

**В.И.Спиваков, Э.А.Орлов, И.В.Ганошенко, В.В.Володарский**

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ  
КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ НА КОМПЛЕКС СВОЙСТВ ЛИСТОВ  
ИЗ ТРУБНОЙ СТАЛИ**

*ИЧМ НАН Украины, ОАО “МК “Азовсталь”*

Исследовано влияние химического состава и температуры контролируемой прокатки (КП) на комплекс свойств листов из трубной стали типа 10Г2ФБ. Получены многофакторные корреляционно–регрессионные связи основных элементов химического состава и температуры КП (650–900<sup>0</sup>С) с комплексом механических свойств листов.

**Постановка задачи.**

При существующей практике температурные режимы КП листов назначают в зависимости от содержания отдельных элементов в плавке или условного показателя химического состава - углеродного эквивалента, что недостаточно для прогнозирования результирующего комплекса свойств или управления технологией. Решение этих задач возможно при наличии многофакторных математических моделей связи основных элементов химического состава и температуры КП с комплексом механических свойств листов, что являлось целью настоящей работы.

Исследование влияния химического состава на комплекс механических свойств стали 10Г2ФБ выполнено с использованием базы данных, полученных при производстве листов толщиной ( $h$ ) от 9,5 до 18,7 мм по технологии КП, которая принята на стане 3600 МК «Азовсталь». Анализ статистических характеристик факторов химического состава выборки (более 400 плавок) показал, что содержание элементов в плавках соответствует нормативным требованиям и имеет нормальный (гауссовский) закон распределения. При этом рассчитанные [1] критические точки для плавок находятся в пределах:  $A_{c1}$  — от 710 до 720<sup>0</sup>С;  $A_{c3}$  — от 855 до 875<sup>0</sup>С, что позволяет корректировать технологические параметры КП в относительно узких (10 — 20<sup>0</sup>С) температурных пределах.

**Методика исследования.**

Исследование влияния химического состава стали 10Г2ФБ на механические свойства проводили методом корреляционно–регрессионного анализа, который включал:

- определение степени связи двух (парная корреляция) или более факторов (многофакторный корреляционный анализ);
- отбор факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на комплекс механических свойств.

Анализ полученных коэффициентов парных связей позволил исключить возможность одновременного включения в модели сильно коррели-

рованных между собой факторов, например, между Nb и N ( $r = 0,958$ ), C и C<sub>э</sub> ( $r = 0,916$ ). С другой стороны наличие значительных парных связей между толщиной листа и таких легирующих элементов как Nb ( $r = 0,952$ ), V ( $r = 0,813$ ), C ( $r = 0,695$ ) и др. выявляет определенную селекцию плавок по химическому составу при назначении параметров технологии КП листов на разные толщины. Кроме этого, следует отметить, что наличие значительных парных связей между Nb и N ( $r = 0,958$ ), Nb и C ( $r = 0,667$ ), V и C ( $r = 0,682$ ) с одной стороны и между Nb и  $\sigma_T$  ( $r = 0,742$ ), V и  $\sigma_T$  ( $r = 0,732$ ) с другой — подтверждает действие механизма карбонитридного упрочнения стали 10Г2ФБ при КП. Наличие значительных парных связей между C<sub>э</sub> и C ( $r = 0,916$ ), C<sub>э</sub> и Nb ( $r = 0,603$ ), C<sub>э</sub> и V ( $r = 0,657$ ) отражает функциональную зависимость C<sub>э</sub> от указанных элементов и, поэтому целесообразно для построения многофакторных моделей использовать кроме химического состава дополнительные комплексные факторы, например критические точки стали  $A_{c1}, A_{c3}$  и др.

Многофакторный регрессионный анализ проводили методом пошагового выбора переменной (фактора) на ПЭВМ с использованием пакета программ “STATGRAPHICS”. При пошаговом методе включение и исключение факторов осуществляли с учетом критерия Фишера ( $F$ -критерия). Критерием завершения процесса выбора факторов модели и расчета ее показателей приняли — достижение максимального значения коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) и соответственно множественной корреляции ( $r$ ).

