладителя $\omega_{врщ}$ приводит к увеличению абсолютной и относительной расходных скоростей воды в камере охлаждения.

Подставив выражения (3) и (4) в равенство (1), получим уточненную зависимость для определения коэффициента теплоотдачи в камере с поступательно-вращательным движением охладителя [4]:

$$\alpha = H \frac{\lambda_k d_{пр}}{v_n^2} \left[\left(\frac{\omega_{пост} d_k}{d_{пр}} \right)^2 + \left(\frac{\omega_{врщ} d_k}{2} \right)^2 + \left(\sqrt{\omega_{пост}^2 + \left(\frac{\omega_{врщ} d_{пр}}{2} \right)^2} - \omega_{пр} \right)^2 \cdot \left(\frac{v_n}{v_{нас}} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где H — показатель, получаемый в результате обработки опытных данных по теплообмену проката с водой в цилиндрических камерах охлаждения.

В ходе прокатки средняя по сечению температура раската может меняться в широких пределах, следовательно, теплоотдача также значительно изменяется. В расчетах температурных полей по сечению металла очень важно правильно задать коэффициент теплоотдачи при вычислении температуры металла в каждый момент времени. Неверно заданные значения теплофизических коэффициентов могут привести к существенным ошибкам при решении температурной задачи по любой методике.

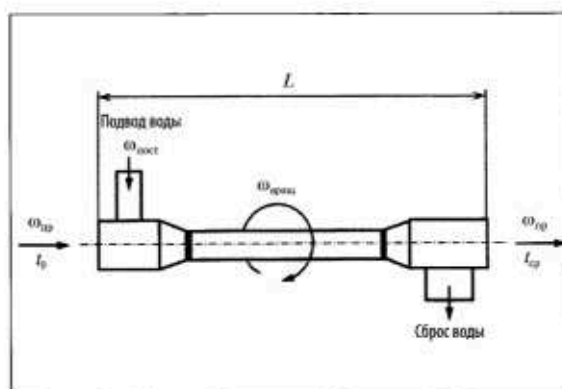


Рис. 1. Схема камеры охлаждения проходного типа с принудительным вращением охладителя

Технология термического упрочнения движущегося сортового проката заключается в интенсивном охлаждении водой в проходной камере и медленном охлаждении на воздухе, где происходит выравнивание температуры по сечению. При постоянном расходе охладителя вращательное движение воды изменяет абсолютную и относительную скорость движения охладителя и приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи в устройстве и интенсивности охлаждения.

Экспериментальную проверку сказанного выше утверждения и возможность достижения требуемых классом прочности А600С по СТО АСЧМ 7-93 механических характеристик проката из низкоуглеродистой стали СтЗсп проводили на установке ускоренного охлаждения путем сравнения интенсивности охлаждения арматурного проката длиной 1700 мм. При этом движение воды в камере охлаждения осуществлялось поступательно-вращательным способом (рис. 2). Интенсивность охлаждения оценивали прямым измерением глубины мартенситного слоя поверхности проката после электроконтактного нагрева проката до температуры 900 °С с последующим термическим упрочнением до изменяющейся (в зависимости от времени охлаждения $\tau_{охл}$ в устройстве) температуры окончания ускоренного охлаждения. Измерения температуры проката, нагретого до 1000 °С (T_0) и ускоренно охлажденного (T_{max}), проводили с помощью бесконтактного инфракрасного пирометра с погрешностью измерения в пределах $\pm(0,01t + 1)$ °С. Варьирование скоростью движения проката $\omega_{пр}$, а следовательно, временем охлаждения, в серии экспериментов осуществлялось изменением скорости подачи проката (арматуры) трайб-аппаратом. Время охлаждения изменялось от 0,5 до 0,8 с. Расход воды $Q_{охл}$ в камере охлаждения составлял 30 м³/ч при давлении $P_{охл} = 15$ бар и 45 м³/ч при давлении 20 бар. Частота вращения одной секции

