

А.С.Артеменко, Э.В.Приходько, Д.Н. Андрианов

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА НА ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СОРТОВОГО ПРОКАТА

С помощью методики физико–химического моделирования изучены свойства арматурной стали. Получена прогнозная модель описывающая показатели предела прочности и текучести для сталей марок А500С и АТ500С.

Целью исследования было уточнение методики физико–химического моделирования при изучении влияния состава стали на ее прочностные свойства при анализе больших массивов экспериментальной информации.

Объектом исследования являются экспериментальные данные Белорусского металлургического завода (БМЗ) о свойствах арматуры из различных марок стали в виде профилей от №10 до №16 (табл.1). Как следует, из этой таблицы по каждому варианту было отобрано для анализа по 100 плавок.

Таблица 1. Сортамент стана 320 РУП БМЗ

	460	25Г2С	А500С	АТ500С	В500С
№10	100 плавок	91 плавка	100 плавок	100 плавок	100 плавок
№12	100 плавок	100 плавок	100 плавок	100 плавок	100 плавок
№14	100 плавок	101 плавка	100 плавок	91 плавка	
№16	100 плавок		100 плавок	101 плавка	100 плавок

Результаты анализа рассмотрим на примере проката из марок стали А500С и АТ500С. На первом этапе по плавочному составу сталей были рассчитаны модельные параметры структуры, характеризующие меж-атомное взаимодействие в матричной(C+Si+Mn) и примесной (S,P,As,Sn) подсистемах. В состав легирующей подсистемы были включены Cr, Ni, и Cu, микролегирующей подсистемы Al, Mo, Nb и V. Для химических эквивалентов перечисленных подсистем приняты следующие условные обозначения соответственно  $Z^Y_{m}$ ,  $Z^Y_{pr}$ ,  $Z^Y_l$ ,  $Z^Y_{ml}$ . Рассчитаны также общий химический эквивалент состава  $Z^Y$  и части его без железа ( $Z^Y_0$ ). Соответствующая индексация проведена для физико – химических критериев  $d$  и  $tg\alpha$ .

Наличие большого числа модельных параметров, неизвестным образом влияющих на комплекс свойств, порождает проблему выбора оптимальной структуры модели. Подготовительная работа к решению этой задачи заключалась в анализе парных корреляций (табл.2 и табл.3) с использованием одноименных параметров в качестве переменных. Второй этап анализа предполагает использование лучших результатов в табл.2 и 3

для выбора наиболее значимых парных корреляций для определения обобщающей модели[1].

Таблица 2. Свойства горячекатаной арматуры № 12

зависимости	R	зависимости	R
$\sigma_T - Z^Y$	0,42	$\sigma_b - Z^Y$	0,47
$\sigma_T - Z_0^Y$	0,38	$\sigma_b - Z_0^Y$	0,21
$\sigma_T - Z_m^Y$	-0,18	$\sigma_b - Z_m^Y$	0,27
$\sigma_T - Z_1^Y$	0,51	$\sigma_b - Z_1^Y$	0,33
$\sigma_T - \text{tg}\alpha_0$	-0,247	$\sigma_b - \text{tg}\alpha_0$	-0,09
$\sigma_T - \text{tg}\alpha_m$	0,23	$\sigma_b - \text{tg}\alpha_m$	-0,304
$\sigma_T - \text{tg}\alpha_1$	-0,53	$\sigma_b - \text{tg}\alpha_1$	-0,349
$\sigma_T - d$	-0,31	$\sigma_b - d$	-0,51
$\sigma_T - d_1$	-0,51	$\sigma_b - d_1$	-0,34
$\sigma_T - d_{pr}$	-0,23	$\sigma_b - d_{pr}$	-0,08

