

**В.Н. Куваев, В.А. Чигринский, В.Г. Раздобреев, Д.А. Иванов**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЫВУ  
МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ АРМАТУРНОЙ  
СТАЛИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ЧАСТНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ  
МОДЕЛЕЙ**

Предложен способ декомпозиции многофакторной регрессионной модели прогнозирования механических свойств арматурного проката. Обоснована система частных регрессионных моделей прогнозирования временного сопротивления разрыву арматурного проката. Показано, что полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Временное сопротивление разрыву арматурного проката является важнейшим параметром, нормируемым действующими отечественными и зарубежными стандартами [1]. При производстве арматурного проката на непрерывных мелкосортных станах формирование требуемого комплекса его механических свойств происходит в процессе его термического упрочнения с тепла прокатного нагрева и последующего самоотпуска на холодильнике. Ввиду многофакторности и сложности, протекающих при этом процессов наиболее достоверным методом прогнозирования свойств арматурной стали является множественный корреляционный анализ [2, С.237].

Регрессионные зависимости для расчета механических свойств готового проката приведены в работах [2–7]. Обращает на себя внимание как существенное различие коэффициентов регрессии при одноименных параметрах в правой части уравнений, так вариации наборов переменных регрессий. Это свидетельствует о сильной зависимости полученных результатов от конкретной технологии термомеханической обработки арматурного проката, принятой на объекте исследования, и влиянии фактора субъективности на методику исследований.

Известно, что модели, основанные на регрессионных зависимостях, обеспечивают приемлемую точность расчета в достаточно ограниченной области варьирования значащих факторов [8], а объем необходимого исходного материала растет в геометрической прогрессии от их количества. Так, при определении линейной регрессионной зависимости первого порядка на основе планирования экспериментов при  $k$  значащих факторах общее количество опытов составляет порядка  $2^k$  [9]. При пассивном эксперименте количество опытов, необходимых для получения достоверной регрессионной зависимости, еще более возрастает. Тогда, если принять, согласно работе [10], девять технологических параметров определяющих прочностные свойства термоупрочненного проката, то для получения регрессионной зависимости только для одного профилеразмера арматурного проката требуется более пятисот опытов. Если же учесть, что

особенностью организации процесса термического упрочнения арматурного проката в производственных условиях является корректировка схем охлаждения в зависимости от марочного состава прокатываемой стали и сезонных колебаний температуры охлаждающей воды, то становится очевидным весьма приближенный и оценочный характер многофакторных регрессионных зависимостей прогнозирования механических свойств готового проката.

Одним из возможных путей повышения точности прогнозирования механических свойств термически упрочненного проката и достижение максимальной инвариантности их от вариаций технологических схем термомеханической обработки является декомпозиция многофакторной регрессионной модели механических свойств с формированием системы взаимосвязанных частных регрессионных моделей, отображающих существенные стороны процесса охлаждения и структурообразования в арматуре с выделением моделей независимых либо условно–постоянных по принятой технологии производства термоупрочненной арматурной стали.

Характерной особенностью структурообразования в термоупрочняемом арматурном прокате является то, что в процессе его термического упрочнения с тепла прокатного нагрева в нем образуется поверхностный слой отпущенного мартенсита и сердцевинный слой с феррито–перлитной либо бейнитной структурой с тонкой прослойкой промежуточных структур между слоями [4, рис.63; 13, рис.67; 14, рис.5.2; 15, 16]. Поскольку для получения заданных свойств в условиях массового производства арматурного проката требуется достижение минимальной колеблемости конечных свойств готовой продукции [2,6], то выбор химического состава стали производят таким образом, чтобы обеспечить повышенную устойчивость аустенита стали [2,15,18].

Основываясь на данных работы [6], можно принять температуру фазовых превращений сердцевинного слоя  $t_{отп}$  и среднемассовую температуру проката на выходе установки ускоренного охлаждения  $t_{см}$  равными температуре самоотпуска проката на холодильнике  $t_{отп} \approx t_{см} \approx t_{со}$ . Сразу отметим, что температуре самоотпуска проката на холодильнике и температура самоотпуска мартенсита поверхностного слоя не являются эквивалентными понятиями, но прямое взаимосоответствие между ними может быть установлено через средний размер карбидных частиц [14].

