

УДК 519.21

**ПУТИ ПРОГНОЗА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ**

**В. И. Большаков, д. т. н., проф., В. Н. Волчук, к. т. н., доц.,  
Ю. И. Дубров, д. т. н., проф.**

*ГВУЗ "Приднепровская государственная академия  
строительства и архитектуры"*

**Введение.** Выпуск валков с повышенными показателями качества является одной из приоритетных задач металлургического комплекса Украины. Эти валки обеспечивают повышение производительности прокатных станов, улучшение качества выпускаемых изделий, снижение потерь металла в виде брака, снижение расхода валкового металла.

В свою очередь сами критерии качества валков, в частности физико-механические свойства, во многом зависят от их химического состава, с учетом легирующих и модифицирующих элементов, скорости кристаллизации и режимов термообработки. Эти факторы, определяют тип и характер структуры валкового материала (стали – доэвтектоидная, эвтектоидная, заэвтектоидная или чугуна – белый, серый или промежуточный). Структура является главной характеристикой качества валков, поскольку ею определяются их механические (прочностные и пластические), физические и служебные свойства, включая коэффициент трения, термо- и износостойкость и др. [1].

Для исследования структуры металлов и сплавов и ее влияния на их свойства широко используются традиционные методы макро- и микроанализа, рентгеновского, спектрального, термического, а также дефектоскопии (рентгеновской, магнитной, ультразвуковой). Они имеют собственный порог чувствительности, зачастую узкую направленность и применяются непосредственно в зависимости от назначения объекта исследования (трубы, прокатные валки, металлоконструкции и т. д.). Математические модели для прогноза механических свойств металлических изделий основанные на анализе статистических данных, не дают физико-химической интерпретации процессам, которые происходят при формировании структуры или, которые могли бы однозначно учитывать влияние химического состава и других параметров технологии. Поэтому результаты прогноза не всегда могут удовлетворять предъявляемым требованиям.

Рассмотрим некоторые аспекты развития классических методик и моделей оценки качества металлических отливок, в частности чугунных и стальных прокатных валков, теоретические предпосылки получения валков с улучшенными свойствами, которые могут быть использованы при разработке и исследовании новых методик оперативной оценки их механических свойств (рис. 1).

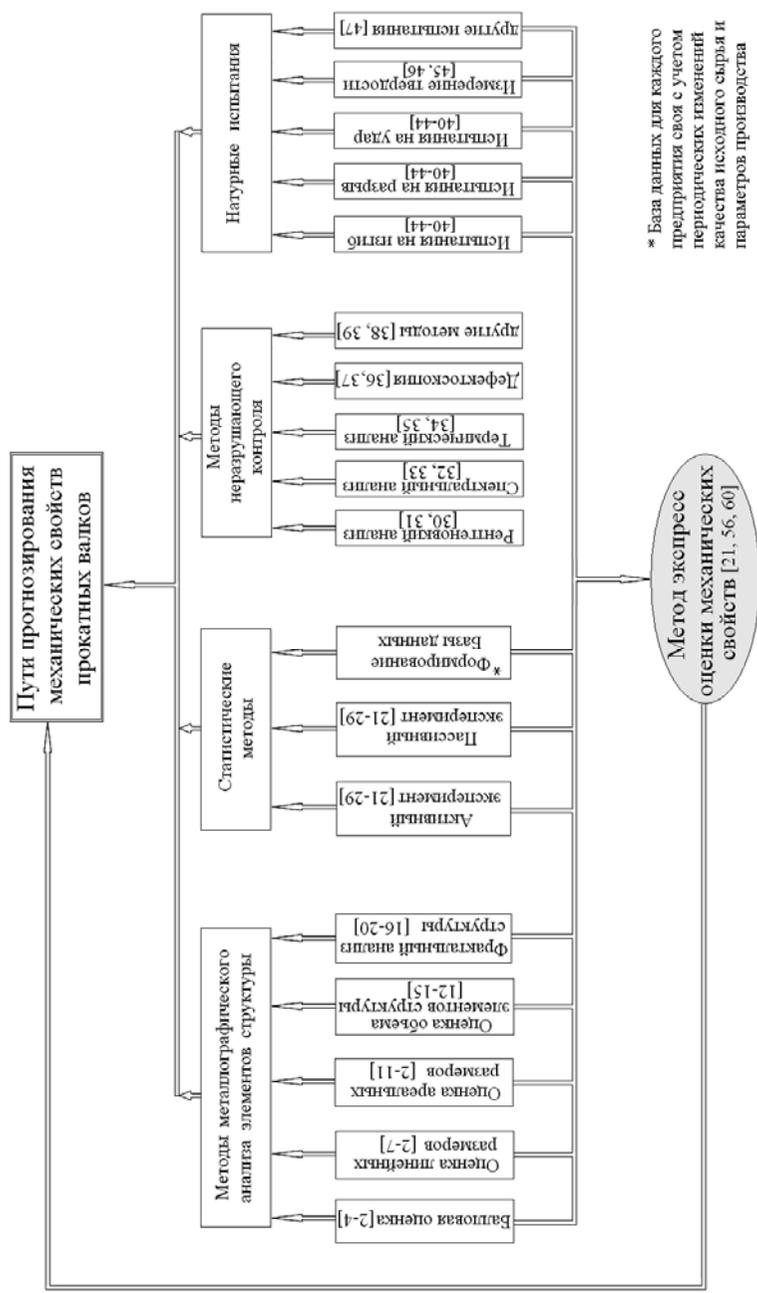


Рис. 1. Поиск путей прогнозирования механических свойств чугунных и стальных прокатных валков

**1. Анализ существующих методов оценки механических свойств валкового чугуна и стали с учетом влияния химического состава и структуры.** Структура материала предопределяет его свойства, но установить однозначное соответствие между ними невозможно, поскольку это представляется сложной задачей. Особенно остро эта задача стоит при установлении зависимости между структурой стальных и чугунных валков и их механическими свойствами. Структура характеризуется типом металлической матрицы, количеством и сложной формой избыточной фазы, но, кроме того, она изменяется по сечению и длине бочки, что определяется влиянием химического состава валков, тепловым сопротивлением литейной формы и режимом термической обработки [1; 22; 31; 40]. В силу многопараметричности технологии, учесть вклад всех параметров, влияющих на формирование структуры и свойств не представляется возможным.

Поэтому установить взаимосвязь между структурой материала металлических отливок, в частности стальных и чугунных прокатных валков, и механическими свойствами, можно не всегда однозначно и с определенной долей погрешности [1; 31].

Для оценки и прогноза служебных характеристик отливок с помощью неразрушающих методов контроля широко используются специальные структурные диаграммы и номограммы, основанные на анализе исходных параметров технологии и обеспечивающие получение в готовом изделии заданной структуры [48].

На протяжении длительного времени структура чугунных отливок определялась по известной диаграмме Маурера [42] в зависимости от содержания основных графитизирующих элементов в сплаве – углерода и кремния. Согласно данной диаграмме отливки кристаллизуются при средней скорости охлаждения, соответствующей отливкам с приведенным размером  $R = 12,5$  мм, где  $R$  соответствует половине толщины плоской отливки и четверти диаметра цилиндрической, а также одной шестой диаметра шара. Практика использования диаграммы Маурера показала, что она удовлетворительно согласуется с экспериментальными и производственными данными лишь при значениях углерода и кремния, характерных только для обычных марок серого чугуна (2,9...3,4 % С и 1,8...3,2 % Si). С целью учета влияния скорости затвердевания отливок, Грейнер и Клингенштейн [49] предложили свою диаграмму, на одной из осей которой откладывается толщина отливки, а на другой – сумма  $C + Si$ , которая, однако, больше пригодна для исследования процессов структурообразования, чем для оценки прогноза физико-механических свойств отливок.

На диаграмме Л. И. Какурина [42] границы между структурными областями описываются уравнением  $K_{гп} = C + Si + IgT$ . Одним из недостатков этой диаграммы является то, что в ней не учитывается вклад элементов структуры и элементов химического состава на механические свойства чугуна, кроме углерода и кремния.