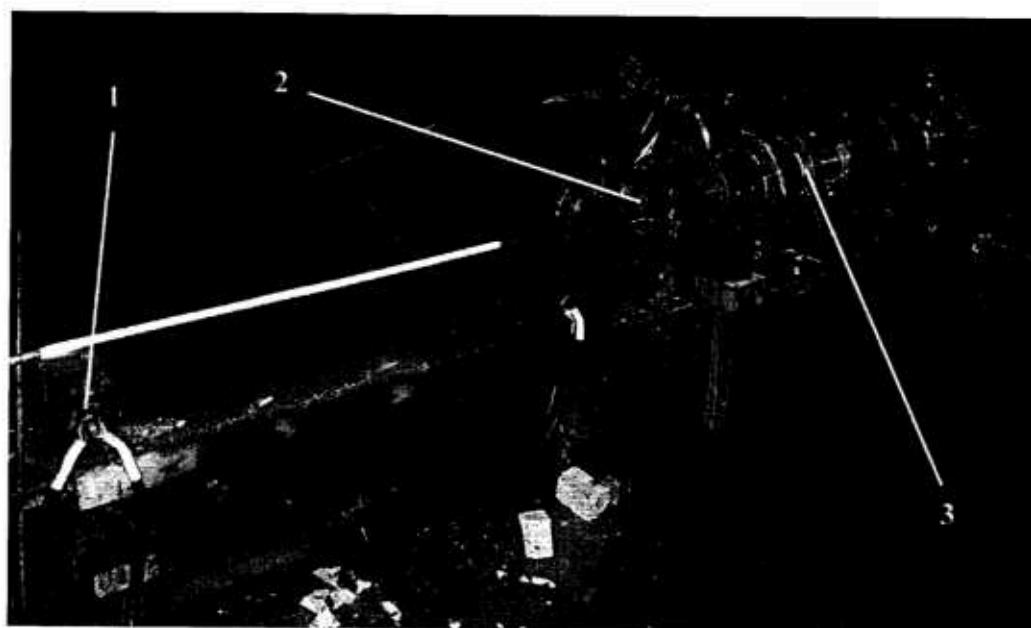


Рис. 2. Опытное прямоочное устройство охлаждения проходного типа с принудительным вращением охладителя внутри камеры: 1 — установка электроконтактного нагрева; 2 — трайб-аппарат; 3 — камера охлаждения

Таблица 1.
Результаты серии экспериментов по исследованию интенсивности охлаждения арматурного проката диам. 16 мм из стали марки СтЗсп

№ п/п	Движение охладителя	Время охлаждения $\tau_{\text{охл}}$, с	Средняя глубина закаленного слоя, мм	Физический (σ_1) или условный ($\sigma_{0,2}$) предел текучести, Н/мм ²	Временное сопротивление (σ_b), Н/мм ²	σ_b/σ_1^*	Относительное удлинение (δ_5), %
1	Поступательное	0,8	1,632±0,103	631	741	1,17	18,8
2	Поступательно-вращательное	0,8	1,848±0,234	671	755	1,13	17,2
3	Поступательное	0,7	1,280±0,357	597	696	1,17	17,0
4	Поступательно-вращательное	0,7	1,408±0,248	630	707	1,12	16,9
5	Поступательное	0,6	0,984±0,085	580	680	1,17	19,8
6	Поступательно-вращательное	0,6	1,368±0,152	618	713	1,15	16,3
7	Поступательное	0,5	0,912±0,394	558	646	1,16	21,5
8	Поступательно-вращательное	0,5	1,224±0,197	586	669	1,14	19,6

* Величина, регламентированная российским стандартом СТО АСЧМ 7-93.

охлаждения длиной 0,3 м составляла 1500 об/мин. Испытания проката на статическое растяжение выполнены на универсальных машинах по методике, приведенной в ГОСТе 1497–84. Результаты серии экспериментов по исследованию интенсивности охлаждения приведены в табл. 1.

Исследования показали, что прочностные свойства образцов, охлажденных с применением технологии принудительного вращения охладителя, выше, чем у образцов, охлажденных поступательно

движущимся охладителем (рис. 3, а). Предел текучести проката повысился на 35 Н/мм² (6 %), что является удовлетворительным результатом для опытной установки с одной подвижной секцией охлаждения длиной до 300 мм. Можно предположить, что увеличение числа активных зон охлаждения приведет к более существенному повышению качественных показателей сортовых профилей и увеличению производительности стана при постоянной длине участка охлаждения.