Первый шаг декомпозиции задачи прогнозирования механических свойств (временного сопротивления разрыву) термомеханически упрочненной малоуглеродистой низколегированной стали следует непосредственно из особенности структурообразования по сечению проката. Это разделение ее на задачу прогнозирования временного сопротивления разрыву отпущенного мартенсита и феррито – перлитной (бейнитной) структуры сердцевинного слоя.

Многочисленные экспериментальные исследования влияния различных факторов на временное сопротивление разрыву термоупрочненного проката из конструкционных сталей, в частности арматуры из малоуглеродистой низколегированной стали, показали, что основными факторами являются химический состав и температура самоотпуска стали [2,11,15–19]. Известно, что наиболее сильное влияние на механические свойства оказывает углерод, чем какой-либо другой химический элемент. Поэтому целесообразно при анализе влияния химического состава на те или иные свойства стали приводить влияние легирующих элементов к влиянию углерода через соответствующий углеродный эквивалент, как это принято в [1,14,20,21]. В первом же приближении достаточно ограничиться лишь учетом влияния углерода [15].

Экспериментальные точки зависимости временного сопротивления разрыву от температуры структурных превращений (температуры самоотпуска проката на холодильнике) в координатах временное сопротивление разрыву – процент содержания углерода хорошо укладываются в линейную зависимость [2,с.143;16,рис.298] вида:

$$\sigma_{в(п-б)} = r_{0\_C}^{\sigma}(t_{отп}) + r_{1\_C}^{\sigma}(t_{отп}) \cdot m_c, \quad (1)$$

где  $m_c$  – концентрация углерода в стали (процент по массе);  $t_{отп}$  – температура самоотпуска;  $r_{0\_C}^{\sigma}(t_{отп})$ ,  $r_{1\_C}^{\sigma}(t_{отп})$  – коэффициенты регрессии (зависят от температуры самоотпуска).

Точно также в линейную зависимость вида:

$$\sigma_{в(п-б)} = r_{0\_t_{отп}}^{\sigma}(m_c) - r_{1\_t_{отп}}^{\sigma}(m_c) \cdot t_{отп} \quad (2)$$

хорошо укладываются экспериментальные точки, полученные при исследовании взаимосвязи механических свойств стали определенного химического состава с температурой самоотпуска [2,рис.22,27,29,40,45; 11, рис.28,88; 17, рис.225,289; 18, рис.28], которая справедлива до температуры самоотпуска  $\sim 250 \div 300^{\circ}\text{C}$ . При более низких температурах отпуска временное сопротивление разрыву остается неизменным.

Так как для исследованных марок сталей температура самоотпуска  $\sim 250 \div 300^{\circ}\text{C}$ , достигаемая в процессе охлаждения, соответствует температурной области завершения мартенситного превращения в [17, рис.200], то правомерно утверждать, что граничными точками области определения зависимостей (1,2) являются температура начала феррито – перлитного превращения  $t_{A1}$  – критическая точка  $A_1$ , и температура завершения мартенситного превращения  $t_{Mf}$ . В общем случае, температуры начала феррито – перлитного превращения  $t_{A1}$  и завершения мартенситного превращения  $t_{Mf}$  зависят от химического состава стали и могут быть рассчитаны по известным регрессионным зависимостям [22, с.288]. Учитывая принятые нами допущения, для малоуглеродистых низколегированных сталей они имеют вид:

$$t_{A1} = 723, \quad (3)$$

$$t_{Mf} = r_0 \cdot t_{Mf} - r_1 \cdot t_{Mf} \cdot m_c \quad (4)$$

За границами области определения, механические свойства стали уже не зависят от температуры самоотпуска, а определяются только содержанием углерода в стали, т.е. описываются регрессионными зависимостями вида:

$$\sigma_{B(r)} = r_0^{\sigma(r)} + r_1^{\sigma(r)} \cdot m_c, \quad (5)$$

$$\sigma_{B(3)} = r_0^{\sigma(3)} + r_1^{\sigma(3)} \cdot m_c, \quad (6)$$

где  $\sigma_{B(r)}$ ,  $\sigma_{B(3)}$  – временные сопротивления разрыву горячекатаной и закаленной полностью на мартенсит сталей;  $r_0^{\sigma(r)}$ ,  $r_1^{\sigma(r)}$ ,  $r_0^{\sigma(3)}$ ,  $r_1^{\sigma(3)}$  – постоянные коэффициенты регрессии.

