

А. М. СИМОНЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ
И ВЛИЯНИЯ ЕЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ГОРЯЧЕКАТАННОЙ СТАЛИ

Исследования были проведены на образцах стали 35ГС, имеющей следующие механические свойства: предельное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{вр}} = 7800 \text{ кг/см}^2$, модуль упругости $E = 2,18 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$. Химический состав: $C = 0,37\%$, $Mn = 1,10\%$, $Si = 0,87\%$, $S = 0,043\%$, $P = 0,035\%$.

О методике исследований

Исследования на ползучесть производились на машине типа Zst 502.10 Рауэнштейн (ГДР).

Нагрузка на испытуемый образец передается посредством навинченных на него зажимов с помощью штучных грузов, подвешенных к нижнему зажиму через двухступенчатое рычажное устройство с передаточным числом 1:50. Образец и прилегающие к нему части зажимов находятся внутри подвешенной электрической печи, в которой можно получать температуру до 900°C с точностью $\pm 4^\circ\text{C}$ (при низких температурах — ниже 300°C — точность падает). Взаимное положение двух измерительных шин, жестко закрепленных соответственно на двух выступах образца, указывается на экране и читается с помощью спирального микроскопа с ценой деления 1 микрон.

Факт выпиливания образцов из прутка $\varnothing 16 \text{ мм}$ горячекатанной стали отразится на их прочности не более $1,75\%$. [1].

Для определения исходного модуля упругости E применялся обычный статический метод для разных напряжений, примененный ко всем испытанным образцам.

В случае испытаний при 100°C и 200°C колебания температуры от автоматических включений и выключений печи значительно отражаются на деформациях образца. Для учета этого явления при определении деформаций ползучести до нагружения образца устанавливалась диаграмма деформаций от температурных колебаний во времени в зависимости от момента периодического включения печи.

Нагружение образца при испытании на ползучесть осуществлялось в течение 1 минуты, и все остаточные деформации за это время относились к пластическим. Показания были сняты до нагружения,

сразу после нагружения и затем через 1 мин, 3 мин, 5 мин, 10 мин, 15 мин, 20 мин, 25 мин, 30 мин, 40 мин, 50 мин, 1 ч, 1 ч 10 мин, 1 ч 20 мин, 1 ч 30 мин, 2 ч, 2 ч 30 мин, 3 ч, 3 ч 30 мин, 4 ч после нагружения. Кроме того отмечались моменты включения печи в случае испытания при 100°C и 200°C, а деформации ползучести в этом случае были определены путем наложения показаний испытаний и показаний от колебаний температуры, снятых до нагружения.

После остывания в печи у каждого испытанного образца определялся модуль упругости при тех же условиях, что и до испытания на ползучесть. Кроме того для каждого испытанного на ползучесть образца была определена диаграмма растяжения на разрывной машине типа ЗЭМ 10/91 Рауэнштейн со скоростью деформации 4%/мин.

Испытания проводились на 120 образцах. Для каждой комбинации температур и напряжений (табл. 1) испытывались минимум по 4 образца.

Таблица 1
Комбинации нагрузок и температур, принятые для испытаний

Температура в °C	Принятые нагрузки в долях от $\sigma_{вр}$				
20	0,5	0,6	0,7	0,8	
100	0,4	0,5	0,6	0,7	
200	0,3	0,4	0,5	0,6	
300	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
400	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
500	0,1	0,2	0,3		

Номера комбинаций нагрузок и температур в дальнейшем обозначены двумя числами, первое из которых соответствует температуре испытания, а второе — нагрузке в долях от сопротивления разрыву $\sigma_{вр}$.

Результаты испытания на ползучесть

Весьма широкий диапазон нагрузок, выбранный для испытания на ползучесть, позволяет получить принципиальные свойства у данной стали.

Общие результаты испытания на ползучесть приведены в табл. 2, где деформации ползучести даны в долях от четырехчасовой. (Ползучесть показана графически на фиг. 1).

В результате проведенных экспериментальных исследований мы приходим к следующим заключениям.

1. Величина деформаций ползучести тем больше, чем меньше разница между напряжением пластического течения при соответствующей температуре и напряжением ползучести (напряжением, при котором производится испытание на ползучесть). С повышением температуры зависимость эта угасает.