В последующем диаграммы преобразовали в номограммы, и начали учитывать гораздо большее количество факторов, влияющих на процессы структурообразования в чугунах. Так, последние номограммы базируются не

только на результатах опытно-промышленных работ, но и на термодинамических расчетах. Наиболее прогрессивной является конодная структурная номограмма Снежного-Жукова [48], которая позволяет прогнозировать структуру графитизированных чугунов и оценивать их механические свойства.

Использование во многих структурных диаграммах и номограммах параметра степени насыщенности чугуна  $S_C$ , согласно данным работы [50], позволяет комплексно учитывать содержание всех основных компонентов:  $S_C = C/[4,3 - 0,312 \cdot Si - 0,33 \cdot P + 0,18 \cdot (Mn - 1,76 \cdot S)]$ , в отличие от многих традиционных диаграмм, учитывающих, обычно, только углерод, кремний и фосфор, например,  $S_C = C/[4,3 - \frac{1}{3} \cdot (Si + P)]$  или  $S_C = C/[4,3 - \frac{1}{3} \cdot Si + \frac{1}{2} \cdot P]$ . Однако

такой подход не предоставляет возможности оценивать влияние легирующих элементов (Cr, Ni, V, Mo и др.) на механические свойства отливок, в частности хромоникелевых или хромомолибденовых чугуновых сталей, а, соответственно, учитывать комплексное влияние химического состава на эти свойства.

Углеродный эквивалент  $C_{\Sigma} = \% C + 0,3 \cdot (\% Si)$  и близкий ему по физическому воздействию параметр  $S_C$  сравнительно хорошо отображают лишь обобщенное влияние углерода и кремния на механические свойства чугуна, в том числе на его твердость, но не на структуру, что снижает точность прогноза.

В настоящее время широко практикуется применение программных методов способствующих идентификации производственных процессов, что содействует оперативному контролю качества выпускаемой продукции. Применение компьютерного моделирования дает возможность получать модели, которые получены на основе термодинамических расчетов структурных номограмм. В работе [48] описана методика статистического анализа оценки взаимосвязи химсостава, структуры и свойств чугунов марок ВЧ35...ВЧ50 (ГОСТ 7293-85). Приведен пример использования метода в производственных условиях предприятия ЗАО «УК «БМЗ» (Россия) для построения эмпирической структурной диаграммы отливок из феррито-перлитных чугунов с шаровидным графитом (ЧШГ): втулок подшипника (рис. 2 а). Для ее построения использовались данные результатов больше 900 плавок, проведенных в чугунолитейном цехе данного предприятия. Использование срезов объемной диаграммы (рис. 2 б) позволяет определять количественный состав структурных составляющих в отливках из ЧШГ и прогнозировать их твердость (рис. 2 в) по полученному эмпирическим путем уравнению регрессии (1) с коэффициентом парной корреляции  $R^2 = 0,76$ :

$$HB = 64 + 2,24 \cdot Ц(\%) + 0,92 \cdot П(\%) + 0,2 \cdot Ф(\%), \quad (1)$$

где Ц, П, Ф – содержание цементита, перлита и феррита соответственно.

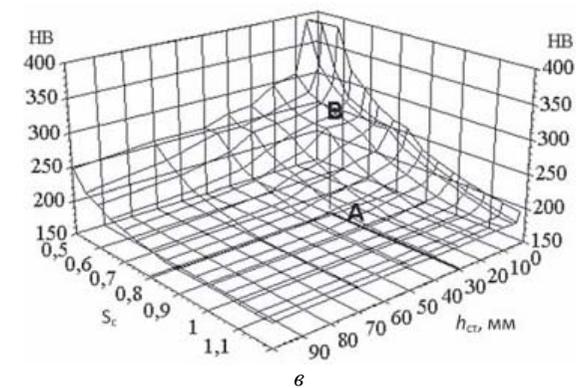
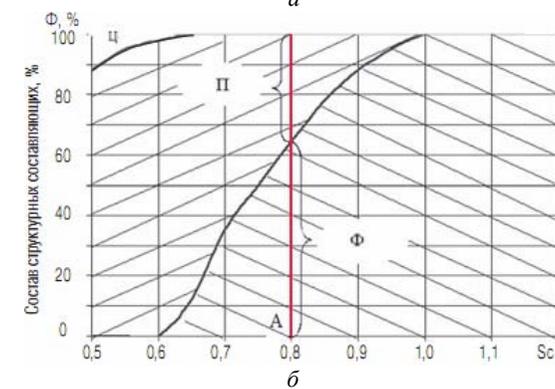
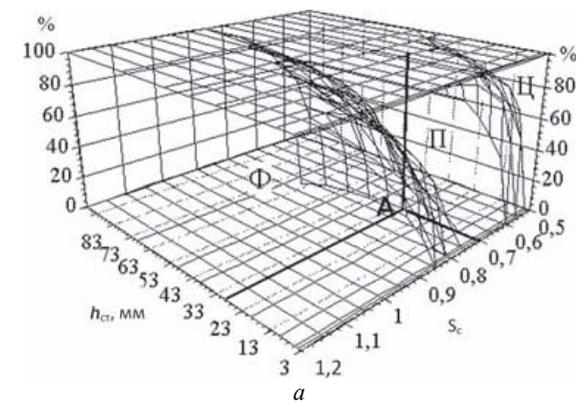


Рис. 2. Структурная диаграмма для отливок из ЧШГ: *a* – пространственная структурная диаграмма; *б* – плоскостная диаграмма для отливок с  $h_{ct} = 30$  мм и  $S_c = 0,7$  (точка А на рис. 1 *a*); *в* – прочностная диаграмма для определения твердости отливок из ЧШГ [48]

С помощью таких диаграмм можно решать две задачи: 1. Прогнозировать получение тех или иных структур в отливках из ЧШГ, заливаемых в сухие песчаные формы, по известным значениям ( $h_{ст}$ , C, Si, Mn, S, P), а также определять твердость отливок; 2. Для получения ранее заданных структур в отливках известных конфигураций (при известной преобладающей толщине стенки) рекомендовать химсостав. К сожалению, при построении таких диаграмм на базе факторов базовой плоскости для прочих прочностных и пластических механических характеристик ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta$ , KCU), данных оказалось недостаточно. Полученные для их расчета уравнения показали слабую корреляционную зависимость. На эти механические свойства большое влияние оказывает форма и размер включений графита (ВГ), которые не всегда точно идентифицируются в производственных условиях [48].

Другое направление компьютерного моделирования оценки взаимосвязи структуры и свойств графитизированных чугунов основано на использовании специализированных математических программ и представлении структуры чугуна как «композиционного» материала. При таком подходе отдельные структурные составляющие и фазы обладают собственными физическими и механическими свойствами, а структура чугуна представляется как композиция отдельных ее составляющих частей [51].

За рубежом широкую известность получила номограмма Кола [49], основанная на определении механических свойств и твердости по степени насыщенности  $S_c$ . Согласно этой номограммы прочность  $\sigma_B$ , твердость HB и модуль упругости  $E$  чугуна в отливке заданного сечения  $x$  рассчитываются в зависимости от прочности  $[\sigma]_{30}$  и твердости  $[HB]_{30}$  чугуна в стандартной пробе диаметром 30 мм, а также от толщины стенки  $T$ . В основу номограммы Кола положена зависимость:  $\lg[\sigma_B]_x = \lg[\sigma_B]_{30} + 157 \cdot (\lg[HB]_x - \lg[HB]_{30})$ . Такой подход не всегда целесообразно применять для оценки свойств массивных металлических отливок. Это связано с необходимостью отливки к ним стандартных проб, что в свою очередь приводит к дополнительным материально-временным затратам. К тому же, вырезка темплета, для проведения натуральных испытаний из тела отливки любой сложности или валка приведет к нарушению ее целостности.