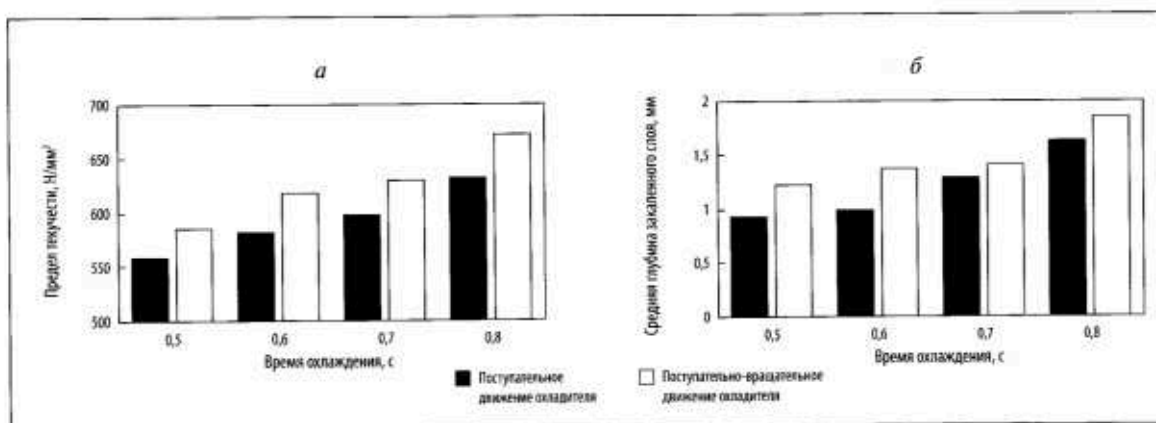


Рис. 3. Предел текучести (а) и глубина закаленного поверхностного слоя (б) образцов диаметром 16 мм из стали марки СтЗсп

Исследования структуры поверхностного слоя проката (рис. 3, б), термически упрочненного с применением технологии принудительного вращения охладителя и при поступательном движении воды в установке, показали, что средняя глубина закаленного слоя на 0,26 мм (22 %) больше при поступательно-вращательном движении охладителя.

О степени равномерности распределения мартенситной структуры по сечению проката можно судить по величине среднеквадратичного отклонения глубины закаленного слоя. При поступательно-вращательном движении воды среднеквадратичные отклонения глубины мартенситного слоя на 0,027 мм (12 %) меньше, чем при поступательном движении. Распределение мартенситной структуры по сечению прутка при термическом упрочнении проката, при прочих равных начальных условиях, с поступательным и вращательным движением охладителя приведено на рис. 4.

В ходе исследований установили, что снижение до рекомендуемой температуры начала последодеформационного охлаждения 800 °С приводит к существенному повышению прочностных характеристик проката при незначительном снижении пластических. Средние значения результатов серии экспериментов по достижению требуемых классом прочности А600С механических характеристик проката из низкоуглеродистой стали марки СтЗсп, нагретого от 800 до 1000 °С, приведены в табл. 2.

Скорость охлаждения проката рассчитывали по формуле.

$$V_{\text{охл}} = \frac{T_0 - T_{\text{вых}}}{\tau_{\text{охл}}}$$

Исследования комплекса механических характеристик арматурного проката диам. 16 мм из стали марки СтЗсп постоянного химического состава показывают, что для достижения требований к комплексу

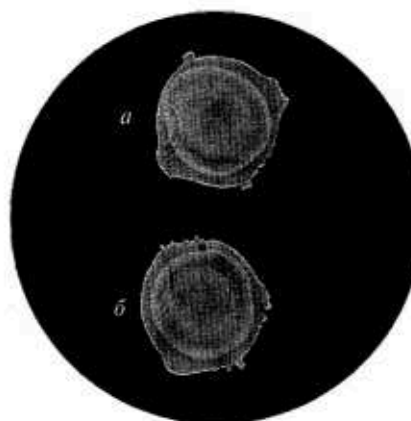


Рис. 4. Распределение мартенситной структуры по сечению прутка при термическом упрочнении проката с поступательным движением (а) и поступательно-вращательным движением (б) охладителя

механических характеристик термически упрочненных арматурных профилей для класса прочности А600С необходимо осуществлять ускоренное охлаждение до температур 450–550 °С.

Заключение

Разработан способ движения охладителя в установке термического упрочнения сортового проката. Кроме рекомендуемого поступательного движения, применяется поступательно-вращательное движение воды, влияющее на интенсивность охлаждения проката, разрушение паровой пленки и получение более однородной по длине проката температуры металла.