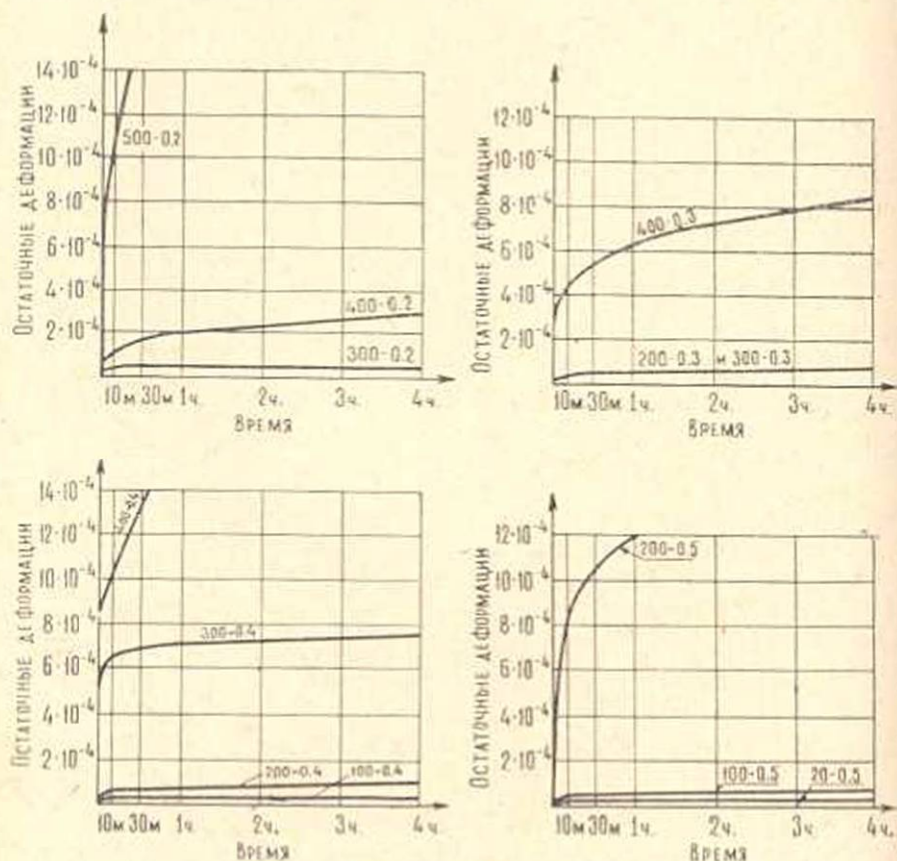
Таблица 2

Результаты испытания стали 35 ГС на ползучесть

Номер комбинации	Пластина деформация в 10^{-5}	Деформация ползучести за 4 ч в 10^{-5}	Общая остаточная деформация в 10^{-5}	Ползучесть в долях от 4-часовой							Показатель точности %
				Скорость ползучести в $10^{-5}/\text{мин}$							
				1 мин	5 мин	10 мин	30 мин	1ч	2ч	4ч	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20-0,5	0,0	1,5	1,5	0,333 0,5	1,000 0,01	1,000 0,00	1,000 0,00	1,000 0,00	1,000 0,00	1,000 0,00	19,2
20-0,6	153,0	465,0	618,0	0,039 18,0	0,146 12,0	0,275 12,3	0,905 5,3	0,955 0,3	0,980 0,12	1,000 0,07	—
20-0,7	1561,0	152,0	1713,0	0,25 38,0	0,467 4,1	0,557 2,3	0,730 0,75	0,828 0,32	0,927 0,15	1,000 0,07	5,8
20-0,8	2704,0	190,0	2894,0	0,163 31,0	0,395 5,34	0,500 3,35	0,695 1,04	0,789 0,48	0,894 0,25	1,000 0,12	29,4
100-0,4	0,5	3,0	3,5	0,333 1,0	0,667 0,1	0,800 0,05	0,867 0,01	0,933 0,005	1,000 0,005	1,000 0,00	24,7
100-0,5	2,0	4,0	6,0	0,259 1,0	0,500 0,1	0,625 0,065	0,725 0,03	0,825 0,01	0,900 0,005	1,000 0,005	7,75
100-0,6	933,0	11,0	944,0	0,182 2,0	0,364 0,5	0,445 0,3	0,635 0,05	0,800 0,02	0,910 0,01	1,000 0,008	9,8
100-0,7	1669,0	13,0	1682,0	0,154 2,0	0,461 0,5	0,615 0,3	0,770 0,05	0,846 0,025	0,925 0,011	1,000 0,008	6,4
200-0,3	1,0	6,0	7,0	0,067 0,4	0,334 0,25	0,400 0,06	0,567 0,04	0,717 0,017	0,885 0,005	1,000 0,004	14,9
200-0,4	2,0	7,0	9,0	0,286 2,0	0,400 0,22	0,515 0,1	0,685 0,035	0,785 0,017	0,900 0,007	1,000 0,005	14,1
200-0,5	14,0	123,0	137,0	0,138 17,0	0,464 4,55	0,560 1,8	0,748 0,75	0,860 0,42	0,925 0,23	1,000 0,12	17,5
200-0,6	760,0	42,0	802,0	0,119 5,0	0,381 1,65	0,438 0,62	0,552 0,375	0,739 0,143	0,880 0,054	1,000 0,025	16,6
300-0,2	0,0	5,0	5,0	0,200 1,0	0,440 0,23	0,600 0,1	0,800 0,01	0,840 0,005	0,900 0,005	1,000 0,003	20,4
300-0,3	0,5	6,5	7,0	0,154 1,0	0,369 0,23	0,477 0,13	0,646 0,054	0,785 0,021	0,908 0,006	1,000 0,004	5,12
300-0,4	47,0	28,0	75,0	0,214 6,0	0,500 1,3	0,643 0,51	0,740 0,143	0,843 0,05	0,921 0,025	1,000 0,012	14,6
300-0,5	304,0	42,0	346,0	0,214 9,0	0,428 1,82	0,548 0,64	0,695 0,25	0,802 0,081	0,905 0,039	1,000 0,028	9,5
300-0,6	613,0	42,0	655,0	0,262 11,0	0,452 1,78	0,538 0,54	0,690 0,28	0,797 0,099	0,880 0,054	1,000 0,031	23,4