Чем выше  $\sigma_B$ , тем обычно выше твердость. Очевидно, качество чугуна будет тем выше, чем выше прочность и чем ниже при этом твердость. В. Паттерсон предложил сравнивать между собой не фактические значения  $\sigma_B$  и HB, а относительные величины:

$$RG = \frac{\sigma_B}{980 - 785} \cdot S_c \quad \text{и} \quad RH = \frac{HB}{100 + 0,43 \cdot \sigma_B}.$$

Здесь величины в знаменателях представляют собой теоретическую (расчетную) прочность и твердость чугуна. Естественно надо стремиться к тому, чтобы фактическая прочность металла была больше теоретической, а фактическая твердость – ниже. Тогда показатель качества серого чугуна получает вид  $GZ = RG/RH$ .

В работе [52] было проведено статистическое исследование влияния на  $\sigma_B$ , твердость HB, глубину отбела стандартных проб следующих переменных

параметров: содержания C, Si, Mn, S и P, диаметра цилиндрических образцов, температуры заливки жидкого чугуна. Получены уравнения регрессии для нелегированного немодифицированного и модифицированного чугунов, а также для чугунов, легированных хромом, медью и ванадием.

Номограмма А. Ф. Ланды построена на основании следующих математических зависимостей [42]:

$$\begin{aligned} \% \text{ Si} &= \frac{6,3 - C_{\text{об}} - \lg T}{0,5 \cdot (C_{\text{св}} + K)}; \\ \sigma_{\text{в}} &= \frac{750 \cdot C_{\text{св}} + 400}{C_{\text{гр}} + 1}; \\ \% \text{ П} &= \frac{C_{\text{св}}}{0,8} \cdot 100; \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\text{П}$  – содержание перлита в %;  $T$  – толщина отливки в мм;  $C_{\text{об}} = C_{\text{св}} + C_{\text{гр}}$  – содержание углерода: общее, связанного и в виде графита соответственно;

константа графитизации  $K = 0,75 \cdot \left( \text{Si} - \frac{5}{3 \cdot (C/\text{Si} + 1)} \right)$ . Результаты вычислений

имеют удовлетворительную сходимость только для серых чугунов без учета влияния легирующих элементов, которые присутствуют в составе изделий ответственного назначения, в частности прокатных валков, и в значительной степени влияют на их свойства.

С учетом многообразия легирующих элементов и их сочетаний, а также способов модифицирования чугуна, построение достаточно простых номограмм для легированных и модифицированных чугунов затруднительно, что обусловлено их неоднозначным влиянием на структуру и, соответственно, механические свойства. Наиболее приемлемым в этом случае является расчет механических свойств на ЭВМ с использованием математического моделирования, например с применением статистической модели, составленной из соответствующих уравнений регрессии, полученных на основании обработки экспериментальных и статистических данных [42].

На уровень физико-механических и эксплуатационных свойств валкового материала в значительной степени влияет форма, количество и размеры графита. В работе [31] получены уравнения регрессии, описывающие влияние химического состава на формирование графита в высокоуглеродистых сплавах (приведены уравнения с максимальными среди полученных показателями парной корреляции  $R^2$ ):

Объемная доля содержания шаровидного графита  $\text{Ш}_{\text{г}}$  (%) в высокопрочном чугуне:

$$\text{Ш}_{\text{г}} = 0,07 + 26,7 \cdot \text{Mg} - \text{Mg}^2, \quad R^2 = 0,60.$$

Объемная доля содержания пластинчатого графита  $\text{П}_{\text{г}}$  (%) в хромоникелевом чугуне:

$$\text{П}_{\text{г}} = 5,5 + 0,004 \cdot \text{M} + 1,2 \cdot \text{C} + 5,4 \cdot \text{Mn} + 18,6 \cdot \text{S} - 3,7 \cdot \text{Cr} + 0,42 \cdot \text{Ni} \\ R^2 = 0,72.$$

Объемная доля содержания общего графита  $\Gamma_f$  (%) в заэвтектоидной низколегированной стали:

$$\Gamma_f = 13,7 - 4,8 \cdot C + 1,4 \cdot Mn - 76,2 \cdot S - 140,1 \cdot P + 3,2 \cdot Ni - 83,5 \cdot Ca + 458,7 \cdot Se$$

$$R^2 = 0,96,$$

где М – место отбора проб, 10±100 мм по диаметру валка.

В той же работе уровень механических свойств валкового чугуна рекомендуется оценивать по расчетной твердости НВ (3), определяемой по процентному содержанию структурных составляющих и показателей их микротвердости:

$$HB = \frac{\Psi \cdot H_{\Psi} + \Gamma \cdot H_{\Gamma} + \Pi \cdot H_{\Pi} + \Phi \cdot H_{\Phi}}{100}, \quad (3)$$

где  $\Psi, H_{\Psi}; \Gamma, H_{\Gamma}; \Pi, H_{\Pi}; \Phi, H_{\Phi}$  – содержание (%) и микротвердость цемента, графита, перлита, феррита соответственно.

Прогнозирование поведения высокоуглеродистых сплавов в процессе их эксплуатации неразрывно связано с определением основных факторов, от которых зависит уровень механических свойств и эксплуатационная стойкость материала – состав и структура. Например, для прогноза прочностных характеристик валков исполнения СШХН-41 на глубине 50 мм от поверхности бочки на Лутугинском заводе прокатных валков реализована математическая модель, представленная в виде уравнений регрессии [31]. Для предела прочности на разрыв коэффициенты парной корреляции находятся в пределах 0,48±0,59, на изгиб – 0,33±0,40, что свидетельствует о слабой корреляции между химическим составом-структурой-свойствами валков данной марки (4–11):

$$\sigma_B = 29 + 0,45 \cdot \Gamma - 74,9 \cdot Mg - 0,13 \cdot \Psi \quad R^2=0,48, \quad (4)$$

$$\sigma_B = 31,3 - 76,8 \cdot Mg - 0,16 \cdot \Psi \quad R^2=0,48, \quad (5)$$

$$\sigma_B = 30,5 - 54,7 \cdot Mg + 80,3 \cdot Mg^2 - 0,16 \cdot \Psi \quad R^2=0,49, \quad (6)$$

$$\sigma_B = 21,1 + 2,5 \cdot \Gamma_{\text{ш}} + 1,4 \cdot \Gamma_{\text{к}} - 1,8 \cdot \Gamma_{\text{пл}} + 2,5 \cdot \Gamma_{\text{т}} \quad R^2=0,49, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{изг}} = 39,9 - 44,9 \cdot Mg - 0,16 \cdot \Psi \quad R^2=0,33, \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{изг}} = 40,5 - 0,13 \cdot \Gamma - 45,4 \cdot Mg - 0,17 \cdot \Psi \quad R^2=0,33, \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{изг}} = 38,8 - 15,8 \cdot Mg + 106 \cdot Mg^2 - 0,14 \cdot \Psi \quad R^2=0,33, \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{изг}} = 32,9 - 1,6 \cdot \Gamma_{\text{ш}} + 0,53 \cdot \Gamma_{\text{к}} - 1,1 \cdot \Gamma_{\text{пл}} + 2 \cdot \Gamma_{\text{т}} \quad R^2=0,40, \quad (11)$$

где  $\Gamma$ ,  $\Gamma_{\text{ш}}$ ,  $\Gamma_{\text{к}}$ ,  $\Gamma_{\text{п}}$ ,  $\Gamma_{\text{т}}$  – общее содержание графита, количество шаровидного, компактного, пластинчатого, точечного соответственно;  $\text{Ц}$  – содержание цемента в %;  $\text{Mg}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$  – содержание в массовых % магния, хрома и никеля. Такая модель дает лишь предварительные оценки качества валкового материала, недостаточные для практического использования при приемодаточных работах. Наверное, это обусловлено тем, что не все параметры технологии (например, остальные элементы химического состава, структуры, толщина намазки формы валков и др.), в значительной степени влияющие на свойства, были учтены при составлении данной математической модели. В то же время для твердости установленные зависимости подтверждаются более высоким коэффициентом корреляции (12, 13):

$$\text{HB} = 325 - 26,1 \cdot \text{Si} + 26,8 \cdot \text{Cr} + 1,9 \cdot \text{Ni} - 253 \cdot \text{Mg} \quad R^2=0,60, \quad (12)$$

$$\text{HB} = 329 - 19 \cdot \text{Si} + 40,5 \cdot \text{Cr} + 0,15 \cdot \text{Ni} - 853 \cdot \text{Mg} + 2300 \cdot \text{Mg}^2 \quad R^2=0,68. \quad (13)$$

Зависимость твердости валков с гладкой бочкой производства ЛЗПВ исполнения СПХН-65 (уравнения 14, 15) от химического состава и расстояния от бочки валка представлена следующими уравнениями, имеющими более высокую сходимость с результатами экспериментов ( $R^2 = 0,54 \div 0,88$ ):

$$\text{HB} = 340,8 - 0,11 \cdot M + 310,6 \cdot S - 368,2 \cdot P + 53,5 \cdot \text{Cr} + 12,3 \cdot \text{Ni} \quad R^2=0,54, \quad (14)$$

$$\text{HB} = 1365,7 - 46,3 \cdot \ln M + 126,4 \cdot C - 313,8 \cdot \text{Mn} - 212,3 \cdot \text{Si} - 657,2 \cdot P + 296,8 \cdot \text{Cr} - 27,3 \cdot \text{Ni} \quad R^2=0,88, \quad (15)$$

где  $M$  – расстояние от поверхности валка, мм.

