

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

С. С. ДЖАНАЗЯН

О РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ НОВЫХ ВИДОВ СТЕРЖНЕВОЙ  
АРМАТУРЫ КЛАССА А—IV\*

За последние годы проблеме совершенствования высокопрочной стержневой арматуры уделяется большое внимание. Из горячекатаных сталей для предварительно напряженных конструкций, в основном, применяется сталь класса А—IV, единственным представителем которого до последнего времени была сталь марки 30ХГ2С. Однако эта сталь из-за ряда недостатков снята с производства, и взамен нее выпускаются горячекатаные свариваемые стали марок 20ХГСТ (легированная титаном), 20ХГ2Ц (легированная церконием) и 20ХГ2Ф (легированная ванадием), а также несвариваемые углеродистые стали марок 65ГС и 80С. Эти стали имеют браковочный минимум предела текучести—6000 кг/см<sup>2</sup>, предела прочности—9000 кг/см<sup>2</sup> и относительные удлинения не менее 6%.

Все новые марки сталей не имеют физического предела текучести и обладают, как правило, заниженным пределом упругости. Поэтому ползучесть таких сталей начинает проявляться уже задолго до достижения напряжений, соответствующих пределу текучести  $\sigma_{0.2}$ . В связи с этим обстоятельством, изучение явлений ползучести и релаксации напряжений в арматурных сталях приобретает важное значение. Исследованиями в этой области у нас в стране и за рубежом начали заниматься сравнительно недавно и, поэтому, данные по реологическим свойствам высокопрочной стержневой арматуры весьма ограничены.

Результаты испытаний на релаксацию при повышенных  
температурах

Испытания на релаксацию проводились на рычажной машине конструкции НИИЖБ. 100 часовые потери напряжений для стали марки 20ХГСТ приведены в табл. 1. Температура 100°С соответствует температуре пропарочной камеры, а 100°С, с некоторым приближением, можно принять для случая автоклавной обработки изделий. Однако потери напряжения при температуре 100°С и 200°С нельзя механически принимать как потери, происходящие в арматуре от релаксации в

\* Работа выполнена под руководством Н. М. Мулина.

процессе пропарки и автоклавной обработки. Как увидим дальше, фактические потери отличаются от потерь, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

$\sigma_0$ (кг/мм <sup>2</sup> )	Потери напряжения кг/мм <sup>2</sup>				Потери напряжения в % от $\sigma_0$			
	20°С	50°С	100°С	200°С	20°С	50°С	100°С	200°С
40	1,4	1,9	3,5	7,0	3,2	4,75	8,7	17,5
50	1,8	3,4	5,5	13,5	3,6	6,8	11,0	27,0
60	3,1	5,4	9,5	16,3	5,2	9,0	15,8	27,1
70	5,0	6,4	14,5	—	7,2	9,15	20,8	—

Наиболее интенсивное падение напряжения от релаксации происходит в интервале температур 100°С–200°С. Если с изменением температуры от 20°С до 100°С для начальных напряжений 40 кг/мм<sup>2</sup>, 50 кг/мм<sup>2</sup> и 60 кг/мм<sup>2</sup> наблюдается увеличение потерь соответственно на 2,1 кг/мм<sup>2</sup>, 3,7 кг/мм<sup>2</sup> и 6,3 кг/мм<sup>2</sup>, то с изменением температуры от 100°С до 200°С потери увеличиваются соответственно на 3,5 кг/мм<sup>2</sup>, 8,0 кг/мм<sup>2</sup> и 6,7 кг/мм<sup>2</sup>. Для начального напряжения  $\sigma_0 = 50$  кг/мм<sup>2</sup> потери напряжения при температуре 200°С составляют 27% от величины  $\sigma_0$ . Это говорит о том, что потери предварительного напряжения при пропарке и автоклавной обработке могут достигать значительных размеров и поэтому требуют особого конкретного рассмотрения в зависимости от технологии изготовления конструкций.

### Результаты испытаний на ползучесть

Испытание на ползучесть проводилось на рычажной машине конструкции НИИЖБ. Резкое увеличение ползучести наблюдается при напряжениях 60 кг/мм<sup>2</sup> и 70 кг/мм<sup>2</sup>. В табл. 2 приводятся результаты экспериментов по ползучести при  $T \approx 20^\circ\text{C}$ .