Таблица 3. Свойства термоупрочненной арматуры № 12

зависимости	R	зависимости	R
$\sigma_T - Z^Y$	0,39	$\sigma_b - Z^Y$	0,53
$\sigma_T - Z_0^Y$	0,32	$\sigma_b - Z_0^Y$	0,29
$\sigma_T - Z_1^Y$	0,28	$\sigma_b - Z_1^Y$	-0,28
$\sigma_T - \text{tg}\alpha_0$	-0,31	$\sigma_b - \text{tg}\alpha_0$	-0,27
$\sigma_T - \text{tg}\alpha_1$	0,28	$\sigma_b - \text{tg}\alpha_1$	0,28
$\sigma_T - \text{tg}\alpha_{ml}$	-0,13	$\sigma_b - \text{tg}\alpha_{ml}$	-0,13
$\sigma_T - d$	-0,22	$\sigma_b - d$	0,41
$\sigma_T - d_0$	0,16	$\sigma_b - d_0$	0,11
$\sigma_T - d_1$	0,29	$\sigma_b - d_1$	0,28
$\sigma_T - d_{pr}$	0,36	$\sigma_b - d_{pr}$	0,36

Сопоставление результатов анализа по описанной схеме свойств горячекатаного и термоупрочненного проката показало, что в обоих случаях наиболее значимыми факторами являются химические эквиваленты общего состава ( $Z^Y$ ) и состава легирующей подсистемы (сочетание Cr, Ni и Cu) –  $Z_1^Y$ . Обращает на себя внимание существенное влияние параметра  $d_{pr}$  на прочностные свойства термоупрочненной арматуры,  $d_1$  – на свойства горячекатаной. В обоих случаях можно констатировать низкий уровень точности при описании пластических свойств (удлинение  $\delta$ , %) и невысокую эффективность повышения точности описательных моделей за счет повышения их параметричности. Основным резервом повышения уровня обобщения приведенных данных является, по нашему мнению, конкретный учет технологических параметров производства арматуры, в частности, температура ее самоотпуска.

Назначение подобных технологических параметров в зависимости от  $Z^Y$  несомненно поднимет уровень точности анализируемого аналитического обобщения. Первым шагом к решению этой задачи должно стать выявление роли углеродного эквивалента. Анализ, проведенный на данных для профилей №10 и №14 показал, что между углеродным ( $C_3$ ) и химическими эквивалентами ( $Z^Y_i$ ) для разных подсистем состава нет значимых связей ( $r < 0.2$ ). Этот результат свидетельствует о важности для повышения прочностных свойств приведения параметров технологии прокатки в соответствие с конкретным плавочным составом.

Одним из основных приемов анализа закономерностей изменения свойств в зависимости от состава, закодированного в модельных терминах, является построение карт поверхностей отклика свойств в координатах  $Z^Y_m \rightarrow Z^Y_{pr}$ . На рис.1 и 2 в качестве примера приведены такие карты, единые для всех профилей термоупрочненной арматуры АТ500С. Налицо сложный нелинейный характер изменения  $\sigma_b$  и  $\sigma_T$  в зависимости от соотношения составов матричной и примесной подсистем, являющийся следствием существенного влияния на свойства не учитываемых технологических параметров прокатки и термообработки. Следствием такой нелинейности является невысокий уровень коэффициентов корреляции ( $r$ ) линейных регрессионных моделей, что иллюстрируют результаты, приведенные в табл.2 и 3.

Методом перебора сочетаний парных связей, приведенных в табл.2 и 3, определены сочетания модельных параметров, обеспечивающих максимально достижимую точность обобщения опытных данных. Для горячекатаной арматуры получено

$$\begin{aligned} \sigma_T &= -3761 + 3158Z^Y + 181Z^Y_0 - 107d_m - 1588tg\acute{a}_1 - 144d_{pr} & r &= 0,682 \\ \sigma_b &= 1585 - 6212d + 223Z^Y_0 - 157tg\acute{a}_m - 33tg\acute{a}_1 + 590tg\acute{a}_{ml} + 58tg\acute{a}_{pr} & r &= 0,67 \end{aligned}$$