400-0,1	0,0	8,5	8,5	0,014 0,12	0,066 0,10	0,113 0,061	0,229 0,038	0,353 0,033	0,577 0,031	1,000 0,029	9,7
400-0,2	2,0	28,0	30,0	0,054 1,5	0,196 0,58	0,288 0,35	0,464 0,21	0,607 0,098	0,750 0,065	1,000 0,056	14,8
400-0,3	25,0	58,0	83,0	0,072 4,2	0,245 1,19	0,322 0,68	0,482 0,38	0,656 0,25	0,810 0,14	1,000 0,07	5,2
400-0,4	86,0	100,0	186,0	0,065 6,5	0,225 1,91	0,295 1,38	0,485 0,64	0,630 0,38	0,810 0,25	1,000 0,13	12,6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
400—0,5	389,0	267,0	656,0	0,061 16,2	0,180 4,39	0,255 3,23	0,412 1,71	0,555 1,10	0,745 0,83	1,000 0,41	16,0
500—0,1	0,5	44,0	44,5	0,045 2,0	0,168 0,71	0,254 0,45	0,436 0,30	0,607 0,15	0,777 0,10	1,000 0,07	13,6
500—0,2	32,0	403,0	435,0	0,046 18,4	0,161 5,37	0,191 3,54	0,322 2,05	0,446 1,51	0,655 1,26	1,000 1,06	31,0
500—0,3	155,0	9800	9955	0,011 105,5	0,044 52,0	0,071 47,7	0,176 55,6	0,274 76,1	1,0 155,0	—	—

2. Сопротивление стали остаточным деформациям при нагрузках, превосходящих напряжение пластического течения (площадка текучести), растет с повышением температуры, и это имеет место для температур в пределах 20°C — 300°C (ср. 20—0,7 и 100—0,7 или 100—0,6; 200—0,6 и 300—0,6).



Фиг. 1.

3. Затухание ползучести тем меньше, чем больше температура протекания ползучести (фиг. 2).

Определенный интерес представляет ползучесть при нагрузках, близких к пределу текучести ([2]—[7]), что имело место в комби-

значен 20—0,6. Данные о ползучести при 20—0,6, которые с уточненными значениями нагрузок приведены отдельно в табл. 3, приводят к заключению, что деформации, соответствующие площадке текучести, могут быть осуществлены по истечении времени и при нагрузках, меньших предела текучести и происходят тем скорее, чем больше нагрузка.

Об аналитическом представлении деформаций ползучести

В [8], [9], [10] предложено деформацию ползучести определять в виде

$$\varepsilon_c = f(t) \cdot \varphi(\sigma).$$

Поскольку отношение деформаций ползучести $\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)$, соответствующих моментам времени t_1 и t_2 , не должно зависеть от напряжения ползучести σ , то в табл. 2 все числители по вертикали, соответствующие одной и той же температуре, должны мало отличаться друг от друга, что в настоящих исследованиях не имело места.