Таблица 2

$\sigma_0$ кг/мм <sup>2</sup>	Время испытаний в часах	Деформация ползучести $\epsilon \times 10^4$				
		20ХГСТ плавка 04706	20ХГ2Ф		20ХГ2Н плавка 67881	80С плавка 02254
			плавка 29223	плавка 39503		
30	100	—	60	—	33	—
40	100	75	130	132	75	10
	1000	124	—	200	—	—
50	100	140	195	165	160	30
	1000	195	—	250	—	—
60	100	335	330	255	210	270
	1000	450	—	355	—	—
70	100	610	—	380	—	—
	1000	815	—	525	—	—

Отношение 100 часовых деформаций к 1000 часовым для стали марки 30ХГ2Ф при напряжениях 40 кг/мм<sup>2</sup>; 50 кг/мм<sup>2</sup>; 60 кг/мм<sup>2</sup> и 70 кг/мм<sup>2</sup> соответственно составляет—0,65, 0,66, 0,70 и 0,71. Для стали марки 20ХГСТ—0,60; 0,74; 0,75 и 0,75. Если сравнить приведенные отношения с соответствующими отношениями 100 часовых потерь к 1000 часовым для случая релаксации, то заметно, что величины этих отношений для ползучести меньше и, что с увеличением напряжения, для случая ползучести, наблюдается более медленное возрастание величины отношения. Этим подтверждается тот факт, что процесс ползучести меньше склонен к затуханию, чем процесс релаксации.

### Моделирование работы арматуры в конструкции

В настоящее время, почти, все массовые предварительно напряженные конструкции изготавливаются с тепловой обработкой. Процесс релаксации в арматуре таких конструкций значительно сложнее, чем в до сих пор рассмотренных случаях. Для того, чтобы иметь возможность смоделировать случай потерь напряжения от релаксации в арматуре предварительно напряженных конструкций, подвергающихся пропариванию, нами был изготовлен специальный тензометр из кварцевых трубок. С помощью такого прибора нам удалось дифференцировать деформации ползучести, вызванные повышенной температурой и деформации, зависящие от коэффициента линейного расширения и, таким образом, замерить потери от релаксации напряжений в арматуре.

Эксперимент производился в следующей последовательности. Образец загружался до заданного начального напряжения при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  и испытывался на релаксацию в течение двух-четырех часов, затем включалась печь и производился подъем температуры до  $T = 100^{\circ}\text{C}$  по режиму: 4 часа подъем температуры, 10 часов выдержки при  $T = 100^{\circ}\text{C}$  и 4 часа спуск температуры до 20 С. Параллельно испытывались идентичные образцы при постоянной температуре  $T = 105^{\circ}\text{C}$  по методике испытаний при повышенных температурах.

Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Марки сталей и температурный режим		Потери напряжения за 22 часа в	
		кг/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_0$
ЮС $\sigma_0 = 60 \text{ кг/мм}^2$	100 С	3,17; 3,22	5,28; 5,37
	20° — 100° — 20°	8,9; 11,9	14,8; 19,8
20ХГ2П $\sigma_0 = 50 \text{ кг/мм}^2$	100 С	4,65; 4,88	9,3; 9,75
	20° — 100° — 20°	7,34	14,7
	175°С	10,0	20,0
	20° — 175° — 20°	11,3; 14,25	22,6; 28,5

Поскольку основной целью предварительного напряжения является отдаление момента образования трещины (увеличение трещиностойкости конструкции), нами было исследовано также влияние потерь предварительного напряжения от релаксации на момент образования трещины в изгибаемых элементах. С этой целью нами были изготовлены предварительно напряженные и простые железобетонные балки, армированные сталью марки 20ХГ2Ф (плавка 29223). Напрягалась только арматура растянутой зоны. Всего изготовлено и испытано 16 балок таврового и прямоугольного сечений. Предварительное напряжение осуществлялось до  $\sigma_0 = 60 \text{ кг/мм}^2$ . У определенного количества балок практически потери предварительного напряжения в арматуре от релаксации были ликвидированы путем неоднократных подтяжек до заданных напряжений и длительной выдержки под этими напряжениями. Бетонирование этой серии балок производилось только после полного прекращения процесса релаксации в арматуре.

Другая часть балок была забетонирована непосредственно после натяжения арматуры, в которой, в процессе бетонирования и твердения бетона происходила потеря предварительного напряжения от релаксации. Натяжение арматуры всех балок производилось механическим способом. Контроль усилия в напрягаемой арматуре осуществлялся кольцевыми динамометрами. Расчетная марка бетона была принята равной 300, но после испытания контрольных кубиков был зафиксирован разброс в марках бетонов разных серий балок в сторону увеличения прочности бетона.