Следует отметить, что точность прогноза твердости бочки валка по сечению согласно данным экспериментов [1; 31; 40] зависит не от места ее замеров на бочке, а от количества параметров и правильности их выбора в зависимости от степени влияния:

для валков исполнения СПХН-45 с литыми ручьями на глубине 20 мм от поверхности бочки:

$$\text{HB} = 346 - 19,6 \cdot C - 93,2 \cdot \text{Si} - 59,5 \cdot S + 97,3 \cdot P + 184,9 \cdot \text{Cr} - 13,4 \cdot \text{Ni} \quad R^2=0,52, \quad (16)$$

$$\text{на глубине 50 мм} \quad \text{HB} = 381 - 36,4 \cdot \text{Si} - 104,6 \cdot \text{Si} + 371,9 \cdot P + 159,6 \cdot \text{Cr} - 14,3 \cdot \text{Ni}, \quad R^2=0,52, \quad (17)$$

$$\text{на глубине 75 мм} \quad \text{HB} = 329,8 - 24,6 \cdot C - 84,1 \cdot \text{Si} + 227,7 \cdot P + 162,2 \cdot \text{Cr} - 23,1 \cdot \text{Ni} \quad R^2=0,56, \quad (18)$$

$$\text{на глубине 100 мм} \quad \text{HB} = 268 - 24,6 \cdot C - 77 \cdot \text{Si} + 52,5 \cdot S + 244,8 \cdot P + 131 \cdot \text{Cr} - 13,6 \cdot \text{Ni} \quad R^2=0,52, \quad (19)$$

или уравнение с меньшим количеством параметров, но и с меньшей точностью прогноза (без учета влияния углерода и никеля):

$$\text{HB} = 32,3 + 0,007 \cdot D - 13,9 \cdot \text{Mn} - 34,8 \cdot S - 68,6 \cdot P + 15,5 \cdot \text{Cr} \quad R^2=0,26, \quad (20)$$

где  $D$  – диаметр бочки валка, в мм.

Аналогичная картина точности оценки твердости на основании уравнений прогноза наблюдается для валков производства Днепропетровского завода прокатных валков (ДЗПВ) [31]. В полученных уравнениях в качестве функции цели выступает твердость валков, а в качестве аргументов – количественные показатели элементов их химического состава. Коэффициенты корреляции для листовых валков исполнения ЛШ-57 составили 0,24, для сортовых и трубных валков исполнения СШХНМ-41 – 0,32, СШХН-41 – 0,32÷0,48, СШХН-44 – 0,49, СШХНМ-44 – 0,67, СШХНМ-45 – 0,67÷0,82; СШХНМ-48 – 0,57÷0,69.

Путем регрессионного анализа 50 плавок валкового чугуна (300 т) в работе [53] определена зависимость между химическим составом и твердостью отбеленного чугуна HSD:

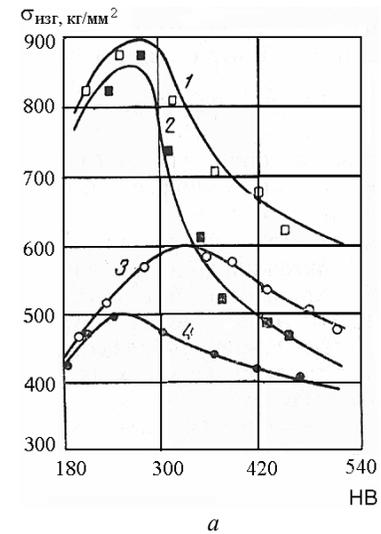
$$\text{HSD} = 69,2 - 16,0 \cdot \text{Si} + 0,5 \cdot \text{P} + 3,6 \cdot \text{Cr} + 2,5 \cdot \text{Ni} \quad R^2=0,84. \quad (21)$$

На основании анализа полученных результатов установлено, что большее количество хрома имеет более благоприятное влияние на структуру, чем примесь никеля. Целесообразно понижать количество никеля в чугуне < 0,59 %, при концентрации хрома 0,25...0,75 %. Согласно А. Е. Кривошееву [1] твердость чугуновых валков с содержанием никеля ~ 0,8 % определяется следующим соотношением:

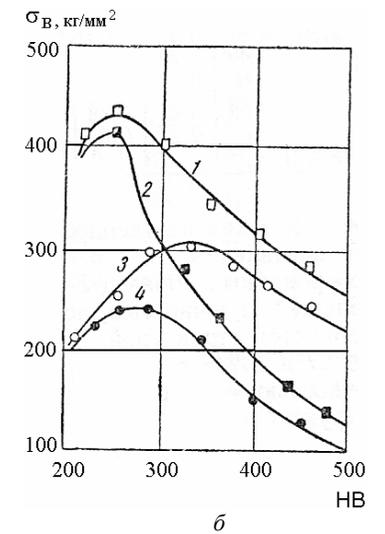
$$\text{HB} = (200 - 50 \cdot d) \cdot C_{\text{св}}^{0,8} + 70 \cdot C_{\text{св}}^{-0,33} \cdot (3,8 - C_{\text{общ}}), \quad (22)$$

где  $d$  – диаметр валка в м;  $C_{\text{св}}$  – количество связанного углерода;  $C$  – общее содержание углерода.

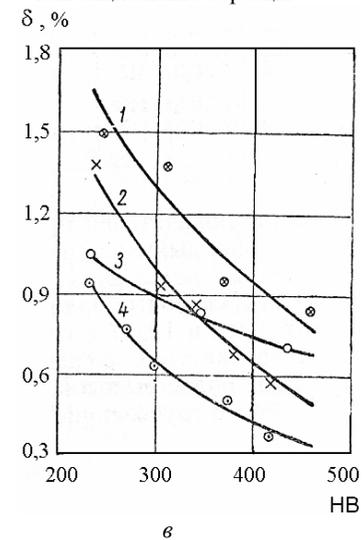
Согласно действующим ГОСТам и ТУ, отбраковка готовых изделий, в частности прокатных валков, проводится по следующим характеристикам: химическому составу, твердости и глубине отбеленного слоя (для валков марок ЛПХНМд, ЛПМ, ЛП, ЛШ, СП, ТП, СПНД с отбелом). Однако перечисленных характеристик для оценки качества прокатных валков при современных требованиях заказчика на свойства явно недостаточно. К сожалению, существующие способы оценки механических свойств легированных валков неразрушающими методами дают результаты, часто расходящиеся с механическими испытаниями. Это хорошо подтверждается на примере валков, изготовленных из хромоникелевого и высокопрочного чугунов. Статистическая обработка результатов натуральных испытаний показала, что твердость практически не коррелирует со значениями прочности при разрыве и изгибе. Коэффициент корреляции в полученных уравнениях регрессии не превышал 0,2 [31]. Эти факты подтверждаются в работе [1] при рассмотрении данных о механических свойствах для 63 плавочных проб стальных нелегированных валков Днепропетровского завода металлургического оборудования (ДЗМО) и Серовского завода, а также 198 образцов чугуновых валков производства ДЗПВ. На рисунке 3 приведены результаты натуральных испытаний образцов валкового чугуна производства ДЗПВ, вырезанных в радиальном и тангенциальном направлениях [1].