Для термоупрочненного проката характерно другое сочетание модельных параметров

$$\begin{aligned} \sigma_T &= -2602 + 1509Z^Y + 75Z^Y_0 - 9,8d_m + 297d_1 - 312tg\acute{a}_{ml} + 177d_{pr} & r &= 0,532 \\ \sigma_b &= -3533 + 3233Z^Y - 22,6Z^Y_0 - 35,5d_m + 1052tg\acute{a}_1 + 18Z^Y_{ml} + 128d_{pr} & r &= 0,62 \end{aligned}$$

Обращает на себя внимание содержание картограмм, из которого следует, что в центральной части соотношения между сопоставленными параметрами для АТ500С находится обширная область стабильного уровня свойств в диапазоне 662 – 664 МПа (для  $\sigma_b$ ) и 572 – 574 МПа (для  $\sigma_T$ ). Координаты этих областей стабильности зависят от номера профиля: так, для профиля №12 оптимальное значение  $\sigma_b$  составляет 658 МПа, а для  $\sigma_T$  – 570 МПа (рис. 3 и 4).

В отличие от результатов, полученных при анализе закономерностей изменения свойств в зависимости от состава термоупрочненной арматуры, в случае горячекатаной наблюдается существенное различие в картах поверхности отклика разных профилей А500С, причем каждая из этих диаграмм существенно отличается от обобщающей, что не имело места в случае анализа арматуры АТ500С.

В то же время при сравнении диаграмм на рис.1 и рис.2 четко просматривается идентичный характер влияния сочетаний параметров  $Z_m^Y$  и  $Z_{pr}^Y$  на формирование прочностных свойств арматуры.

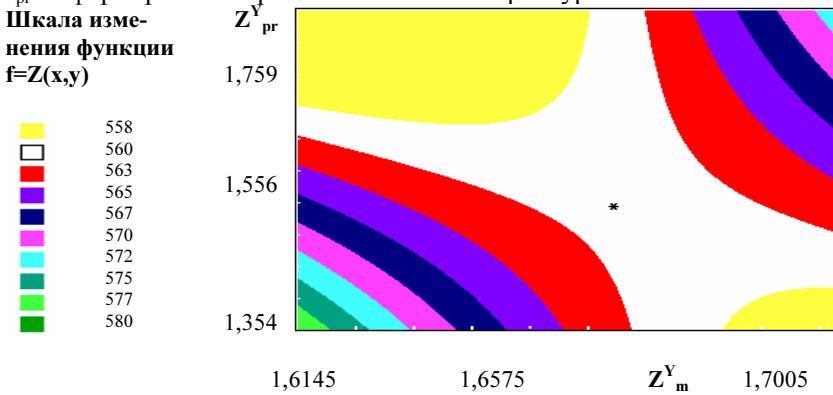


Рис.1. Общая картограмма поверхности  $\sigma_\tau$  для арматурных профилей АТ500С – Карта поверхности отклика  $Z=f(x, y)$   $Z - \sigma_\tau$

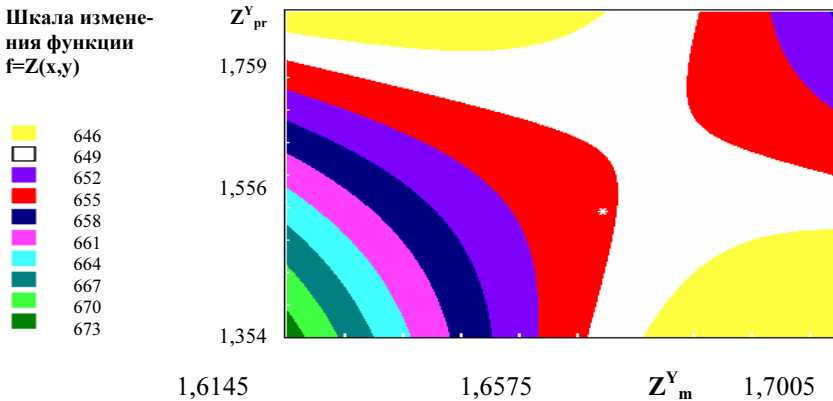


Рис.2. Общая картограмма поверхности  $\sigma_b$  для арматурных профилей АТ500С – Карта поверхности отклика  $Z=f(x, y)$   $Z - \sigma_b$

Следует отметить, что наиболее тесно с прочностными свойствами горячекатаной арматуры оказался связан параметр  $d_{pr}$  (для связей  $\sigma_\tau$ ,  $\sigma_b=f(d_{pr})$ ) коэффициент корреляции – 0,45, что предостерегает против недооценки влияния взаимодействия в примесной подсистеме на формирование прочностных свойств арматуры.