Испытания балок, с доведением их до разрушения, производились приложением двух сосредоточенных сил в четвертях пролета. Как показало сопоставление экспериментальных данных, моменты образования трещины зависят от величины потерь предварительного напряжения от релаксации. В предварительно напряженных балках прямоугольного сечения разница в моментах образования трещины, в результате потерь напряжения от релаксации, не так велика, как в балках таврового сечения. Трещины в прямоугольных балках появились при более высоких нагрузках, сравнительно с идентичными балками таврового сечения. В балках с ненапрягаемой трещины появились уже в начале испытаний. Как и следовало ожидать потери предварительного напряжения, а также и само предварительное напряжение на прочность балок не повлияли. В основном, разрушение балок происходило из-за развития пластических деформаций в арматурной стали при напряжениях близких к  $\sigma_{0.2}$ , что привело к последующему разрушению бетона в сжатой зоне.

#### Приближенный метод перехода от ползучести к релаксации

Приведенные нами исследования по ползучести показали, что у всех новых марок сталей класса А—IV ползучесть является целинейной.

Известно также, что почти все высокопрочные арматурные стали не имеют физического предела текучести и обладают сравнительно низкими пределами упругости, что весьма ограничивает область возможного применения формул линейной ползучести. Для низколегированных сталей эта область приблизительно находится в пределах 30% и 40% от напряжения, соответствующего временному сопротивлению разрыву. Автор полагает, что для таких сталей можно в зоне пластических деформаций пользоваться модулем деформаций, вместо модуля упругости и аналогично тому, как это делается для бетона [1] воспользоваться уравнением:

$$E_d = E_a \nu_a \tag{1}$$

где  $E_d$  — секущий модуль деформации;  $E_a$  — модуль упругости;  $\nu_a = \frac{\sigma_{упр.}}{\varepsilon_{полн.}}$ .

На рис. 1 показано изменение модуля деформации во времени. За время  $t$  секущий модуль деформации перемещается из положения  $OI$  в положение  $OM$ . Допустим, что пластической деформации  $IM$  соответствует потеря напряжения, соответствующая отрезку  $IN$ . Тогда модуль деформаций для точек  $M$  и  $N$  будет один и тот же. Напряжение в любой момент времени  $t$  можно записать в виде

$$\sigma_t = \varepsilon_t \cdot \nu(t) \cdot E_a \tag{2}$$

Для случая релаксации уравнение (2) примет вид

$$\sigma_t = \varepsilon_0 \cdot \nu(t) \cdot E_a \tag{3}$$

где  $\varepsilon_0 = \text{const}$  полная деформация полученная в процессе кратковременного нагружения;

$\nu(t) = \frac{\varepsilon_{упр.}}{\varepsilon_{полн.}}$ ;  $\varepsilon_{полн.}$  — полная деформация в момент времени  $t$ .  
Потери напряжений от релаксации за время  $t$  будут равны:

$$\sigma_n = \sigma_0 - \sigma_t = \varepsilon_0 \nu_0 E_a - \varepsilon_0 \nu(t) E_a = \varepsilon_0 [\nu_0 - \nu(t)] E_a \tag{4}$$

где  $\nu_0$  — начальный коэффициент упругости, не зависящий от времени

Для прямолинейного участка диаграммы растяжения стали  $\nu_0 = 1$ .

$$\sigma_n = \varepsilon_0 [1 - \nu(t)] \tag{5}$$

Уравнение (5) идентично следующему уравнению полученному К. В. Михайловым [2] из выражения линейной ползучести

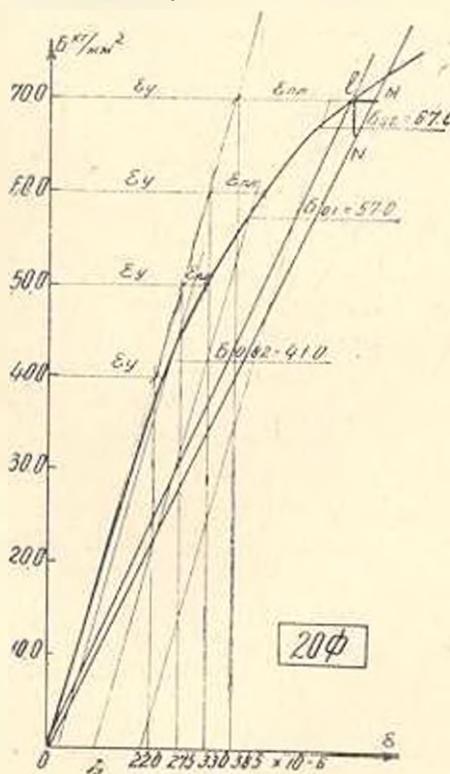


Рис. 1.

$$\sigma_n = \sigma_0 \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (6)$$

где  $\alpha = \frac{\varepsilon_{пл.}}{\varepsilon_{упр.}}$ .