#### Изложение основных материалов исследования.

Полученные уравнения регрессии для оценки механических свойств и ударной вязкости листов из стали 10Г2ФБ от химического состава без учета  $T_{кн}$  приведены ниже:

$$\sigma_T[\text{Н/мм}^2] = -42890,8 + 5076,5 \cdot \text{Mn} + 5703,8 \cdot \text{Si} + 18354,4 \cdot \text{S} + 16456,4 \cdot \text{P} + 5678,7 \cdot \text{Cr} + 4199,2 \cdot \text{Ni} + 4967,8 \cdot \text{Cu} + 7894,4 \cdot \text{Al} + 11313,4 \cdot \text{Nb} - 14558,6 \cdot \text{N} + 8308,6 \cdot \text{V} + 8471,6 \cdot \text{Ti} + 4653,0 \cdot \text{Fe} - 7104,4 \cdot \text{C}_э - 39,64 \cdot A_{c3} - 4,62 \cdot h;$$

$$r = 0,8050; (1)$$

$$\sigma_B[\text{Н/мм}^2] = -393208,8 + 7278,2 \cdot \text{C} + 4961,9 \cdot \text{Mn} + 3804,7 \cdot \text{Si} + 8063,7 \cdot \text{P} + 4496,6 \cdot \text{Cr} + 4499,2 \cdot \text{Ni} + 4348,0 \cdot \text{Cu} + 4446,1 \cdot \text{Al} + 8621,1 \cdot \text{Nb} + 20471,5 \cdot \text{N} + 4932,6 \cdot \text{V} + 5804,5 \cdot \text{Ti} + 3847,7 \cdot \text{Fe} - 6518,1 \cdot \text{C}_э + 26,98 \cdot A_{c1} - 11,78 \cdot A_{c3} - 4,67 \cdot h;$$

$$r = 0,5983; (2)$$

$$\delta_5[\%] = -12989,5 + 1182,8 \cdot \text{C} + 242,89 \cdot \text{Si} + 1428,3 \cdot \text{S} - 1272,6 \cdot \text{P} + 227,62 \cdot \text{Cr} + 89,78 \cdot \text{Ni} + 115,33 \cdot \text{Cu} - 959,39 \cdot \text{Nb} - 4476,1 \cdot \text{N} - 475,31 \cdot \text{Ti} + 160,21 \cdot \text{Fe} + 776,74 \cdot \text{C}_э - 5,52 \cdot A_{c1} - 0,26 \cdot h;$$

$$r = 0,9447; (3)$$

$$KCV_{20}[\text{Дж/см}^2] = 1061742,0 + 9705,9 \cdot \text{C} - 7966,6 \cdot \text{Mn} - 11420,0 \cdot \text{Si} - 30636,5 \cdot \text{S} - 17588,8 \cdot \text{P} - 8325,1 \cdot \text{Cr} - 9173,5 \cdot \text{Ni} - 10317,5 \cdot \text{Cu} - 12461,1 \cdot \text{Al} -$$

$$6544,4 \cdot \text{Nb} - 12396,5 \cdot \text{V} - 10463,2 \cdot \text{Ti} - 10813,9 \cdot \text{Fe} - 14201,3 \cdot \text{C}_3 + 22,24 \cdot A_{c3} - 6,20 \cdot h; \quad r = 0,5382; (4)$$

$$\text{КСУ}_{-60} [\text{Дж/см}^2] = -361863,0 + 37630,0 \cdot \text{C} + 6610,3 \cdot \text{Mn} - 14398,6 \cdot \text{S} + 14398,6 \cdot \text{P} + 3215,9 \cdot \text{Cr} + 6603,3 \cdot \text{Ni} + 2236,2 \cdot \text{Cu} - 4620,1 \cdot \text{Al} - 2519,83 \cdot \text{Nb} + 13654,8 \cdot \text{N} - 7612,2 \cdot \text{V} + 2290,8 \cdot \text{Fe} - 13891,1 \cdot \text{C}_3 + 166,67 \cdot A_{c1} + 64,25 \cdot (A_{c1} - A_{c3}); \quad r = 0,4475. (5)$$

