

С.А. Мадатян, д-р техн. наук, проф.

ОАО НИЦ «Строительство»

Научно-исследовательский институт бетона и железобетона, г. Москва

А.И. Кауров, доц., e-mail: [kai-rb@yandex.ru](mailto:kai-rb@yandex.ru)

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ

УДК 691.87:691.714

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕМПЕРАТУРНОГО УПРОЧНЕНИЯ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ КЛАССА А<sub>т</sub>-1200 (А<sub>т</sub>-VII) ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

*Кооперативное взаимодействие системы «нагрузка + время + температура» приводит к изменениям характеристик физико-механических свойств и диаграммы деформирования стали как следствие деформационно-температурного упрочнения и реологических процессов. В данной работе механизм такого взаимодействия исследован на примере высокопрочной арматурной стали марки 30ХГС2 класса А<sub>т</sub>-1200 (А<sub>т</sub>-VII).*

*Экспериментально установлено, что при предварительном напряжении наблюдается существенное повышение характеристик сопротивления  $\sigma_{si}(\sigma_{0,05}; \sigma_{0,1}; \sigma_{0,2}$  и т.д.) стали малым пластическим деформациям.*

*Предложенный метод расчета деформационно-температурного упрочнения стали при аппроксимации диаграммы деформирования посредством многоинтервальной (сплайн) интерполяции носит универсальный характер и может быть использован для учета напряженно-деформированного состояния элементов конструкций при прочностных расчетах.*

**Ключевые слова:** арматурная сталь, предварительное напряжение, диаграмма растяжения стали, строительные конструкции.

S.A. Madatyan, D. Sc. Engineering, Prof.

A.I. Kaurov, Assoc. Prof.

## ASSESSMENT OF STRAIN & THERMAL HARDENING EFFECT OF REINFORCED STEEL A<sub>t</sub>-1200 (A<sub>t</sub>-VII) DURING PRESTRESSING

*Cooperative interaction of "load+time+temperature" leads to changes in physical and mechanical properties and in stress-deformation diagram for steel as a consequence of the strain-thermal hardening and rheological processes. In this paper, the mechanism of this interaction was investigated in terms of a high-strength reinforced steel 30HGS2 of 1200 At (At-VII) class.*

*It was established experimentally that during prestressing a significant increase of resistance characteristics was observed  $\sigma_{si}(\sigma_{0,05}; \sigma_{0,1}; \sigma_{0,2}$  etc.) which became small plastic deformation.*

*The proposed assessment method of the strain-thermal hardening of steel at a temperature approximation of the deformation diagram through a multi-shop (spline) interpolation is universal and can be used to account for the stress-strain state of structural elements in the strength calculations.*

**Key words:** reinforced steel, pre-stress, tension diagram of steel, building construction.

Кооперативное взаимодействие системы «нагрузка + время + температура» приводит к изменениям характеристик физико-механических свойств и диаграммы деформирования стали как следствие деформационно-температурного упрочнения и реологических процессов. В данной работе механизм такого взаимодействия исследован на примере термомеханически упрочненной арматурной стали класса А<sub>т</sub>-1200 (А<sub>т</sub>-VII) [1, 2], являющейся до настоящего времени наиболее высокопрочным из всех отечественных видов стержневой арматуры с условным пределом текучести  $\sigma_{0,2} \geq 1200$  Н/мм<sup>2</sup> и временным сопротивлением  $\sigma_u \geq 1450$  Н/мм<sup>2</sup>. Наряду с высокой прочностью исследуемая сталь обладает и высокой пла-

стичностью – фактическое относительное удлинение  $\delta_s \geq 9\%$  и  $\delta_p \geq 2,3\%$ , что существенно выше нормируемых величин.

Опытно-промышленные партии данной арматуры в полном сортаменте (диаметром 10...32 мм) впервые были прокатаны автором на Западно-Сибирском и Криворожском металлургических комбинатах из стали марок 30ХС2 и 30ХГС2.

Среднестатистическая диаграмма условно-мгновенного растяжения стали класса Ат-1200 (Ат-VII) в состоянии поставки как комплексная характеристика ее упруго-пластических свойств приводится на рисунке 1.