В случае учета упругих и пластических деформаций деформационные кривые в настоящих экспериментах приближались к подобным, и в связи с этим полученные экспериментальные данные аппроксимировались формулами пластической наследственности:

$$\frac{1}{2} \cdot 3^{\frac{3-\mu}{2}} K_0 \cdot \varepsilon^\mu = \sigma \left[1 + C_0^1 \left(1 - e^{-\gamma(t-\tau)} \right) \right].$$

Коэффициенты K_0 , γ , C_0^1 и μ , вычисленные значения которых для температур 500°C, 400°C, 300°C, и 200°C даны в таблице 4, определяют зависимость между деформациями и напряжениями при сложном напряженном состоянии по формулам [12]

$$K_0 [\varepsilon_i(t)]^\mu = \sigma_i(t) + \int_{\tau_i}^t \sigma_i(\tau) \cdot C_0^1 \gamma e^{-\gamma(t-\tau)} d\tau,$$

где

$$\varepsilon_i(t) = \sqrt{\frac{1}{6}} \times$$

$$\times \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)},$$

$$\sigma_i(t) = \sqrt{\frac{1}{6}} \times$$

$$\times \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

Таблица 3

Ползучесть стали 35ГС при нагрузках, близких к напряжению течения

Нагрузки в долях от $\sigma_{\text{пр}}$	Общая остаточная деформация через 4ч в 10^{-5}	Остаточная деформация в долях от 4-часовой							
		Скорость ползучести в 10^{-5} мин через							
		0 мин	1 мин	5 мин	10 мин	30 мин	1 ч	2 ч	4 ч
0,597	595,0	0,005 —	0,042 22,0	0,098 6,0	0,310 24,0	0,920 12,4	0,950 0,3	0,970 0,13	1,000 0,13
0,600	618,0	0,240 —	0,277 18,0	0,354 12,0	0,470 12,3	0,930 5,3	0,970 0,3	0,980 0,12	1,000 0,07
0,602	750,0	0,418 —	0,858 330,0	0,910 4,0	0,925 2,0	0,953 0,7	0,970 0,3	0,980 0,15	1,000 0,07
0,610	739,0	0,846 —	0,886 29,0	0,920 4,5	0,940 2,1	0,970 0,65	0,980 0,2	0,990 0,09	1,000 0,07

Таблица 4

Значения коэффициентов K_0 , C_0^1 , μ , γ

Температура °C	$K_0 \left(\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right)$	C_0^1	μ	$\gamma \left(\frac{1}{\text{час}} \right)$
200	118000	0,0407	2/3	2,2
300	30000	0,044	1/2	2,2
400	22000	0,2064	1/2	0,16
500	39000	0,4530	3/5	0,9

Аппроксимация зависимости скорости ползучести от температуры по Бейли [13] $\dot{\epsilon} = f(\sigma, t)e^{nT}$ или Кангеру [14] $\dot{\epsilon} = f(\sigma, t) \cdot e^{-\frac{K}{T}}$ в указанных исследованиях оказалась неприемлемой.

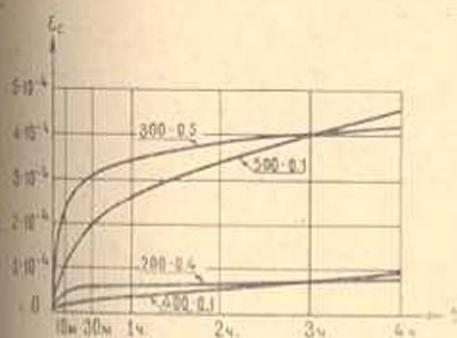
О модуле упругости при повышенных температурах

Модуль упругости в нагретом состоянии (E_T) определялся на испытаниях на ползучесть. Полученные данные E_T сравнивались с E_0 измеренным при тех же нагрузках, но при 20°C. Значения коэффициентов $k_E = \frac{E_T}{E_0}$, а также показатели точности по [19] даны на фиг. 3, откуда видно, что уже при 500°C k_E доходит до 0,7.

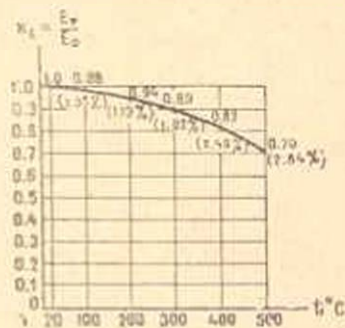
Значения модуля упругости в указанных пределах температуры могут быть аналитически представлены при помощи формулы

$$E_T = E_0 (1 - 0,00000127^2).$$

Среднее квадратичное отклонение этой формулы от экспериментальной кривой составляет 3,2%.