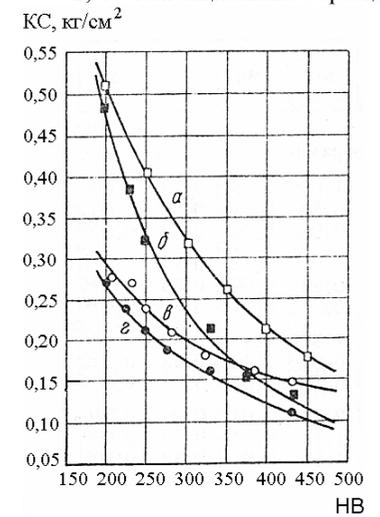
1, 3 – радиальные образцы;  
2, 4 – тангенциальные образцы



1, 3 – радиальные образцы;  
2, 4 – тангенциальные образцы



1, 3 – радиальные образцы;  
2, 4 – тангенциальные образцы



а, б – радиальные образцы;  
в, г – тангенциальные образцы

Рис. 3. Зависимость средних значений временного сопротивления изгибу (а), временного сопротивления разрыву (б), удлинения (в) и ударной вязкости (г) от твердости немодифицированного чугуна (3, 4) и модифицированного магнием чугуна (1, 2)

Прочность на разрыв и изгиб для модифицированного магнием чугуна не достигает своих максимальных значений и начинает падать при показателях твердости порядка 250÷280 единиц по Бринеллю, для валков из немодифицированного чугуна – порядка 300÷350. Показатели относительного удлинения и ударной вязкости монотонно убывают по экспоненциальному закону, что свидетельствует о согласованности этих показателей с твердостью.

Дальнейшее снижение механической прочности обусловлено увеличением белой составляющей (карбидов в виде цементита), благоприятным влиянием пониженного содержания фосфора и повышенного содержания никеля в исследуемых валках. Модифицирование магнием и другими элементами, способствующее образованию шаровидных включений графита, сопровождается довольно значительным повышением прочности валковых чугунов. В точках экстремума для валков, изготовленных из модифицированного магнием чугуна, показатели предела прочности на изгиб достигают 900 МПа (кривая 1) и 850 МПа (кривая 2); на разрыв – 430 МПа (кривая 1) и 410 МПа (кривая 2) для валков, изготовленных из немодифицированного чугуна, показатели прочности на изгиб достигают ~ 600 МПа (кривая 3) и кривая (4), на разрыв ~ 310 МПа (кривая 3) и 240 МПа (кривая 4).

Исследования свидетельствуют о снижении пластических свойств: относительного удлинения  $\delta$  и сужения  $\psi$ , а также ударной вязкости  $a_K$  при увеличении содержания углерода, как для стального, так и для чугунного валкового материала [1; 21; 31; 40–42; 50; 54].

Для стальных валков, как известно, твердость и механическая прочность возрастают до достижения 0,8÷0,9 % содержания в них углерода, а затем прочностные характеристики падают при дальнейшем повышении твердости, что связано со структурными изменениями: появлением избыточных карбидов в виде цементитной сетки. В этом случае для повышения прочности необходимо провести сфероидизирующий отжиг, что позволит добиться сфероидизации избыточных и части эвтектоидных карбидов. Влияние химического состава и структуры на уровне свойств заэвтектоидных сталей до термической обработки приведено в виде выборки следующих зависимостей (23–27), полученных на основании многочисленных экспериментов в производственных условиях и статистических данных [31].

1. Низколегированная заэвтектоидная сталь:

$$H_{\text{расч}} = 255 + 21 \cdot \text{Mn} - 19,4 \cdot \text{Si} - 1826 \cdot \text{S} + 63,9 \cdot \text{Cr} + 50,6 \cdot \text{Ni} + 15,5 \cdot \text{Cu} + 34,3 \cdot \text{Mo} + 550 \cdot \text{Ca} - 199 \cdot \text{Ce} - 42,7 \cdot C_{\text{ГР}} + 0,21 \cdot D^2 \quad R^2=0,73, \quad (23)$$

$$\sigma_{\text{изг}} = 100,6 - 4 \cdot C - 4,1 \cdot \text{Mn} + 4,1 \cdot \text{Si} - 0,189 \cdot \text{S} - 40,1 \cdot P - 9,3 \cdot \text{Cr} - 8,2 \cdot \text{Ni} + 7,8 \cdot \text{Mo} - 126,6 \cdot \text{Ca} + 161,3 \cdot \text{Ce} + 8,1 \cdot C_{\text{ГР}} - 217,8 \cdot \text{N} - 0,09 \cdot D \quad R^2=0,76, \quad (24)$$

$$K_C = 0,17 - 0,12 \cdot C + 0,05 \cdot \text{Cu} + 0,19 \cdot \text{V} + 2,7 \cdot \text{Ca} - 3,5 \cdot \text{Ce} - 0,17 \cdot C_{\text{ГР}} + 0,03D \quad R^2=0,92, \quad (25)$$

$$\sigma_B = 52,3 - 0,41 \cdot Ц - 0,41 \cdot Г^2 \quad R^2=0,36, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \sigma_B = & 99,5 - 5,7 \cdot Mn + 12,5 \cdot Si - 231 \cdot S - 1329 \cdot P - 24,7 \cdot Cr + \\ & + 10,1 \cdot Ni - 89 \cdot Cu + 9,7 \cdot Mo - 477 \cdot Ca + 725 \cdot Ce + 8,4 \cdot C_{гр} - \\ & - 602 \cdot N - 0,08 \cdot Д \quad R^2=0,68. \quad (27) \end{aligned}$$

2. Для литой графитизированной стали реализована система из 28 уравнений, часть из которых приведено ниже (28–31). Диапазон сходимости данных механических испытаний с результатами, полученными с помощью уравнений, следующий:  $H_{расч} - 0,62 \div 0,92$ ,  $\sigma_{изг} - 0,33 \div 0,89$ ,  $\sigma_B - 0,49 \div 0,95$ , для ударной вязкости КС коэффициент парной корреляции составляет порядка 0,69.

$$\begin{aligned} H_{расч} = & 146,7 + 30 \cdot Mn - 606 \cdot Si + 78,1 \cdot P + 56,2 \cdot Ni - \\ & - 89,6 \cdot Mo + 929 \cdot B + 0,96 \cdot Д \quad R^2=0,92, \quad (28) \end{aligned}$$

$$\sigma_{изг} = 42,1 - 27 \cdot C_{гр} + 0,09 \cdot H_{расч} \quad R^2=0,35, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} КС = & 1,3 - 0,57 \cdot C - 0,3 \cdot Mn - 21,3 \cdot S - 0,19 \cdot Ni + 1,8 \cdot Ti + \\ & + 0,003 \cdot Д \quad R^2=0,69, \quad (30) \end{aligned}$$

$$\sigma_B = -11,2 - 32 \cdot C_{гр} + 0,25 \cdot H_{расч} \quad R^2=0,64, \quad (31)$$

где  $Д$  – диаметр отливки изменяется от 110 мм до 260 мм;  $H_{расч}$  – микротвердость перлита оцененная при  $P = 50$  г; Ц и Г – содержание цементита и графита в % соответственно;  $C_{гр}$  – содержание свободного углерода в виде выделений графита.

Точность результатов, полученных с помощью уравнений и натуральных испытаний, обусловлен количеством выбранных параметров, диапазоном их численных значений и степенью влияния того или иного компонента на конкретный показатель качества.

Большой разницей в механических свойствах наблюдается также для легированных стальных валков, имеющих эвтектоидную или близкую к ним структуру: от 830 МПа до 1 020 МПа. Основная причина разной степени прочности этих валков, хотя и отлитых в одинаковых условиях, состоит в том, что у них различная степень гомогенизации и измельчения зерна, объясняемая некоторыми отклонениями, имевшими место в процессе их термической обработки [1; 31; 40].