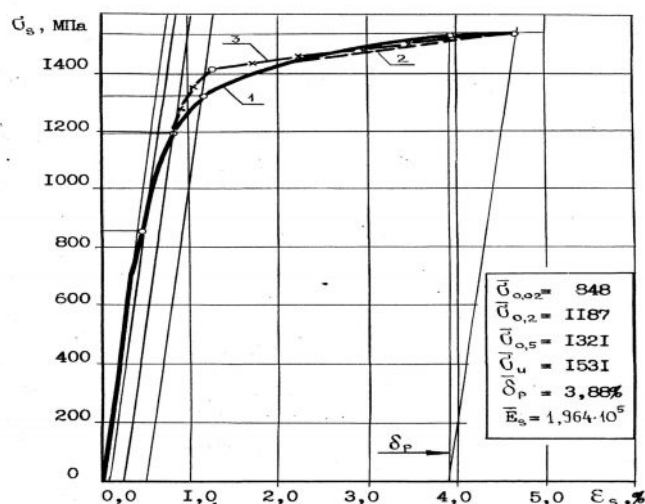


Рис. 1. Среднестатистическая диаграмма растяжения высокопрочной арматурной стали класса Ат-1200 (Ат-VII): 1 – опытная кривая; 2 – расчетная кривая по уравнениям (4) при 4 узлах интерполяции, соответствующих величинам  $\sigma_{el}; \sigma_{0,2}; \sigma_{0,5}; \sigma_u$ ; 3 – расчетная кривая по уравнениям (4) при 3 узлах интерполяции, соответствующих величинам  $\sigma_{el}; P\sigma_{0,2}; \sigma_u$

На основе обширного экспериментального материала установлено, что при предварительном напряжении наблюдается существенное повышение характеристик сопротивления  $\sigma_{si}$  ( $\sigma_{0,05}; \sigma_{0,1}; \sigma_{0,2}$  и т.д.) исследуемой стали малым пластическим деформациям.

Фрагмент результатов испытаний на кратковременное осевое растяжение исходных образцов стали и соответствующих им образцов, подвергнутых предварительному напряжению механическим способом на специальном силовом стенде, а также характерный вид «упрочненной» диаграммы на примере арматуры диаметром 25 мм приводятся в таблицах 1, 2 и на рисунке 2.

Таблица 1

Экспериментальные данные о влиянии предварительного напряжения на прочностные свойства арматурной стали класса Ат-1200 (Ат-VII) диаметром 25 мм

Предварительное напряжение $\sigma_{sp}$ , МПа	$\frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{0,2}^{sup}}$	Характеристики прочностных свойств, МПа											
		исходные						после выдержки под нагрузкой					
		$\sigma_{0,02}^{sup}$	$\sigma_{0,05}^{sup}$	$\sigma_{0,2}^{sup}$	$\sigma_{0,5}^{sup}$	$\sigma_u^{sup}$	$\eta_1^{sup}$	$\sigma_{0,02}^{exp}$	$\sigma_{0,05}^{exp}$	$\sigma_{0,2}^{exp}$	$\sigma_{0,5}^{exp}$	$\sigma_u^{exp}$	$\eta_1^{exp}$
564	~0,55	720	846	1047	1161	1345	0,483	824	901	1055	1159	1323	0,608
569		812	932	1097	1206	1360	0,594	839	929	1085	1194	1349	0,611
605		764	891	1105	1257	1423	0,478	879	969	1138	1263	1409	0,600
601		693	881	1105	1240	1403	0,452	835	937	1123	1248	1397	0,552
818	~0,75	779	918	1098	1246	1375	0,556	934	975	1123	1232	1373	0,645
816		622	810	1048	1195	1358	0,388	908	986	1109	1211	1361	0,701
1078	~0,95	873	935	1123	1242	1377	0,547	1140	1174	1228	1275	1375	0,883
1079		783	894	1080	1193	1355	0,538	1132	1212	1259	1282	1380	0,899
1048		829	935	1113	1258	1412	0,566	1134	1166	1223	1298	1412	0,874
1053		723	890	1111	1258	1415	0,464	1101	1148	1226	1306	1430	0,827

Экспериментальные значения средних относительных приращений характеристик прочностных свойств класса Ат-1200 (Ат-VII) диаметром 25 мм при предварительном напряжении

Характеристики прочностных свойств	Относительные приращения $\bar{\Delta}\sigma_i = \frac{\sigma_i - \sigma_i^{\text{sup}}}{\sigma_i^{\text{sup}}} \times 100\%$		
	при уровнях преднапряжения		
	$\frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{0,2}^{\text{sup}}} = 0,55$	$\frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{0,2}^{\text{sup}}} = 0,75$	$\frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{0,2}^{\text{sup}}} = 0,95$
$\bar{\Delta}\sigma_{0,02}$	13,33	32,94	41,06
$\bar{\Delta}\sigma_{0,05}$	5,32	13,97	28,71
$\bar{\Delta}\sigma_{0,2}$	1,07	4,05	11,54
$\bar{\Delta}\sigma_{0,5}$	~ 0,00	0,11	4,28
$\bar{\Delta}\sigma_u$	~ 0,00	~ 0,00	~ 0,00