Фиг. 2.



Фиг. 3.

Сравнение свойств стали до и после испытания на кратковременную ползучесть

В настоящих экспериментах было найдено, что явление ползучести практически не изменяет модуля упругости, за исключением нагрузок $0,7\sigma_{вр}$ и $0,8\sigma_{вр}$ при 20°C , когда его значение уменьшается на $(10-12)\%$.

Напряжение пластического течения (площадка текучести), измеряемое при 20°C , у образцов, претерпевших незначительную оста-

Таблица 5

Изменение напряжений течения от ползучести

Напрягающая комбинация	Напряжение ползучести кг/см^2	Напряжение течения кг/см^2	Разность напряжений течения и напряжений ползучести	Увеличение напряжений течения	Общая остаточная деформация в $\%$
20-0,5	4690	5065	375	215	0,675
20-0,7	5460	5440	-20	590	1,713
20-0,8	6250	6300	50	1450	2,894
100-0,6	4690	5830	1140	980	0,944
100-0,7	5460	6600	1140	1750	1,682
200-0,5	3900	5120	1220	270	0,137
200-0,6	4690	5850	1160	1000	0,802
300-0,5	3900	5350	1450	500	0,346
300-0,6	4690	6015	1425	1165	0,655
400-0,4	3120	5230	2110	380	0,186
400-0,5	3900	5760	1860	910	0,656
500-0,3	2340	5095	2755	245	9,...
500-0,4	3120	5470	2350	620	9,...

ющую деформацию, не изменялось независимо от температуры проведения ползучести.

В табл. 5 приведены результаты исследований напряжений пластического течения у образцов, давших в результате ползучести заметное изменение этого показателя.

Из данных испытаний можно сделать следующие выводы:

1) изменение напряжения течения имеет место лишь, начиная с некоторого предела напряжений ползучести, и этот предел уменьшается с повышением температуры;

2) мнение, что изменение напряжения течения определяется одной лишь остаточной деформацией, в настоящих исследованиях не подтверждается;

3) из температур, принятых при испытании на ползучесть, при равных остаточных деформациях наибольшее повышение напряжения течения имеет место в случае испытания на ползучесть при 300°C (ср. $200-0,6$; $300-0,6$ и $400-0,5$);

4) разность между измененным напряжением течения и напряжением ползучести увеличивается с повышением температуры. При температуре 100°C она достигает сразу 1140 кг/см^2 , а при дальнейшем повышении температуры ползучести она растет незначительно.

При уменьшении длительности испытания на ползучесть повышение напряжения течения падает. Это определилось из испытания двух дополнительных образцов, которые были нагреты до 100°C , а затем нагружены до 5100 кг/см^2 ($0,65 \sigma_{\text{вр}}$) и разгружены через 5 минут, давая остаточную деформацию ($1,012\%$ и $1,100\%$), превышающую общую остаточную деформацию стержней $100-0,6$ ($0,944$). Однако, после того же режима остывания образцы дали напряжения течения 5500 кг/см^2 и 5600 кг/см^2 , в то время как для стержней $100-0,6$ (4690 кг/см^2) после 4-часовой ползучести образцы дали 5830 кг/см^2 с средним разбросом 14 кг/см^2 .

Отсюда видно, что длительность протекания ползучести существенно отражается на повышении напряжения течения.

Выскажем предположение, что возврат модуля упругости протекает параллельно с повышением напряжения течения. В наших исследованиях эта точка зрения оправдывается. Из этой концепции вытекает, что у стали, имеющей "дефект модуля" (уменьшенное значение E , например, от пластических деформаций), можно поднять напряжение течения путем ограниченного (например, до 300°C) нагрева.

Этот факт получил экспериментальное подтверждение, например, при исследовании высокопрочной проволоки [16], а также упрочненных пластическим удлинением стали $35\Gamma\text{C}$ [17], стали 5 [15] и стали $25\Gamma 2\text{C}$ [18].

Прочность и удлиняемость образцов не зависит от напряжения или деформации ползучести. Это позволило сравнивать усредненные для каждой температуры значения прочности и удлиняемости образцов, подвергнутых испытанию на ползучесть (табл. 6).