Зная коэффициенты регрессии в (4–6) легко получить зависимость для расчета временного сопротивления разрыву в области определения зависимостей (1,2). Приняв  $\sigma_B(t_{A1}; m_c) = \sigma_{B(r)}(m_c)$  и  $\sigma_B(t_{Mf}; m_c) = \sigma_{B(3)}(m_c)$ , имеем:

$$\sigma_{B(п-б)} = r_0^{\sigma(r)} + r_1^{\sigma(r)} \cdot m_c + \frac{(r_0^{\sigma(3)} - r_0^{\sigma(r)}) + (r_1^{\sigma(3)} - r_1^{\sigma(r)}) \cdot m_c}{723 - r_0^{\sigma} \cdot t_{Mf} + r_1^{\sigma} \cdot m_c} \cdot (723 - t_{отп}) \quad (7)$$

Аналогичным образом можно получить зависимость для определения зависимости временного сопротивления разрыву отпущенного мартенсита от температуры самоотпуска. Здесь следует учесть две особенности протекания процесса самоотпуска мартенсита связанные с тем, что структурные изменения в мартенсите протекают во времени, а их влияние на свойства стали зависят от температурного интервала самоотпуска.

Вопросы приведения среднemasсовой температуры проката и неизотермических условий отпуска мартенсита на холодильнике к эквивалентной температуре отпуска при изотермических условиях рассмотрены в работе [14].

Экспериментальные исследования взаимосвязи механических свойств закаленной стали от температуры отпуска показали практически линейное снижение временного сопротивления разрыву с увеличением температуры отпуска при температурах отпуска выше температуры завершения мартенситного превращения вплоть до температуры, соответствующей горячекатаному состоянию стали [11].

Механические свойства (временное сопротивление разрыву) отпущенного мартенсита при температуре завершения мартенситного превращения могут быть описаны регрессионной зависимостью (6), а при температуре  $A_1$  – зависимостью:

$$\sigma_{B(0)} = r_0^{\sigma(0)} + r_1^{\sigma(0)} \cdot m_c, \quad (8)$$

где  $\sigma_{в(о)}$  – временное сопротивление разрыву мартенсита отпущенного при температуре  $A_1$ ,  $r_0^{\sigma(о)}$ ,  $r_1^{\sigma(о)}$  – коэффициенты регрессии.

Тогда зависимость для расчета временного сопротивления разрыву при известной эквивалентной температуре отпуска принимает вид:

$$\sigma_{в(М)} = r_0^{\sigma(о)} + r_1^{\sigma(о)} \cdot m_c + \frac{(r_0^{\sigma(о)} - r_0^{\sigma(о)}) + (r_1^{\sigma(о)} - r_1^{\sigma(о)}) \cdot m_c}{723 - r_{0\_t_{Mf}}^{\sigma} + r_{1\_t_{Mf}}^{\sigma} \cdot m_c} \cdot (723 - \tilde{t}_{отп}) \quad (9)$$

На практике зависимость (8) удобнее получать для температуры ниже температуры  $A_1$ , но заведомо большей температуры самоотпуска проката на холодильнике. В этом случае в зависимости (9) следует подставлять вместо принятой температуры  $A_1$  ( $723^0\text{C}$ ) температуру при которой получена зависимость (9). Это же справедливо и для уравнения (5) и (7).

Таким образом, задача прогнозирования механических свойств (временного сопротивления разрыву) проката сводится к определению коэффициентов регрессии системы однопараметрических уравнений (4–6,8). Соответствующие исследования не требуют промышленных экспериментов, а могут быть выполнены в лабораторных условиях для проката, произведенного на объекте для которого создается модель.

Оценка коэффициентов регрессии для (4,7,8) и для температуры начала мартенситных превращений была проведена по данным работ [2,11,15,17–19,22–24]. Были получены следующие оценочные зависимости:

$$t_{Ms} = 510 - 470 \cdot m_c; \quad (10)$$

$$t_{Mf} = 400 - 500 \cdot m_c; \quad (11)$$

$$\sigma_{в(r)} = 330 + 800 \cdot m_c; \quad (12)$$

$$\sigma_{в(3)} = 700 + 3000 \cdot m_c; \quad (13)$$

$$\sigma_{в(о)} = 283 + 920 \cdot m_c \quad (14)$$

Подстановка полученных коэффициентов регрессии в (7,9) дает:

$$\sigma_{в(п-б)} = 330 + 800 \cdot m_c + \frac{370 + 2400 \cdot m_c}{323 + 500 \cdot m_c} \cdot (723 - t_{отп}); \quad (15)$$

$$\sigma_{в(М)} = 283 + 920 \cdot m_c + \frac{417 + 2080 \cdot m_c}{323 + 500 \cdot m_c} \cdot (723 - \tilde{t}_{отп}) \quad (16)$$

Графики зависимости (16) для различного содержания углерода приведены на рисунке.