Остальные параметры технологии производства валков также оказывают значительное влияние на их свойства. На механические свойства влияет способ отливки валков: литье в песчаную форму, в металлическую (кокиль), вида литья – центробежное и др. К примеру, толщина слоя теплоизоляции, представляющей собой литейную краску или намазку, оказывает очень большое влияние на структуру и твердость рабочего слоя бочек, на характер изме-

нения физико-механических свойств чугуна по сечению валков. В этой связи существует множество графиков, отражающих связь между твердостью валков и упомянутыми выше параметрами, и уравнения регрессии, их описывающие. Полученные закономерности, приводятся в виде статистических моделей, описывающих совместное влияние на твердость химического состава, представленное в виде параметра  $K$ , толщины намазки сегментов по выступам формы –  $T_n$ , мм, расстояния от поверхности углублений ручьев валка до места определения твердости –  $x$ , мм.

Результаты экспериментов показывают, что изменение толщины намазки является весьма эффективным средством регулирования интенсивности уменьшения твердости по глубине валков. В качестве примера приведены зависимости (32–34), описывающие влияние на твердость данных технологических параметров для валков, отлитых в песчаные формы с применением сегментных кокилей [1]:

1. Применительно к опытным данным для хромоникелевых валков с параметром химического состава  $K = 3,0 \div 3,1$ :

$$HB = \left( 194 + \frac{116 - 1,5 \cdot T_n}{2,0} \right) \cdot \left( 0,95 + \frac{8,5 + 1,5 \cdot T_n}{11,5 \cdot T_n + 3,45 + 0,9 \cdot x} \right) - 2 \cdot T_n^{0,5}. \quad (32)$$

2. Для валков из хромоникелевого чугуна, модифицированного магнием с параметром химического состава  $K = 2,25$ :

$$HB = \left( 244 + \frac{116 - 1,5 \cdot T_n}{1,2} \right) \cdot \left( 0,95 + \frac{8,5 + 1,5 \cdot T_n}{11,5 \cdot T_n + 3,45 + 0,9 \cdot x} \right) - 1,46 \cdot T_n. \quad (33)$$

3. Применительно к валкам, отливаемым из ваграночного чугуна в кокилях с намазкой в 10 мм:

$$HB = \left( 220 + \frac{3 - (K - 2,5)}{0,055} \right) \cdot \left( 0,95 + \frac{5,6}{19,5 + 0,424 \cdot x} \right) - 0,1 \cdot x^{0,5}. \quad (34)$$

Подобных закономерностей, описанных как в отечественной, так и в зарубежной литературе множество, и учесть их в рамках настоящего обзора невозможно. Все эти аспекты свидетельствуют о многопараметричности технологии производства чугунных и стальных прокатных валков. При этом, сложность оценки механических свойств с помощью неразрушающих и других методов их определения диктует разработку такого метода, который бы позволял при допустимо минимальных затратах определять эти свойства.

В последнее время для расчета и прогнозирования процессов структурообразования и формирования свойств металла чугунных отливок широко используются физические методы исследования кристаллизующегося сплава (термография, запись кривых усадки чугуна и т. п.). Особо перспективен метод фиксации электросопротивления сплава во время затвердевания и охлаждения отливок [55]. Разработанная методика нашла практическое применение на Подольском механическом заводе для экспресс-анализа чугуна на склонность к графитизации. Прибор, созданный на основании полученных закономерностей в течение короткого промежутка времени (~ минуты), необходимого для полной кристаллизации пробы чугуна, выдает результат, кото-

рый может быть оперативно использован для корректировки химического состава выплавляемого чугуна и для изменения дозировки присаживаемого в жидкий металл модификатора, однако без учета влияния определяемых параметров на качественные характеристики металла.

Анализ приведенных выше результатов объясняет допустимую корреляцию показателей твердости с химическим составом, структурой и другими характеристиками технологического процесса благодаря, выявленному в большинстве случаев, линейному характеру ее изменения (возрастанию или снижению) в зависимости от воздействия того или иного параметра, что подтверждается приведенными выше уравнениями (1, 3, 12–23, 27, 32–34). И наоборот – нелинейное поведение прочностных характеристик стальных и чугунных прокатных валков, как функции от множества рассмотренных технологических параметров, и наличие точек экстремума для этих же характеристик валков свидетельствует об определенных сложностях и, как следствие, невысокой точности прогноза (2, 4–11, 24–27, 29–31) в зависимости от выбранных пределов изменения численных значений параметров.

В силу многокритериальности и многопараметричности технологии производства стальных и чугунных валков, и исходя из анализа полученных результатов, можно предположить, что одним из путей оценки и прогноза их механических характеристик является создание экспресс-методики, основанной на математической модели и представленной в виде уравнений отдельно для каждой марки исследуемого металла. Именно такой дифференцированный подход может обеспечить более высокую точность прогноза механических свойств валков благодаря выбору более узкого диапазона изменения параметров технологии и с учетом их степени влияния на конкретно исследуемое свойство.

**2. Особенности оценки механических свойств прокатных валков.** Материал валков почти не подвергается механическим испытаниям на прочность. При испытании чугунных валков ограничиваются измерением твердости на поверхности бочки согласно ТУ У 14-2-1188-97, а механическая прочность стальных валков оценивается по результатам испытаний только проб, отливаемых отдельно или в виде приливов к валкам. Такие испытания не дают достаточно полного представления о механической прочности материала собственно валков. Как отмечалось выше, механическая прочность одного и того же материала, в частности чугунного вала, различна по его сечению, поэтому точного суждения о прочности вала по отдельной пробе составить нельзя. Кроме этого, существенное влияние на результаты испытаний оказывает направление усилия, вызывающего разрушение, по отношению к направлению столбчатых кристаллов в структуре вала [1; 31; 40].

Для получения удовлетворительных данных о механической прочности валкового материала целесообразно испытывать пробы, вырезаемые из различных мест тела вала в радиальном  $a$ , и тангенциальном  $b$  направлениях. Такие пробы можно вырезать из валков в процессе их первичной механической обработки и последующей калибровки. По условиям отбора этих проб, оказалось целесообразным принять для испытания механической прочности

образцы небольшого размера. Сопротивление изгибу и ударная вязкость определяются на образцах  $10 \times 10 \times 6$  мм, сопротивление разрыву – на образцах диаметром 6 мм, при расчетной длине 36 мм.

Одной из главных характеристик валков является твердость рабочего слоя, регламентируемая техническими условиями на поставку валков. Твердость определяют на поверхности бочки и в глубине рабочего слоя. Для испытания твердости и проверки микроструктуры на глубину рабочего слоя бочку отливали на 50 мм длиннее заданного размера. Из этого припуска при обработке валков на станке отрезались кольца, от которых отбирались темплеты для лабораторных испытаний. С целью устранения неровностей и ризок испытываемая поверхность поддается шлифовке.

**3. Предпосылки разработки методики экспресс оценки механических свойств прокатных валков.** Литературный обзор рассмотренных существующих традиционных и новых методик оценки физико-механических свойств металлических отливок свидетельствует о том, что все они имеют узкую специфику использования, учитывают влияние на свойства лишь отдельных параметров технологии, основаны, в основном, на статистических данных. На сегодняшний день они дают удовлетворительный, частично расходящийся с требованиями заказчика, прогноз свойств, и применять их непосредственно для экспресс-оценки механических свойств чугунных и стальных прокатных валков не целесообразно. При этом улучшение комплекса механических свойств валков за счет их оперативного определения в процессе производства – трудоемкая, длительная и дорогостоящая задача, совершенствование которой, по мнению автора, должно идти по пути создания экспресс-метода для их определения. Об этом свидетельствует ряд фундаментальных работ по теории и практике получения высококачественных отливок из высокоуглеродистых сплавов.

В этой связи, предпосылкой разработки является исследование новых методик с учетом влияния наиболее значимых параметров влияющих на формирование структуры. Очевидно, что параметры сильно взаимосвязаны между собой, и часть их может изменяться в широком диапазоне, что приводит к изменению критериев качества. С учетом многокритериальности и многопараметричности технологии, исследования должны быть основаны на анализе причинно-следственных связей и отношений параметров, что делает возможным получение результатов, согласующиеся с натурными экспериментами. Такой подход позволяет осуществлять прогнозирование и корректировку механических свойств валков в процессе их производства.