Таблица 6

Зависимость прочности и удлиняемости стали от температуры предварительной ползучести

Температура °C	20	100	200	300	400	500
Прочность кг/см ²	7864	7743	7668	7589	7584	7375
Удлиняемость %	15,6	16,5	17,1	17,5	18,0	18,2

Как видно из табл. 6, с повышением температуры испытания на ползучесть прочность несколько понижается, а деформативность растет.

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 9 VII 1964

Ա. Բ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ

ԲԱՐՁՐԱՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՍՈՂԻԻ ԵՎ ՏԱԲ ԳԼԱՆՎԱԾ ՊՈՂՊԱՏԻ
ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ ՆՐԱ ԱՋԳԵՑՈՒԹՅԱՆ
ՓՈՐՁՆԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Աշխատության մեջ ուսումնասիրված է պողպատի սողքը ջերմության 20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C ու 500°C-ի և քնի փոփոխման բավականաչափ լայն դիապազոնի համար: Հետադոտված է նաև հոսքի լարումների, առաձգականության մոդուլի, մարմնի և դեֆորմատիկ հատկությունների փոփոխությունը՝ կախված սողքից:

Բերված արդյունքներից երևում է, որ սողքի դեֆորմացիան մեծապես կախված է սողքի լարումների և հոսքի լարումների մոտիվությունից: Սողքի ջերմաստիճանի մեծացումից ալք կախումը փոքրանում է, որը հեշտացնում է սողքի տվյալների անալիտիկ գրանցումը: Ներկա աշխատությամբ չի հաստատվում գոյություն ունեցող այն կարծիքը, որ սողքից առաջացած հոսքի լարումների փոփոխությունը որոշվում է միայն ընդհանուր մնացորդային դեֆորմացիայից, անկախ ժամանակից և սողքի ջերմաստիճանից: Միևնույն մնացորդային դեֆորմացիայի ժամանակ հոսքի լարումների ամենամեծ աճը դիտվել է 300° ջերմության դեպքում առաջացած սողքի ժամանակ:

Ամրությունը, դեֆորմատիկ հատկությունները և առաձգականության մոդուլը սողքից փոփոխվում են աննշան: Առաջարկված է առաձգականության մոդուլի համար անալիտիկ արտահայտություն՝ կախված ջերմաստիճանից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Шабалин В. И., Власова Т. В. Упрочнение поверхности металла при механической полировке. Заводская лаборатория, №11, 1962.
2. Грант Н. Дж. и Чандхур А. Р. Ползучесть и разрушение. Сборник „Ползучесть и возврат“. Металлургиздат, 1961.

3. Одинг И. А., Иванова В. С., Бурдукский В. В., Геминев В. Н. Теория ползучести и длительной прочности металлов. Металлургиздат, 1959.
4. Шоек Г. Теория ползучести. Сборник „Ползучесть и возврат“. Металлургиздат, 1961.
5. Taylor G. J. Proceedings of the Royal Society. Series A, vol. 145, 1934, p. 362.
6. Лин Т. О связи между напряжениями и деформациями в теории скольжения. Механика, № 4, 1960.
7. Батдорф С. Б., Будянский Б. Математическая теория пластичности, основанная на концепции скольжения. Механика, № 1, 1962.
8. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеоретиздат, 1952.
9. Vetty P. Me. Trans. Mech. Engineering, 1934, p. 149.
10. Soderberg C. Trans. ASME, 56, 1936, p. 733.
11. Работнов Ю. Н. Расчет деталей машин на ползучесть. Известия АН СССР, ОТИ, № 6, 1948.
12. Арутюнян Н. Х. Плоская контактная задача теории ползучести. ПММ, 23, 1959.
13. Bailey R. W. Proceedings Inst. Mech. Engineering, 122, 1933, p. 209.
14. Kanter J. Trans. Amer. Inst. Mining. Metal Eng. Iron a Steel Division, v. 131, 1938, p. 385.
15. Комендат Г. Я. Напряженно-армированные железо-бетонные конструкции с арматурой, натягиваемой электрическим методом. Львов, 1958.
16. Михайлов В. В., Фоломеев А. А. Способ уменьшения потери от релаксации проволоки и прядей. Бетон и железобетон, № 6, 1962.
17. Мадатян С. А. Влияние электронагрева на свойства горячекатанной арматурной стали. Бетон и железобетон, № 2, 1962.
18. Рискинд Б. Я. Натяжение арматуры электронагревом. ЦБТИ НИИ, 1958.
19. Леонтьев Н. Л. Статистическая обработка результатов наблюдений. Гослесбумиздат, 1952.