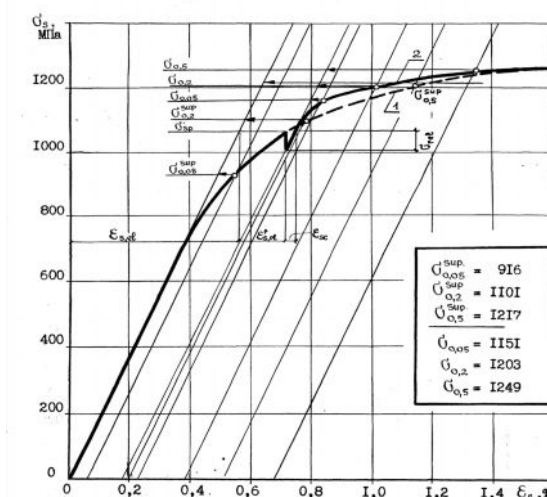


Рис. 2. Изменение диаграммы растяжения высокопрочной арматурной стали класса Ат -1200 (Ат -VII ): 1 – исходная диаграмма; 2 – «упрочненная» диаграмма

Выявленный эффект деформационно-температурного упрочнения носит при этом стабильный и закономерный характер, что позволило обосновать и экспериментально проверить возможность применения расчетного аппарата технической теории упрочнения [3] к арматурной стали класса Ат-1200 (Ат-VII).

Согласно результатам исследований в области теории пластичности и ползучести, современной металлофизики и теории прочности металлов пластические деформации относятся к классу термодинамических неравновесных процессов, характеризующихся конечным набором измеряемых макроскопических параметров и «историей» нагружения, и поэтому рассматриваются как диссипативное состояние [4]. На этом основании определение параметров  $\sigma_{si}$  «упрочненной» в результате преднапряжения диаграммы осуществляется исходя из условия:

$$\sum (\varepsilon_{s,pl_i} + \varepsilon_{s,pl_i}^p + \varepsilon_{sc} + \dots) = f(\sigma_s), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{s,pl}^p$  – условно-мгновенная пластическая деформация (УМПД) от преднапряжения;  $\varepsilon_{s,pl_i}$  – допуск на величину УМПД для искомого параметра  $\sigma_{s_i}$  (так, для  $\sigma_{0,2}$   $\varepsilon_{s,pl_i} = 0,002$  и т.п.);  $\varepsilon_{sc}$  – деформации ползучести;  $f(\sigma_s)$  – функция, описывающая исходную диаграмму УМПД.

При этом совместное влияние длительности действия нагрузки  $\tau$  и температурного воздействия  $T$  на параметры диаграммы растяжения стали оцениваются посредством деформаций ползучести  $\varepsilon_{sc}$ .

Деформации ползучести  $\varepsilon_{sc}$  при нормальной и повышенных температурах определяются по выражению:

$$\varepsilon_{sc} = A \frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{0,2}^{sup}} \left( \frac{\sigma_{sc}}{\sigma_{0,2}^{sup}} - B \right) \cdot (D + \lg \tau) \cdot (1 + c\Delta T), \quad (2)$$

где  $\sigma_{sp}$  – величина предварительного напряжения;  $\tau$  – время (ч) выдержки под нагрузкой;  $c$  – коэффициент линейного температурного расширения стали равный  $0,012^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\Delta T = T_i - 20^\circ\text{C}$  – превышение фактической температуры стали над нормальной;  $A, B, D$  – эмпирические коэффициенты для конкретного класса и марки стали.

Очевидно, что важным условием решения задачи в постановке (1) является выбор наиболее корректного способа аналитического описания диаграммы растяжения стали и оценка деформаций ползучести  $\varepsilon_{sc}$  при длительном действии нагрузки.

В рамках данной работы на основе многочисленных результатов испытаний на кратковременное осевое растяжение опытных образцов обоснована возможность использования для аппроксимации диаграммы растяжения стали класса Ат-1200 (Ат-VII) метода, основанного на использовании многоинтервальной (сплайн) интерполяции.