В результате совпадения уравнений (5) и (6) при  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{упр.}$  можно предположить, что прямолинейный участок диаграммы стали  $\sigma - \varepsilon$  можно описывать уравнениями линейной ползучести.

Уравнение (5) можно записать в следующем виде:

$$\sigma_n = \sigma_0 \lambda_{полз.} \quad (7)$$

где  $\lambda_{полз.} = \frac{\varepsilon_{полз.}}{\varepsilon_{полз.}}$  — определяется по кривым ползучести.

На рис. 2 показаны кривые релаксации, полученные по формуле (7), и там же нанесены экспериментальные данные по релаксации на-

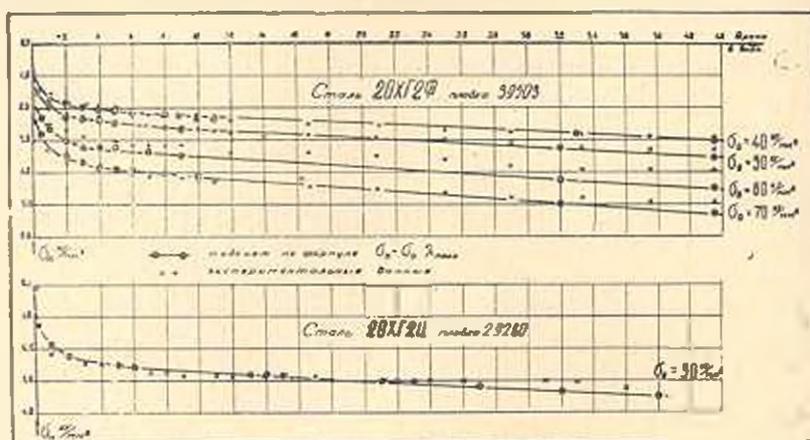


Рис. 2.

пряжений. На рис. 3 и 4 показаны кривые подсчетов по формуле (7) и экспериментальные кривые 100 часовых потерь от релаксации. Как

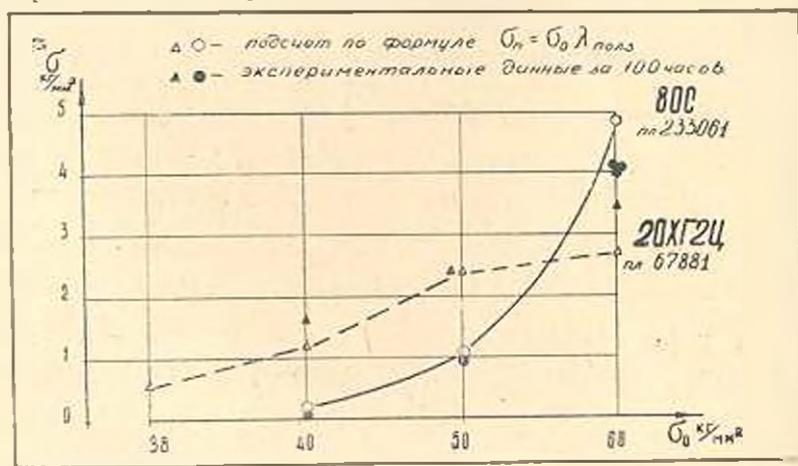


Рис. 3.

видно из графиков, расчетные потери с достаточной точностью согласуются с экспериментальными.

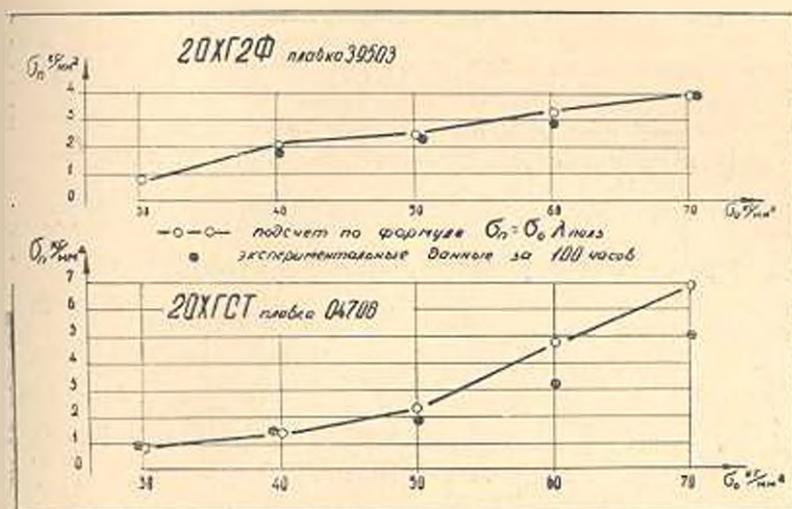


Рис. 4.