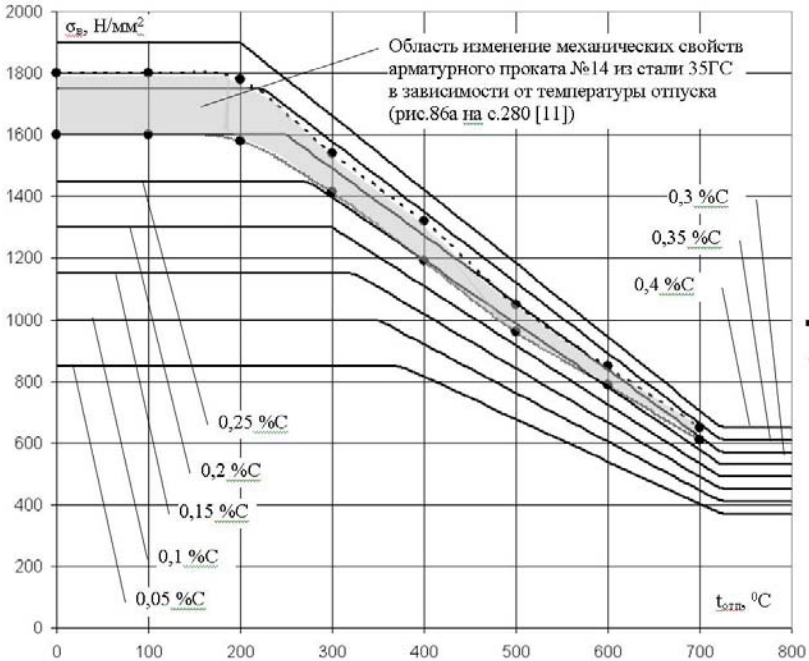


Рисунок – Расчетные и экспериментальные [11, рис.86а] зависимости временного сопротивления разрыву малоуглеродистой низколегированной стали от температуры самоотпуска при различном содержании (% по массе) углерода

Несмотря на оценочный характер зависимости (15), экспериментальные данные достаточно хорошо с ней согласуются. Так, экспериментальные зависимости изменения временного сопротивления разрыву проката из стали 35ГС от температуры самоотпуска, приведенные в [11], накрывают расчетную прямую для стали с содержанием углерода 0,3%. Несколько завышенные значения расчетного временного сопротивления разрыву по сравнению с экспериментальными данными объясняются, большим разбросом исходных данных, на основании которых была принята оценочная зависимость (13) для расчета временного сопротивления разрыву горячекатаного проката – временные сопротивления разрыву для одной марки стали с практически одинаковым содержанием углерода у разных авторов отличались до 200 Н/мм<sup>2</sup>. На наш взгляд, это связано с влиянием размера зерна аустенита на свойства горячекатаной стали. Из этого следует, что для разработки модели прогнозирования механических свойств под конкретную технологию прокатки, особое внимание следует уделить исследованию механических свойств горячекатаной стали, в частности, для проката различных профилирумеров.

Полученные результаты (см. рис.) подтверждают, что многофакторные линейные регрессионные модели прогнозирования механических свойств термоупрочненного проката могут считаться приемлемыми и быть использованы только при достаточно ограниченной области варьирования значащих факторов, тогда как предложенная методика прогнозирования механических свойств на основе системы частных регрессионных моделей обеспечивает удовлетворительную точность прогнозирования в широком диапазоне изменения параметров технологического процесса и минимизирует влияние особенностей технологических схем термомеханической обработки на уравнения регрессии.