Уточнены параметры для определения коэффициента теплоотдачи в размерном виде и установлено, что при постоянном расходе охладителя, увеличение

Таблица 2.
Результаты серии экспериментов по охлаждению арматурного профиля диаметром 16 мм из стали марки СтЗсп (C = 0,22 %; Mn = 0,61 %; Si = 0,20 %)

Расход воды ($Q_{\text{охл}}$), м ³ /ч	Время охлаждения ($t_{\text{охл}}$), с	Температура нагрева (T_0), °C	Давление воды ($P_{\text{охл}}$), бар	Температура окончания охлаждения ($T_{\text{окз}}$), °C	Скорость охлаждения ($V_{\text{охл}}$), °C/с	Предел текучести (σ_t), Н/мм ²	Временное сопротивление (σ_b), Н/мм ²	Относительное удлинение (δ_5), %	σ_b/σ_t
45	0,8	800	20	450	438	703	814	14,6	1,16
30	0,8	800	15	510	363	721	809	16,1	1,12
45	0,6	800	20	525	458	640	748	18,3	1,15
30	0,6	800	15	560	400	599	709	19,1	1,18
45	0,8	900	20	520	475	701	787	16,4	1,12
30	0,8	900	15	565	419	633	725	17,5	1,14
45	0,6	900	20	600	500	571	679	18,7	1,19
30	0,6	900	15	635	442	517	634	20,8	1,23
45	0,8	1000	20	525	594	645	741	11,9	1,15
30	0,8	1000	15	555	556	575	690	14,0	1,20
45	0,6	1000	20	620	633	533	638	15,4	1,20
30	0,6	1000	15	645	592	431	574	18,2	1,33

скорости вращательного движения воды приводит к повышению коэффициента теплоотдачи в камере охлаждения. Выявлен резерв увеличения скорости прокатки или охлаждения более массивных заготовок в условиях, где ограничение по длине охлаждающих участков является решающим фактором.

Обнаружена возможность активного воздействия в широких пределах на изменение величины динамического и статического давления в камере охлаждения.

Создана экспериментальная установка термического упрочнения арматурных профилей, включающая устройство подачи проката (трайб-аппарат) и контрольно-измерительные средства для контроля изменений гидродинамических параметров устройства при изменении скорости охлаждения от 360 до 630 °C/с и температуры окончания ускоренного охлаждения.

Экспериментальные исследования показали, что применение технологии вращательного движения воды на определенном участке охлаждения способствует повышению предела текучести проката. Причем значение этого показателя стабильно в пределах плавки. Структурные составляющие в поверхностном слое проката количественно более развитые, характер распределения структуры по сечению более равномерный, отклонения глубины закаленного слоя от средних значений снижены.

Использование таких устройств при производстве термически упрочненных арматурных профилей из свариваемых марок стали позволяет повысить износостойкость и достичь требуемого класса прочности, включая А600С. Рекомендуемая температура окончания деформации, равная 800 °C, соответствует двухфазной области, поэтому можно сделать предположение, что в межклетевых промежутках следует устанавливать охлаждающие устройства. ■

Библиографический список

1. Кугушин А. А., Узлов И. Г., Калмыков В. В. и др. Высокопрочная арматурная сталь. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.
2. Губинский В. И., Минаев А. Н., Гончаров Ю. В. Уменьшение окалинообразования при производстве проката. — Киев: Техніка, 1981. — 135 с.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — 5-е изд. — М., 2003. — 736 с.
4. Трусов В. А., Зинкевич М. Б. Теоретическое и экспериментальное исследование ускоренного охлаждения сортового проката с принудительным вращением охладителя // Nowe technologie w metalurgii i inzynierii materialowej. XII Miedzynarodowa konferencja naukowa — Czestochowa: Politechnica Czestochowska, 2011. S. 366–372.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF USAGE OF ACCELERATED COOLING OF ROLLED SECTIONS WITH FORCED ROTATION OF COOLING AGENT

Trusov V. A.¹, Doctor of Engineering Science, Professor
Zinkevich M. B.¹, Post-graduate

¹ National University of Science and Technology "Moscow Institute of Steel and Alloys" (MISI), Moscow, Russia