Обзор существующих многочисленных предложений различных авторов показывает, что многие из предлагаемых аппроксимирующих функций не носят универсального характера и могут быть использованы лишь в частном порядке для конкретных видов арматурных сталей. Ряд этих предложений к тому же отличает то обстоятельство, что их авторы стремились к чрезмерной простоте применения предлагаемых зависимостей в практике «ручных» расчетов с использованием минимума экспериментальных данных о механических свойствах стали, вследствие чего неизбежно увеличивается погрешность в приближении расчетных кривых к опытным.

Наиболее предпочтительными из числа рассмотренных являются предложения авторов [3, 5, 6, 7]. Сравнительный анализ этих предложений отображен на рисунке 3 и свидетельствует о более высокой степени приближения по методу сплайн-интерполяции с использованием подхода, принятого в работах [3, 5]. Сравнение опытной и расчетной по данному методу диаграмм исследуемой стали показывает, что на всем диапазоне  $0 \leq \sigma_s \leq \sigma_u$  диаграммы практически совпадают, незначительное расхождение на участке  $\sigma_{0,5} - \sigma_u$  не превышает 1,5%.

В нашем случае функция  $f(\sigma_s)$ , аппроксимирующая исходную диаграмму УМПД, представляется как сплайн-функция общего вида:

$$f(\sigma_s) = \sum_{i=1}^{N_i} m_i \left( \frac{\sigma_{si}}{\sigma_{0,2}} - \eta_i \right)^{n_i}, \quad (3)$$

где  $m_i, \eta_i, n_i$  – безразмерные параметры сплайна;  $N_i$  – номер интервала нелинейной части, на котором оценивается параметр  $\varepsilon_{spl}$ ;  $m_{s\xi} = \frac{\sigma_{si}}{\sigma_{0,2}}$  – относительный уровень загрузки стали.

Для высокопрочных сталей функция приближения (3) в развернутом виде записывается следующим образом:

$$\varepsilon_s = \begin{cases} \frac{\sigma_s}{E_s}, & 0 \leq \sigma_s \leq \sigma_{el} \\ \frac{\sigma_s}{E_s} + m_1 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_1 \right)^{n_1}, & \sigma_{el} \leq \sigma_s \leq \sigma_{0,2} \\ \frac{\sigma_s}{E_s} + m_1 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_1 \right)^{n_1} + m_2 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_2 \right)^{n_2}, & \sigma_{0,2} \leq \sigma_s \leq \sigma_{0,5} \\ \frac{\sigma_s}{E_s} + m_1 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_1 \right)^{n_1} + m_2 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_2 \right)^{n_2} + m_3 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_3 \right)^{n_3}, & \sigma_{0,5} \leq \sigma_s \leq \sigma_u. \end{cases} \quad (4)$$

Численный анализ функции (4) показывает, что ее первая  $f'(\varepsilon_s)$  и вторая  $f''(\varepsilon_s)$  производные при  $n_1 > 2$ ,  $n_2 > 2$ ,  $n_3 > 2$  непрерывны на всем заданном участке  $\sigma_{el} - \sigma_u$ . В связи с этим можно утверждать, что в узлах интерполяции слева и справа кривые будут иметь не только общую касательную, но и одинаковую кривизну.

Для высокопрочных сталей к тому же необходимо обеспечение условий выпуклости и монотонного возрастания кривой  $\sigma_s = f(\varepsilon_s)$ . Эти условия обеспечиваются при  $f'(\varepsilon_s) > 0$  и  $f''(\varepsilon_s) < 0$  и для предлагаемой функции (4) выполняются в случае:

$$\begin{aligned} m_1 n_1 (n_1 - 1) \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_1 \right)^{n_1 - 2} + m_2 n_2 (n_2 - 1) \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_2 \right)^{n_2 - 2} &> 0, \quad \sigma_{0,2} \leq \sigma_s \leq \sigma_{0,5}; \\ m_1 n_1 (n_1 - 1) \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_1 \right)^{n_1 - 2} + m_2 n_2 (n_2 - 1) \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_2 \right)^{n_2 - 2} + m_3 n_3 (n_3 - 1) \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_3 \right)^{n_3 - 2} &> 0, \quad (5) \\ \sigma_{0,5} \leq \sigma_s \leq \sigma_u. \end{aligned}$$

Конструкция сплайна в функции приближения (4) дана в общем виде, т.е. с переменными значениями всех коэффициентов, включая показатели степени  $n_i$ . Подбор этих коэффициентов осуществляется исходя из условий (5), что несколько усложняет расчет, но вместе с тем позволяет аппроксимировать диаграмму с любой необходимой для конкретной задачи точностью, вплоть до совпадения опытной и расчетной диаграмм.