Как следует из приведенных уравнений (1) – (5), только Nb, Mn, P, Cr и Ni присутствуют во всех моделях при среднем уровне значимости (критерий  $F$ - ввода равен  $20,0 \div 5,0$ ). Из упрочняющих факторов наиболее значимо проявилось влияние Nb, C, P и Al. Во всех моделях кроме  $\text{КСУ}_{-60}$  проявилось влияние толщины листа ( $h$ ). При рассмотрении влияния факторов химического состава на ударную вязкость следует отметить отрицательное влияние S, Cr и C ( $F$ - ввода равен  $5,0 \div 3,0$ ) и значительное положительное влияние Nb, Mn и Ni ( $F$ - ввода равен  $35,0 \div 15,0$ ).

Количество задействованных факторов в моделях составило от 14 до 17, при этом коэффициенты множественной корреляции находятся в диапазоне от 0,45 до 0,95. Ввод в корреляционные модели  $T_{\text{кп}}$  первоначально осложнился недостатком и достоверностью данных о ее значениях в выборке, в связи с чем, провели работу по вводу в разработанные модели (1) – (5) —  $T_{\text{кп}}$ , как основного технологического фактора. При этом исходили из следующих основных посылок:

— структурная формула зависимости свойств от комплекса факторов может быть выражена в следующем виде:

$$\sigma_i = f_i(x/c) + \Delta_i, (6)$$

где  $\sigma_i$  — анализируемое свойство листов ( $\sigma_{\text{т}}$ ,  $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\delta_5$  и т.д.);

$f_i(x/c)$  — факторы влияния химического состава;

$\Delta_i$  — разность между экспериментальными и рассчитанными по моделям (1–5) значениями свойств (неучтенные факторы влияния —  $T_{\text{кп}}$ ,  $V_{\text{охл}}$  и др.). При этом определенная часть ( $\Delta_i$ ) может быть отнесена за счет влияния  $T_{\text{кп}}$ , а остальная — за счет других неучтенных факторов ( $O_i$ ), т.е.  $\Delta_i = \varphi_i(T_{\text{кп}}) + O_i$ .

Известны количественные закономерности влияния  $T_{\text{кп}}$  на комплекс механических свойств для отдельных химических составов стали 10Г2ФБ [2–3]. Так в работе [2] приведена закономерность влияния  $T_{\text{кп}}$  на размер ферритного зерна, переходную температуру и предел текучести листов толщиной 10 мм из стали содержащей 0,12% C, 1,3% Mn, 0,3% Si, 0,2% Nb и 0,06% V. Этот экспериментальный материал, дополненный нашими [4] данными по КП на стане 3600 МК “Азовсталь, был взят в качестве исходного для ввода  $T_{\text{кп}}$  в разработанные корреляционные модели, как фактора, существенно влияющего на комплекс свойств стали 10Г2ФБ (см. рис.1).

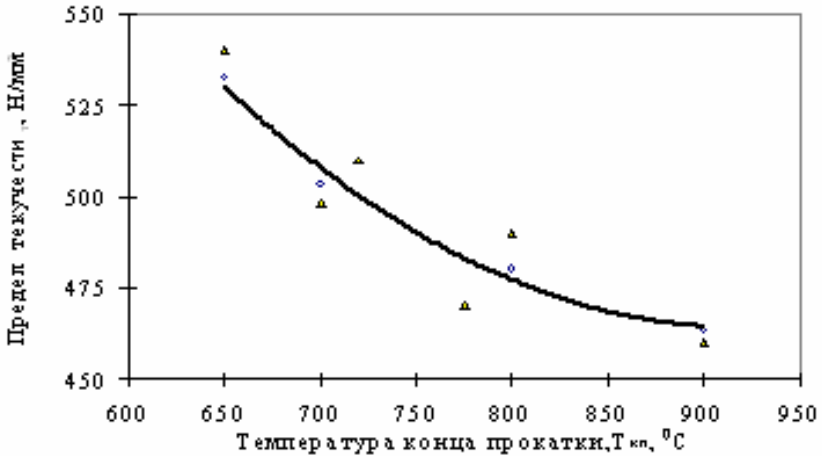


Рис.1. Зависимость предела текучести от температуры конца прокатки стали 10Г2ФБ: о — данные [2]; Δ — данные ИЧМ [4].