В этой связи, в работе изучается возможность применения теории мультифракталов [16; 20; 56–60] для количественной оценки структуры и механических свойств металлов вообще и чугуна в частности. При этом, реализовать детерминированный метод оценки механических свойств валков, основанный на анализе параметров, не представляется возможным, вследствие многокритериальности технологии.

Названные причины инициированы следующими условиями:

- невозможность проведения натуральных испытаний на готовом изделии, т. к. это приводит к нарушению его целостности;

- в силу многопараметричности технологии производства отсутствует возможность реализации детерминированного метода оценки механических свойств валков;

- трудности, связанные с оперативной информацией по свойствам в виду продолжительности основного цикла технологического процесса их производства (от нескольких часов до трех суток);

- условия эксплуатации валков<sup>1</sup> диктуют повышенные требования от заказчика на комплекс служебных характеристик;

- расширение сортамента выпускаемых прокатных стальных и чугунных валков;

- усовершенствование технологии производства<sup>2</sup> прокатных валков.

К ряду субъективных причин, диктующих создание экспресс-методики, относятся:

- необходимость наличия дорогостоящего оборудования<sup>3</sup> для исследования структуры и механических свойств на большинстве металлургических предприятий Украины в силу экономических причин;

- требования заказчика на получение валков с улучшенным комплексом физико-механических свойств, что приводит к дополнительным материально-временным расходам, необходимым для практической реализации этой задачи;

- отсутствие нормативных документов на механические свойства прокатных стальных и чугунных валков, за исключением допуска на твердость бочки валков согласно ТУ У 14-2-1188-97;

- неточность статистических данных по механическим свойствам различных марок валков, что объясняется отсутствием единой статистической базы;

- низкий коэф. корреляции формальных уравнений в рассмотренных моделях, включенных в состав методик.

## ВЫВОДЫ

Проведен детальный анализ литературных источников, описывающих современное состояние дел при оценке механических свойств прокатных стальных и чугунных валков с помощью методов неразрушающего контроля.

Применение этих методов для данной технологии мало эффективно, так как они, как правило, основываются на способах, в большинстве своем, бази-

---

<sup>1</sup>. Резкий нагрев, охлаждение и трение в рабочем поверхностном слое, большие удельные давления и напряжения от изгиба и кручения и другие факторы.

<sup>2</sup>. Методы центробежного литья, различные способы изготовления многослойных валков, модернизация способов легирования и модифицирования.

<sup>3</sup>. Электронный микроскоп, рентгеновская установка, машины для испытания на разрыв, удар и др.

рующихся на балловых, вербальных оценках, которые, как правило, генерируются экспертами, исходя из их опыта работы. Эти оценки слабо поддаются детерминированному анализу и формализации, базирующемуся на причинно-следственных связях.

Главный вывод, который можно сделать из аналитического обзора заключается в том, что существующие модели и способы оценки механических свойств прокатных валков с помощью неразрушающих методов контроля дают результаты прогноза, которые не всегда могут удовлетворять предъявляемым требованиям. Одним из выходов по решению проблемы оценки механических свойств металлических валков является разработка и исследование экспресс-методики для оперативного определения этих свойств, реализация которой в заводских условиях позволит добиться улучшения параметров технологии.

Учитывая выше изложенное, актуальность настоящей работы заключается в необходимости разработки методики, позволяющей в допустимые для пользователя сроки, осуществлять прогнозирование и корректировку механических свойств валков. Она должна быть основана на анализе влияния на механические свойства химического состава, структуры и технологии производства валков. Эта методика, в качестве основного элемента должна включать часть, способствующую получению оперативной информации о механических свойствах валков, получаемую в процессе их производства [21; 59; 60]. Множество публикаций, по данной тематике, свидетельствует об успешном применении теории мультифракталов для качественного и количественного анализа структуры и способствует более точному прогнозированию указанных критериев качества.

Реализация такого подхода позволит не только проводить экспресс-оценку механических свойств исследуемых марок валков в условиях их производства, но также определять химический состав и подбирать остальные технологические параметры на предпроектной стадии изготовления с целью получения валков с улучшенным комплексом механических характеристик.

На основании выше сказанного разрабатываемая методика экспресс-оценки механических свойств, для стальных и чугунных валков должна включать в себя:

1. Анализ теоретических основ необходимых для создания методики экспресс-оценки механических свойств прокатных валков.
2. Определение рабочей области параметров технологии и ее формализация.
3. Определение частей рабочей области с улучшенными механическими свойствами валков.
4. Установление области субкомпромисса критериев, отображающих механические свойства прокатных валков.
5. Исследование степени влияния элементов химического состава валков на их механические свойства.
6. Применение теории мультифракталов для корректирования оценок структуры и механических свойств валков.

7. Формализованное описание соотношений между химическим составом, структурой и механическими свойствами валков до и после термической обработки.
8. Внедрение метода экспресс оценки механических свойств рабочей зоны бочек, тремов прокатных валков.

#### Литература

1. Кривошеев А. Е. Литые валки / А. Е. Кривошеев // Теоретические и технологические основы производства. – М. : Metallurgizdat, 1957. – 360 с.
2. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – М. : Государственный Комитет СССР по стандартам, 14 с.
3. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М. : Metallurgiya, 1976. – 270 с.
4. Чернявский К. С. Стереология в металловедении / К. С. Чернявский. – М. : Metallurgiya, 1977. – 280 с.
5. Бленк Дж. Р. Количественная металлография / Дж. Р. Бленк, Т. Гледман // Приборы и методы физического металловедения. – М. : Мир, 1973. – Вып. 1. – С. 277–331.
6. Бунин К. П. Основы металлографии чугуна / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран. – М. : Metallurgiya, 1969. – 416 с.
7. Грабский М. В. Структура границ зерен в металлах / М. В. Грабский. – М. : Metallurgiya, 1972. – 160 с.
8. Софуэ. М. Влияние параметров микроструктуры на усталостную прочность литейного чугуна с шаровидным графитом / М. Софуэ и др. // Имоно, 1981. – № 11. – С. 53.
9. Богачев И. Н. Металлография чугуна / И. Н. Богачев. – М. : Metallurgizdat, 1962. – 392 с.
10. Бунин К. П. Строение чугуна / К. П. Бунин, Ю. Н. Таран. – М. : Metallurgiya, 1972. – 160 с.
11. Лозинский М. Г. Высокотемпературная металлография / М. Г. Лозинский. – М. : Машгиз, 1956. – С. 39–60.
12. Шабер О. Растровая электронная микроскопия // Приборы и методы физического металловедения: Пер. с англ. – М. : Мир, 1973. – Вып. 2. – С. 65–130.
13. Иванова В. С. Количественная фрактография / В. С. Иванова, А. А. Шанявский. – Челябинск : Metallurgiya, 1988. – С. 110–189.
14. Underwood E. Quantitative stereology. Addison-Wesley, 1970.
15. Quantitative Microscopy (Ed. By DeHoff R.T. and Rhines F.N.). McGraw-Hill, New York, 1968.
16. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – М. : Мир, 1991. – 254 с.
17. Большаков В. И. Фракталы в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. Под ред. д. т. н., проф. В. И. Большакова. – Днвск : ПГАСА, 2006. – 253 с.
18. Большаков В. И. Об оценке применимости языка фрактальной геометрии для описания качественных трансформаций материалов / В. И. Большаков,