Численный анализ системы (4) также показал, что сплайн-функция общего вида легко формализуется в различных вариантах, упрощенных и более удобных для конкретного практического применения, сохраняя при этом высокую точность приближения. Так, в данной работе в порядке численного эксперимента производилась аппроксимация опытной диаграммы исследуемой стали класса Ат-1200 (Ат-VII) сплайнами невысоких степеней с постоянными значениями коэффициентов степени  $n_i$ , а именно сплайном первого порядка, посредством квадратичной сплайн-интерполяции и кубическим сплайном. Анализ результатов показывает, что приближение нелинейной части диаграммы наиболее естественным образом обеспечивается при использовании кубического сплайна.

Расчетная диаграмма стали класса Ат-1200 (Ат-VII), приведенная на рисунке 1, получена как раз с использованием системы (4) при  $n_1 = n_2 = n_3 = 3$ , т.е. посредством кубического сплайна. Это значительно упрощает алгоритм решения, хотя и вызывает некоторую погрешность (в данном случае не более 1,5%), не превышающую допустимых в практике инженерных расчетов значений.

При задании функции  $f(\sigma_s)$  в виде кубического сплайна выражение (1) приобретает вид:

$$\sum (\varepsilon_{s,pl_i} + \varepsilon_{s,pl}^p + \varepsilon_{sc} + \dots) = m_1 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}^{\text{sup}}} - \eta_1 \right)^3 + m_2 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}^{\text{sup}}} - \eta_2 \right)^3 + m_3 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}^{\text{sup}}} - \eta_3 \right)^3, \quad (6)$$

где  $\sigma_{0,2}^{\text{sup}}$  – исходное (до преднапряжения) значение условного предела текучести.

Результаты определения основных параметров «упрочненной» (см. рис. 2) диаграммы класса Ат-1200 (Ат-VII) по выражению (6) приводятся в таблице 3 и свидетельствуют о высокой сходимости опытных и расчетных данных.

Таблица 3

Сравнение опытных и расчетных по формуле (6) параметров упрочненной при предварительном напряжении диаграммы растяжения стали класса Ат-1200 (Ат-VII)

Предварительное напряжение $\sigma_{sp}$ , МПа	$\frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{0,2}^{\text{sup}}}$	Параметры «упрочненной» диаграммы (расчетные значения), МПа			Величина расхождения расчетных и опытных значений, %		
		$\sigma_{0,05}^{\text{calc}}$	$\sigma_{0,2}^{\text{calc}}$	$\sigma_{0,5}^{\text{calc}}$	$\frac{\sigma_{0,05}^{\text{exp}} - \sigma_{0,05}^{\text{calc}}}{\sigma_{0,05}^{\text{calc}}}$	$\frac{\sigma_{0,2}^{\text{exp}} - \sigma_{0,2}^{\text{calc}}}{\sigma_{0,2}^{\text{calc}}}$	$\frac{\sigma_{0,5}^{\text{exp}} - \sigma_{0,5}^{\text{calc}}}{\sigma_{0,5}^{\text{calc}}}$
564	~0,55	862	1053	1162	4,52	0,19	- 0,26
569		941	1100	1207	- 1,28	- 1,36	- 1,08
601		902	1114	1241	3,88	0,81	0,56
818	~0,75	978	1126	1255	- 0,31	- 0,27	- 1,83
816		955	1111	1211	3,25	- 0,18	0,00
1078		1156	1216	1268	1,56	0,99	0,55
1048	~0,95	1123	1209	1294	3,82	1,16	0,31
1053		1140	1221	1290	0,70	0,41	1,24

Как видно из таблицы 3, средние величины относительного превышения опытных значений над расчетными составляют:  $\bar{\Delta}\sigma_{0,05} = 2,02\%$ ;  $\bar{\Delta}\sigma_{0,2} = 0,22\%$ ;  $\bar{\Delta}\sigma_{0,5} = -0,06\%$ .