Согласно ТИ–232–186–2003 ОАО МК «Азовсталь» температура конца прокатки листов из стали 10Г2ФБ (X56 –X60) в анализируемой выборке может быть в интервале 680 – 800<sup>0</sup>С в соответствии со значениями C<sub>0</sub> плавков. Учитывая колебания температуры по длине (ширине) раската и ошибку измерения температуры в производственных условиях, этот диапазон вариации T<sub>кп</sub> фактически составляет 650 – 850<sup>0</sup>С при среднестатистическом ее значении для всей выборки — 750<sup>0</sup>С.

Приведенная зависимость  $\sigma_T$  от T<sub>кп</sub> аппроксимирована уравнением:

$$\sigma_T = 0,0009 \cdot T_{кп}^2 - 1,669 \cdot T_{кп} + 1231,2 \quad (7).$$

Ввод зависимости свойств от T<sub>кп</sub> в многофакторные модели (1–5) проводили по следующему алгоритму:

- рассчитывали, например, значения  $\sigma_T$  по корреляционному уравнению (1) для химического состава стали 10Г2ФБ [2] (см. выше);
- рассчитывали значения  $\sigma_T$  по уравнению (7) для температуры конца прокатки средней по выборке (T<sub>кп</sub> = 750<sup>0</sup>С);
- находили разность полученных значений  $\sigma_T$ , которая фактически является поправкой константы в модели для  $\sigma_T$  (1) без учета влияния T<sub>кп</sub>.

При этом исходили из условия, что значения  $\sigma_T$ , рассчитанные по разным моделям должны быть равны между собой при идентичности заданных факторов в обоих уравнениях (1) и (7) (т.е. при одинаковом химическом составе и T<sub>кп</sub> = 750<sup>0</sup>С). С учетом полученной поправки модель зависимости предела текучести от химического состава и T<sub>кп</sub> принимает вид:

$$\sigma_T = 671,56 + 6626,69 \cdot C + \dots + 0,0009 \cdot T_{кп}^2 - 1,669 \cdot T_{кп} + O_i, \quad (8)$$

где  $f_i(x/c) = 671,56 + 6626,69 \cdot C + \dots$ ;

$$\varphi_i(T_{\text{кп}}) = 0,0009 \cdot T_{\text{кп}}^2 - 1,669 \cdot T_{\text{кп}};$$

$O_i = 1231,7 - 671,56 \approx 560$  поправка константы модели равная разности констант уравнений (7) и (1).

### Результаты исследования.

По полученной модели (8) методом подбора неизвестного параметра ( $T_{\text{кп}}$ ), были рассчитаны температуры конца прокатки для каждого химического состава плавок анализируемой выборки. При этом исходили из условия отнесения разности между экспериментальными и рассчитанными по модели (8) значениями  $\sigma_T$  за счет  $T_{\text{кп}}$  на 20%. Величину 20% приняли исходя из анализа рис. 1, приняв ее пропорционально влиянию  $T_{\text{кп}}$  на предел текучести, т.е.  $(540-460)/540 \approx 0,15$  или 15–20%, где 540 и 460 Н/мм<sup>2</sup> максимальное и минимальное значение  $\sigma_T$  соответственно.