- Ю. И. Дубров // ДАН Украины. – № 4. – 2002. – С.116–121.
19. Иванова В. С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – М. : Наука, 1994. – 383с.
20. Волчук В. Н. Разработка и исследование метода определения качественных характеристик металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.02.01 / Волчук Владимир Николаевич. – Дн-вск, 2003. – 114 с.
21. Большаков В. И. Этапы ідентифікації багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник НАНУ. – К., 2013. – № 8. – С. 66–72.
22. Иванова Л. Х. Разработка технологических способов снижения напряжений в чугунных валках и повышения их прочности: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.02.01 / Иванова Л. Х. – Дн-вск, 1984. – 289 с.
23. Кривошеев А. Е. Основы научных исследований / А. Е. Кривошеев, Г. Е. Белай, Г. Ш. Кирия, О. Н. Руднев, О. В. Соценко. – Киев-Донецк : Вища школа, 1979. – 168 с.
24. Дубров Ю. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении / Ю. И. Дубров, В. Н. Волчук, В. И. Большаков // Моделирование и оптимизация в материаловедении: матер. к 40 междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса : АстроПринт, 2001. – С. 25–26.
25. Кнотек М. Анализ металлургических процессов методами математической статистики / М. Кнотек, Р. Войта, И. Шефи. – М. : Металлургия, 1967.
26. Белай Г. Е. Организация металлургического эксперимента / Г. Е. Белай, В. В. Дембовский, О. В. Соценко. – М. : Металлургия, 1993. – 256 с.
27. Большаков В. И. Композиция метода планирования экстремальных экспериментов и экспертной информации для формирования системы прогноза качества материалов / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Л. Н. Дейнеко, Ю. И. Дубров // Перспективные задачи инженерной науки. – Вып. 2. Под общ. ред. акад. МИА, д. т. н., проф. В. И. Большакова. – Днепропетровск : GAUDEAMUS, 2001 – С. 203–208.
28. Спирин Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н. А. Спирин, В. В. Лавров.– Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.– 257 с.
29. Большаков В. И. Пути решения задач идентификации качественных характеристик материалов на основе экспертных систем / В. И. Большаков, Ю. И. Дубров, А. Н. Ткаченко, В. А. Ткаченко //Доповіді НАН України. – 2006. – № 4. – С. 97–102.
30. Горелик С. С. Рентгенографический и электроннооптический анализ / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – М. : Металлургия, 1970. – 366 с.
31. Скобло Т. С. Прокатные валки из высокоуглеродистых сталей / Т. С. Скобло, Н. М. Воронцов, Н. А. Будагьянц и др. – М. : Металлургия, 1994. – 336 с.

32. Буравлев Ю. М. Спектральный анализ металлов и сплавов / Ю. М. Буравлев, Н. К. Рудневский, И. А. Грикит. – К. : Техніка, 1976. – 192 с.
33. ГОСТ 27611-88. Метод фотоэлектрического спектрального анализа. – М. : Государственный Комитет СССР по стандартам, 1988. – 9 с.
34. Агеев Н. В. Термический анализ металлов и сплавов / Н. В. Агеев, Д. Н. Шойхет. – Л. : Гостехиздат, 1936. – 182 с.
35. Журавлев Л. Г. Физические методы исследования металлов и сплавов / Л. Г. Журавлев, В. И. Филатов. – Челябинск : ЮУрГУ, 2004. – 157 с.
36. Воронкова Л. В. Контроль чугуновых отливок ультразвуком / Л. В. Воронкова. – М. : МГТУ им. Баумана, 2006. – 25 с.
37. Тушинский Л. И. и др. Методы исследования материалов. – М. : Мир, 2004. – 384 с.
38. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др.; под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.
39. Самедов Я. Ю. Проблемы неразрушающего контроля прокатных валков / Я. Ю. Самедов // Дефектоскопия. – 2008. – № 4. – С. 3–10.
40. Будагьянц Н. А. Литые прокатные валки / Н. А. Будагьянц, В. Е. Карский. – М. : Металлургия, 1983. – 175 с.
41. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. – М.; Л. : Машиностроение, 1966. – 664 с.
42. Чугун: Справ. изд. / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М. : Металлургия, 1991. – 576 с.
43. ГОСТ 27208-87. Отливки из чугуна. Методы механических испытаний. – М. : Государственный Комитет СССР по стандартам, 1987. – 9 с.
44. Бернштейн М. Л. Механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. – М. : Металлургия, 1979. – 495 с.
45. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору). – М. : Государственный Комитет СССР по стандартам, 1978. – 5 с.
46. Дрозд М. С. О достоверности метода твердости при сдаточном контроле механических свойств металла / М. С. Дрозд, В. И. Данилин и др. //Матер. науч.-техн. конф. – Волгоград. – Вып. 1. –1969. – С. 26.
47. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов / В. С. золоторевский. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
48. Макаренко К. В. Компьютерный метод оценки взаимосвязи состава, структуры и свойств чугунов / К. В. Макаренко //Литейное производство. – 2011. – № 1. – С. 2–6.
49. Аксенов П. Н. Вопросы теории литейных процессов / П. Н. Аксенов, П. П. Берг, Н. М. Бодашков и др. – М. : Машгиз, 1960. – С. 163–252.
50. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н. Г.Гиршовича. – 3-е изд. перераб. и доп. – Л. : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1978. – 758 с.

51. Макаренко К. В. Влияние графитовой фазы на процессы разрушения в чугунах / К. В. Макаренко, Д. А. Илюшкин // *Металлургия машиностроения*. – 2010. – № 3. – С. 25–29.
52. Добровольский И. И. Расчет структуры и механических свойств нелегированного и легированного чугунов / И. И. Добровольский, А. А. Жуков, И. О. Пахнющий // *Литейное производство*. – 1988. – № 5. – С. 6–8.
53. Бобырь С. В. Развитие научных основ формирования структуры и свойств износостойких низкохромистых чугунов для деталей технологического оборудования: дисс. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук: 05.02.01 / Бобырь Сергей Владимирович. – Запорожье, 2011. – 333 с.
54. Миронова Т. М. Структура и свойства деформируемых чугунов / Т. М. Миронова, В. З. Куцова. – Дн-вск : НМетАУ, 2009. – 190 с.
55. Жуков А. А. Новое в теории графитизации / А. А. Жуков, И. В. Дыбенко, Э. В. Абдуллаев, А. В. Афонаскин // *МиТОМ*. – Дн-вск : ПГАСА, 1989. – № 2. – С. 11–18.
56. Божок С. В. Фракталы и мультифракталы / С. В. Божок, Д. А. Паршин. – Ижевск : НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. – 127 с.
57. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Доклады НАНУ*. – К., 2008. – № 11 – С. 99–107.
58. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // *Металлофиз. и новейшие технологии*. – 2011. – Т. 33. – № 3. – С. 347–360.
59. Большаков В. И. Применение теории мультифракталов для оценки механических свойств чугунных валков / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Матер. XVI междунар. конф. “Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике”*: – Санкт-Петербург : СПбГПУ. – Вып. 5. – 2013 – С. 196–199.
60. Большаков В. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *МиТОМ*. – Дн-вск : ПГАСА, 2013. – № 4. – С. 5–11.

**УДК 519.21**

**Пути прогноза механических свойств прокатных валков / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів : наук. та інформ. журнал / Д. : ДВНЗ ПДАБА, 2014. – № 1. – С. . – Рис. 3. – Бібліогр.: (60 назв).**

Главный вывод, который можно сделать из аналитического обзора заключается в том, что существующие модели и способы оценки механических свойств прокатных валков с помощью неразрушающих методов контроля дают результаты прогноза, которые не всегда могут удовлетворять предъявляемым требованиям. Одним из выходов по решению проблемы оценки механических свойств металлических валков является разработка и исследование экспресс - методики для оперативного определения этих свойств, реализация которой в заводских условиях позволит добиться улучшения параметров технологии.

Головний висновок, що можна зробити з аналітичного огляду полягає в тому, що існуючі моделі та способи оцінки механічних властивостей прокатних валків за допомогою неруйнівних методів контролю дають результати прогнозу, котрі не завжди задовольняють висунутим вимогам. Одним із виходів по вирішенню проблеми оцінки механічних властивостей металевих валків являється розробка і дослідження експрес-методики для оперативного визначення цих властивостей, реалізація якої в заводських умовах дозволить досягти покращення параметрів технології.

The main conclusion that can be drawn from analytical review is that the existing models and methods for evaluating the mechanical properties of rolls using nondestructive control methods give results of the forecast, which may not always meet the requirements. One of the ways to address the problem of evaluating the mechanical properties of metal rolls is the development and study of rapid methods for rapid determination of these properties, the implementation of which in the factory will help improve the parameters of the technology.