В результате исследования реологических свойств стержневой арматуры класса А—IV марок 20ХГ2Ц, 20ХГСТ, 20ХГ2Ф, 65ГС и 80С можно сделать следующие выводы:

1. Ползучесть и релаксация напряжений не прекращаются за время 1000 часовых испытаний как при нормальной, так и при повышенных температурах.

2. Углеродистые стали марок 65ГС и 80С имеют большую релаксационную стойкость, чем низколегированные стали.

3. Предельные деформации ползучести в первом приближении при  $30 \text{ кг/мм}^2 < \sigma < 60 \text{ кг/мм}^2$  можно определить по существующим формулам с измененными коэффициентами:

а) для сталей марок 20ХГ2Ц, 20ХГСТ и 20ХГ2Ф

$$\varepsilon_{100}^0 = \frac{0,42}{\sigma_b - \sigma} ;$$

б) для стали марки 80С

$$\varepsilon_{100}^0 = \left( \frac{\sigma}{0,53\sigma_{0,2}} - 1 \right)^2 .$$

4. Потери напряжений в арматуре предварительно напряженных ж. б. конструкциях от релаксации (исключая конструкции изготовленные агрегатно-ноточным методом с тепловой обработкой) рекомендуется определять по формулам

$$\sigma_t = \sigma_0 \cdot \lambda_{полз} \text{ кг/мм}^2$$

а) для низколегированных сталей

$$\lambda_{полз} = \frac{0,42 \sigma_0}{1000\varepsilon_0(\sigma_b - \sigma_0) + 0,42\sigma_0} ;$$

б) для стали марки 80С

$$\lambda_{\text{пол.з.}} = \frac{1}{\frac{\varepsilon_0}{1000 \left( \frac{\sigma_0}{0,53\sigma_{0,2}} - 1 \right)^2} + 1}$$

где  $\sigma_0$  — начальное напряжение;  $\sigma_2$  — временное сопротивление разрыву;  $\varepsilon_0$  — полная начальная деформация при кратковременном нагружении стали до величины  $\sigma_0$ . Скорость нагружения  $0,3 - 1,6 \frac{\text{кг.м.м}^2}{\text{сек.}}$ .

Величина  $\varepsilon_0$  берется из диаграммы растяжения стали ( $\sigma - \varepsilon$ ).

НИИЖБ

Поступило 28.V 1964

И. И. ԶԱՆԻՉԱՆ

#### Ա.—IV ԿՐԻՐ ԵՈՒ ՏԵՍՈՒԻ ԶՈՂԱՅԻՆ ԱՐԴԱՆԻ ԻՆՈՂՈՂԻՍԱԿԱՆ ՀՍՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

##### Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում բերվում են նոր տեսակի պողպատների բնական նմուշների սողքի և լարումների ուղղակի առարկայի ուսումնասիրման մեթոդիկան սենյակային բարձրացված և հաստատուն փոփոխական ջերմաստիճանների ղեկարում: Բերվում են պողպատների սողքի և ուղղակի առարկայի փորձարկումների տվյալներ, սենյակային և բարձր ջերմաստիճանների ղեկարում: Շարադրվում է մեթոդիկան և փորձերի արդյունքները, որոնք մոդելացնում են ամրանի աշխատանքը կոնստրուկցիայում. ինչպես նաև որոշ հարցեր. կապված ուղղակի առարկայի հետևանքով լարումների կորուստի հետ՝ էլեմենտների ճարակայունության վրա: Առաջարկվում է մոտավոր մեթոդ սողքի կորերից ուղղակի առարկայի կորերի անցման, ինչպես նաև դժային սողքի համար:

Տրվում են առաջարկություններ ամրանի մեջ առարկեր տեխնոլոգիայով պատրաստված կոնստրուկցիաներում լարման անկումը ուղղակի առարկայի հաշվի առնելու համար:

##### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мурашев В. И., Сигалов Э. Е., Байков В. Н. Железобетонные конструкции. Госиздат, 1962.
2. Михайлов К. В., Гао Бо-Ли. Исследования реологических свойств семипроволочных прядей. Гр. НИИЖБ, вып. 26. Гостройиздат, 1962.