Полученные значения  $T_{\text{кп}}$ , округленные с точностью до 5<sup>0</sup>С, были использованы в качестве нового независимого фактора для окончательной коррекции моделей (1–5) зависимости механических свойств от химического состава и  $T_{\text{кп}}$ . В результате были получены корреляционные модели (9) – (13) для всего комплекса свойств с учетом  $T_{\text{кп}}$ .

$$\sigma_T [\text{Н/мм}^2] = 169,1 + 975,4 \cdot C - 61,74 \cdot \text{Si} - 181,2 \cdot \text{Cr} - 219,6 \cdot \text{Cu} + 212,5 \cdot \text{Al} + 1531,6 \cdot \text{Nb} - 1015,7 \cdot \text{V} - 636,8 \cdot \text{Ti} + 2,23 \cdot A_{c3} - 4,405 \cdot T_{\text{кп}} + 0,002719 \cdot T_{\text{кп}}^2 + 18,31 \cdot h - 0,5112 \cdot h^2; \quad r = 0,9119; (9)$$

$$\sigma_B [\text{Н/мм}^2] = -27909,5 + 1762,5 \cdot C + 400,3 \cdot \text{Mn} - 583,8 \cdot \text{Si} - 11390,6 \cdot \text{S} - 761,5 \cdot \text{Cr} + 771,4 \cdot \text{Ni} - 756,3 \cdot \text{Al} + 1952,9 \cdot \text{Nb} + 31270,0 \cdot \text{N} - 1705,5 \cdot \text{V} - 434,3 \cdot \text{Ti} + 35,21 \cdot A_{c1} + 4,002 \cdot A_{c3} - 2,155 \cdot T_{\text{кп}} + 0,001267 \cdot T_{\text{кп}}^2 + 7,0978 \cdot h - 0,2291 \cdot h^2; \quad r = 0,7466; (10)$$

$$\delta_s [\%] = 80,53 + 10,39 \cdot \text{Mn} + 370,79 \cdot \text{S} - 17,61 \cdot \text{Cr} + 49,80 \cdot \text{Ni} - 171,73 \cdot \text{Nb} - 120,08 \cdot \text{V} - 106,095 \cdot \text{Ti} - 6,1828 \cdot h - 0,1741 \cdot h^2; \quad r = 0,9433; (11)$$

$$\text{КСV}_{-20} [\text{Дж/см}^2] = 290,03 + 79,718 \cdot \text{Mn} - 13836,4 \text{S} - 388,156 \text{Cr} + 319,38 \text{Ni} - 487,11 \text{Al} + 1148,22 \text{Nb} - 1885,9 \text{V} + 22,243 A_{c3} + 0,000082 T_{\text{кп}}^2 - 3,2849 \cdot h; \quad r = 0,5275; (12)$$

$$\text{КСU}_{-60} [\text{Дж/см}^2] = 614,43 + 66,63 \cdot \text{Mn} + 60,29 \cdot \text{Si} + 3562,03 \cdot \text{S} + 185,606 \cdot \text{Cr} - 1204,58 \cdot \text{Cu} - 486,728 \cdot \text{Al} - 2015,54 \cdot \text{Nb} - 5538,63 \cdot \text{N} - 2980,4 \cdot \text{V} - 2,9473 \cdot T_{\text{кп}} + 0,002102 \cdot T_{\text{кп}}^2; \quad r = 0,4196. (13)$$

Адекватность разработанных моделей зависимости механических свойств и ударной вязкости от химического состава и  $T_{\text{кп}}$  является достаточно высокой (см. рис.2.)