1. *Арматурный прокат для железобетонных конструкций и изделий*: Справ. пособ. / Под ред. Ю.Т. Худика, А.В. Кекуха. – Кривой Рог, 2003. –115с.
2. *Высокопрочная арматурная сталь* / А.А. Кугушин, И.Г. Узлов, В.В. Калмыков и др. // М.: Металлургия, 1986. – с.272.
3. *Анализ термического упрочнения арматурной стали методами математической статистики* / Ю.Т. Худик, В.К. Федоренко, В.Я. Савенков и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1971. – №1. – С.36–38.
4. *Производство высокопрочной арматурной стали* / И.Г. Узлов, Ю.Т. Худик, А.В. Ивченко и др. // Бюл. «Черная металлургия». –1986. Вып.1(1005). –С.18–31.
5. *Управление процессом термического упрочнения арматурной стали в потоке прокатного стана* / В.А. Сацкий, Ю.Т. Худик, Л.А. Кузьменко и др. // Сталь. – 1977. – №1. –С.75–77.
6. *Совершенствование процесса термоупрочнения арматурного проката* / Н.А. Богданов, А.Б. Сычков, В.П. Ласков и др. // Сталь. –1992. – №5. –С.65–69.
7. *Производство арматурной стали при использовании трассы термоупрочнения с пониженным давлением воды* / Ю.В. Дьяченко, В.С. Тимофеев, В.Б. Закшевский и др. // Сталь. – 1998. – №11. –С.52–54.
8. *Прикладной регрессионный анализ* / Н. Дрейпер, Г. Смит . // Пер. с англ., науч. редак. Ю.П. Адлер, В.Г. Горский – М.: Статистика, 1973. – 392с.
9. *Планирование промышленных экспериментов* / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер – М.: Металлургия, 1974. –264с.
10. *Автоматизация управления процессом термомеханического упрочнения арматурного проката* / И.Г. Узлов, О.Г. Сидоренко, В.А. Шерemet и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – №5. –С.56–58.
11. *Термическое упрочнение проката* / К.Ф. Стародубов, И.Г. Узлов, В.Я. Савенков и др. – М.: Металлургия, 1970. –368с.
12. *Научные и технологические основы производства арматурных сталей нового поколения* / В.А. Вихлевщук, О.В. Дубина, В.А. Поляков и др. – К.: Наукова думка, 2001. –158с.
13. *Совершенствование режимов термоупрочнения стержневой арматурной стали* / Б.Б. Быхин, А.Т. Канаев, А.Ф. Кагушак и др. // Сталь. –1998. – №12. –С.46–48.
14. *Математическое моделирование маргенситных превращений в низкоуглеродистых сталях при закалке с самоотпуском* / В.Н. Куваев , В.Г. Раздобреев, Д.А. Иванов / «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. науч. тр.–ов ИЧМ НАНУ, Вып.6. – К.: Наукова думка, 2003. –С.319–325.

15. *Управляемое термическое упрочнение проката* / И.Г. Узлов, В.В. Парусов, Р.В. Гвоздев и др. – Киев: Тэхныка, – 1989. –118с.
16. *Гудремон Э. Специальные стали.* /Изд. 2–е сокращенное и перераб. Перев. с нем. Т.1. – М.: Металлургия, – 1966. –736с.
17. *Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов.* 6–е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, – 1986. –544с.
18. *Термическая обработка проката.* / И.Г. Узлов, В.Я. Савенков, С.Н. Поляков К.: Техніка, 1981. –159с.
19. *Соколовский П.И. Арматурные стали.* – М.: Металлургия, 1964. –208с.
20. *Технология термической обработки стали* / Б. Рейхард, Б. Зигфрид, Г. Гюнтер и др. / пер. с нем. – М.: Металлургия, 1981. –608с.
21. *Зависимость между магнитными и механическими свойствами термически упрочненной арматурной стали* / Г.С. Диниц, О.Н. Кукушкин, А.Г. Лисняк и др. / «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. науч. тр–ов ИЧМ НАНУ – К.: Наукова думка, 1995. –С.203–206.
22. *Математическое описание закономерностей превращения аустенита в изотермических условиях в низкоуглеродистых и низколегированных сталях* / А.В. Ноговицын, А.В. Богачева, М.Ф. Евсюков и др. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. науч. тр–ов ИЧМ НАНУ, Вып.3. – К.: «Наукова думка», 1999. –С.285–291.
23. *Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета–раствора в сплавах титана: Справочник термиста.* 3–е изд. перераб. и доп. А.Е. Попова, А.А. Попов / – М.: Металлургия, 1991. –503с.
24. *Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений* –2–е изд., перераб. и доп. / Л.С. Лившиц, А.Н. Хакимов // М.: Машиностроение, 1989. –336с.

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