E-mail: prof.trusov@mail.ru

Abstract: The paper describes the method of transition of cooling agent in the units for accelerated cooling of rolled sections. Experimental unit for thermal strengthening of reinforced sections has been developed; it allowed to achieve preset heating temperature and is equipped by the feeder of rolled semiproduct (pinch roll unit) and control-measuring devices for monitoring of variations of hydrodynamic parameters in cooling unit and final temperature of accelerated cooling. The ratio of heat exchange has been determined for different speed and different temperature of accelerated cooling of rolled sections. The effect of hydrodynamic parameters of a cooling unit on forming the structure and mechanical properties of rolled sections is analyzed. Possibility of obtaining stabilized structure of rolled sections (inside one melt) has been established experimentally, recommendations for improvement of production technology for periodic sections of A600C strength grade from low-carbon steel are given. Usage of such cooling units in production of thermally strengthened reinforced sections from weldable steels allows to rise productivity and achieve

the required mechanical properties (including A600C). Recommended temperature of finishing deformation is equal to 800 °C and corresponds to dual-phase area.

Key words: rolled sections, cooling, thermal strengthening, forward and rotating movement, heat exchange ratio, strength grade, temperature, structure, mechanical properties, reinforced section.

References:

1. Kugushin A. A., Uzlov I. G., Kalmykov V. V. et al. Vysokoprochnaya armaturnaya stal (High-strength reinforcing bar steel). Moscow: Metallurgiya, 1986. 272 p.
2. Gubinskiy V. I., Minaev A. N., Goncharov Yu. V. Umenshenie okalinoobrazovaniya pri proizvodstve prokata (Decreasing of scale formation during rolled metal production). Kiev: Tekhnika, 1981. 135 p.
3. Landau L. D., Lifshits E. M. Gidrodinamika — pyatoye izdanie (Hydrodynamics — fifth edition). Moscow, 2003. 736 p.
4. Trusov V. A., Zinkevich M. B. Teoreticheskoe i eksperimentalnoe issledovanie uskorennoy okhlazhdeniya sortovogo prokata s prinuditelnyy vrashcheniem okhladitelya (Theoretical and experimental researching of the accelerated cooling of bar with the forced turning of cooling agent). Nowe technologie w metalurgii i inzynierii materialowej. XII Miedzynarodowa konferencja naukowa — Czestochowa: Politechnica Czestochowska, 2011. S. 366–372.

УДК 62–503.57

РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ КВАЛИМЕТРИИ
МЕТИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Г. Ш. РУБИН, М. В. ЧУКИН, Г. С. ГУН, Д. М. ЗАКИРОВ, И. Г. ГУН*

Разработана теория комплексной количественной оценки качества (квалиметрии) метизов и технологий их производства, основанная на едином конструктивном принципе структурирования свойств метизов и системном подходе к оценке качества изделий и технологических процессов. Предложен функционально-целевой анализ методологических основ исследования качества металлических изделий и технологий.

Ключевые слова: квалиметрия, метизное производство, результативность, арматура для железобетонных шпал.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова уже много лет готовит специалистов для метизного производства. В Маг-

нитогорске располагался уникальный Всесоюзный научно-исследовательский институт метизного производства (ВНИИметиз), работали два метизных предприятия — Магнитогорский калибровочный (МКЗ) и Магнитогорский метизно-металлургический (ММЗ) заводы, а в 80 км от города — крупнейшее метизное предприятие с полным металлургическим циклом — Белорецкий металлургический комбинат (БМК). Наличие «метизной» научной инфраструктуры позволило магнитогорским ученым занять опорные позиции в научном обеспечении производства метизов и создать научную школу метизников.

Квалиметрия — сравнительно молодая наука о количественной оценке качества впервые предлож-

* Канд. техн. наук, доцент Г. Ш. Рубин, начальник управления экономики и правового обеспечения; докт. техн. наук, профессор М. В. Чукин, зав. кафедрой машиностроительных и металлургических технологий; докт. техн. наук, профессор Г. С. Гун, советник ректора; докт. техн. наук, профессор И. Г. Гун, кафедра технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», Магнитогорск; докт. техн. наук, Д. М. Закиров, председатель Совета директоров ОАО «Белебеевский завод «Автономаль», г. Белебей, Россия; m.chukin@mail.ru