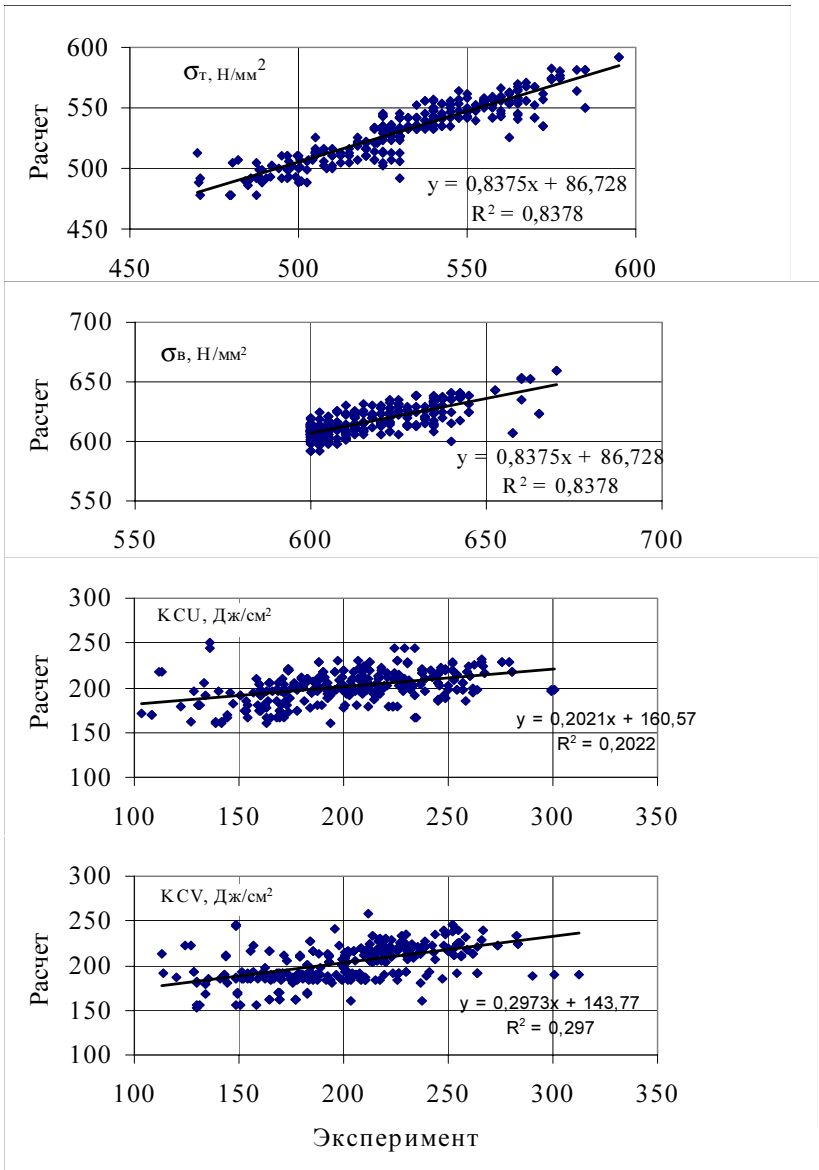


Рис.2. Адекватность корреляционных моделей прочностных свойств (9–10) и ударной вязкости (12–13) листовой стали 10Г2ФБ

**Выводы.**

Из сравнения данных моделей (1 – 5) и (9 – 13) видно, что включение в корреляционные модели  $T_{кп}$  в качестве дополнительного фактора, существенно повысило коэффициенты множественной корреляции ( $r$ ) прочностных характеристик механических свойств и в меньшей степени ударной вязкости. Для относительного удлинения  $T_{кп}$  как фактор влияния оказался малозначимым. Следует отметить уменьшение количества значимых факторов в разработанных моделях в сравнении с уравнениями (1–5) при более высоких показателях коэффициентов множественной корреляции.

1. *Винокур Б.Б. Пилушенко В.Л. и др.* Структура конструкционной легированной стали. // –М.: Металлургия. – 1979.– 183с.
2. *Погоржельский В.И., Литвиненко Д.А., Матросов Ю.И. и др.* Контролируемая прокатка. // –М.: Металлургия. –1979.– 126с.
3. *Погоржельский В.И.* Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла. //– М.: Металлургия. –1986.– 150с.
4. *Влияние упрочняющей термической обработки с прокатного нагрева на свойства листов малоперлитных сталей./ В.И. Спиваков, В.Я. Савенков, А.Н. Заннес, Э.А. Орлов.* // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* –1979.– № 4. – С.19–21.

*Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. И.Г.Узловым*