#### **Выводы:**

Из полученных результатов следует, что назначение технологических параметров прокатки и термообработки (в частности, температуры самоотпуска) в зависимости от  $Z^Y$  или  $Z_m^Y$  будет способствовать уменьшению диапазона колеблемости и повышению уровня прочностных свойств.

Выбраны наиболее значимые парные корреляции. Применен метод картоирования, с помощью которого выявили диапазоны оптимальных механических свойств.

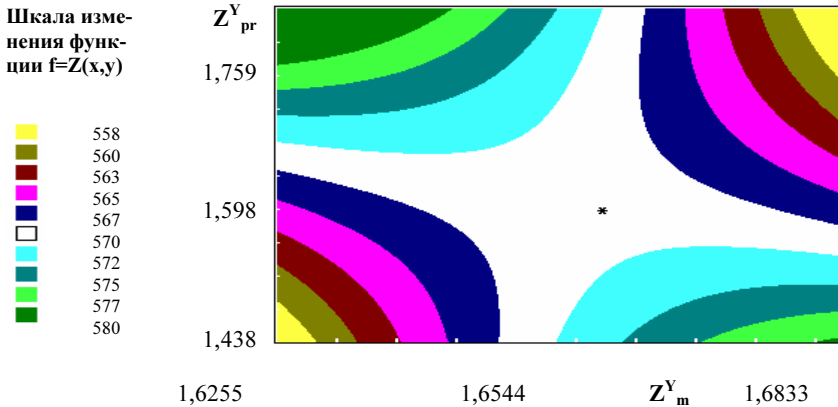


Рис.3. Поверхность  $\sigma_\tau$  для стали АТ500С профиль 12 – Карта поверхности отклика  $Z=f(x, y) Z - \sigma_\tau$

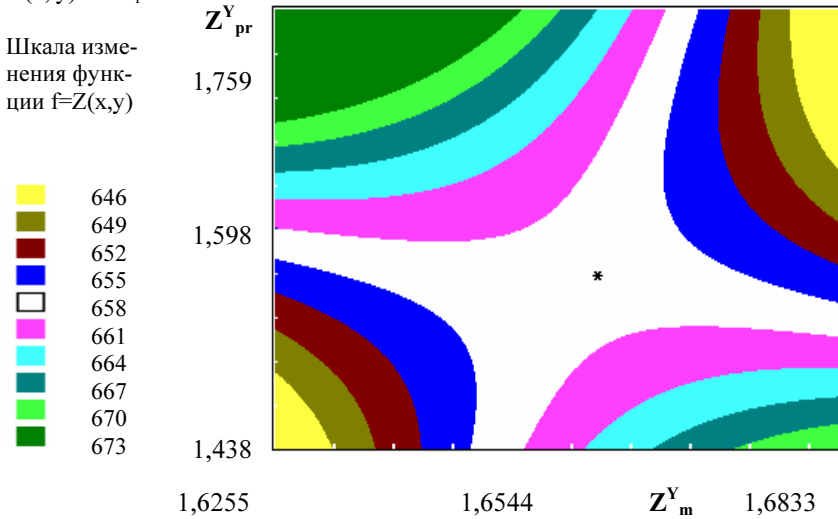


Рис.4. Поверхность  $\sigma_b$  для стали АТ500С профиль 12 – Карта поверхности отклика  $Z=f(x, y) Z - \sigma_b$

1. Артеменко А.С., Тогобицкая Д.Н. Оптимизация состава конструкционных сталей на основе параметров межатомного взаимодействия. // В сб. «Проблемы математического моделирования». – Дніпродзержинськ. – 2005. – С.74–76

*Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Д.Н.Тогобицкой*