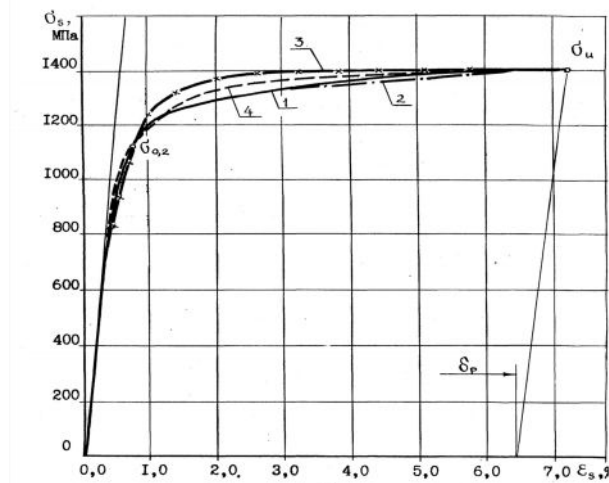


Рис. 3. К аналитическому описанию диаграммы растяжения высокопрочной арматурной стали класса Ат-1200 (Ат-VII) на примере диаметра 25 мм: 1 – опытная кривая; 2 – расчетная по формуле (4) при  $n_1=n_2=n_3=3$ ; 3 – расчетная по работе [6]; 4 – расчетная по работе [7]

Таким образом, экспериментально выявленный эффект деформационно-температурного упрочнения стали класса Ат-1200 (Ат-VII) достоверно оценивается с использованием расчетного аппарата, основу которого составляет выражение (1), при аппроксимации исходной и «упрочненной» диаграмм деформирования посредством многоинтервальной (сплайн) интерполяции.

Предложенный метод носит универсальный характер и может быть использован при прочностных расчетах предварительно напряженных конструкции с другими видами арматурной стали.

## Библиография

1. *Кауров А.И.* Новая высокопрочная арматурная сталь класса Ат-VII диаметром 10...25 мм – свойства, особенности работы в предварительно напряженном железобетоне // *Бетон и железобетон.* – 1990. – № 6. – С. 11–13.
2. *Кауров А.И.* Механические свойства и диаграмма растяжения новой термомеханически упрочненной арматурной стали класса Ат-VII марки 30ХГС2 // Сб. науч. тр. «Повышение качества и эффективности применения бетона и железобетонных изделий и конструкций» / НИИЖБ. – М., 1988. – С. 58–62.
3. *Мадатян С.А.* Арматура железобетонных конструкций. – М.: Воентехлит, 2000. – 256 с.
4. *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж. и др.* Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
5. *Байков В.Н., Мадатян С.А., Дудолодов Л.С. и др.* Об уточнении аналитических зависимостей диаграмм растяжения арматурных сталей // *Известия вузов. Строительство и архитектура.* – 1983. – № 9. – С. 1–5.
6. *Карпенко Н.И., Махамедиев Т.А., Петров А.Н.* Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Сб. науч. тр. «Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций» / НИИЖБ. – М., 1986. – С. 7–25.
7. *Мамедов Т.И.* Расчет прочности нормальных сечений элементов с использованием диаграммы арматуры // *Бетон и железобетон.* – 1988. – №8. – С. 22–25.

## Bibliography

1. *Kaurov A.I.* A new highly strengthened reinforced steel of Ат-VII class by the diameter of 10... 25 mm – properties, the peculiarities of work in prestressed concrete // *Beton i zhelezobeton (Concrete and reinforced concrete).* – 1990. – N 6. – P. 11–13.
2. *Kaurov A.I.* Mechanical properties and the tension diagram of the new thermo-mechanically reinforced steel of Ат-VII class 30ХГС2 brand // *Collection of scientific works «Improving the quality and effectiveness of concrete and concrete products and structures» / Concrete and Reinforced Concrete Research Institute.* – М., 1988 –P. 58–62.
3. *Madatyany S.A.* Steel reinforcement of concrete elements. – М.: Voentehlit, 2000. – 256 p.
4. *Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Y. et al.* Synergetics and Fractals in Material Science. – М.: Nauka, 1994. – 384 p.
5. *Baikov V.N., Madatyany S.A., Dudoladov L.S. et al.* About specification of analytical dependences of charts of reinforced steels stretching // *News of higher educational institutions. Construction.* – 1983. – N 9. – P. 1–5.
6. *Karpenko N.I., Mahamediev T.A., Petrov A.N.* The initial and transformed charts of deformation of concrete and reinforcing // *Collection of scientific works «The stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures» / Concrete and Reinforced Concrete Research Institute.* – М., 1986. – P. 7–25.
7. *Mamedov T.I.* Calculation of durability of normal sections of elements with use of the fittings chart // *Beton i zhelezobeton (Concrete and reinforced concrete).* – 1988. – N 8. – P. 22–25.