

625.143

М 36

ПУТЕЕЦ 60

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

ВЫПУСК 35

Инж. А. МАХАНЕК

**ТЕРМИЧЕСКИЕ  
НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЛЬСАХ**

(ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СООБЩЕНИЕ)

ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ

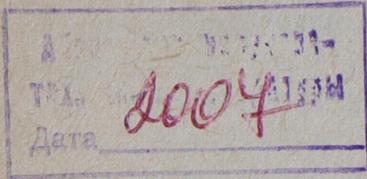
1991  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

ОТДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

625.143

M36

Инж. А. МАХАНЕК



# ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЛЬСАХ

(ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СООБЩЕНИЕ)



ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
ТРАНСПОРТНОЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА ★ ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ ★ 1937

1975

Практикой Западно-европейских и американских металлургических заводов, а также на опыте нашего Кузнецкого металлургического комбината им. Сталина вполне четко установлено, что коробление и холодная правка рельсов после прокатки вызывают в рельсах вредные остаточные внутренние напряжения.

В настоящей брошюре автор заостряет внимание на необходимости регулирования скорости охлаждения рельсов после их прокатки и считает это мероприятие одним из средств к повышению качества рельсов.

Брошюра рассчитана на ИТР, студентов вузов и работников металлургических заводов.



Редактор *инж. Г. Г. Айрапетянц*  
Техредактор *П. Хитров*

Уполн. Главлита Б-14466. ЖДИЗ 3149 Ж-33.  
Тираж 2180 экз. Заказ тип. 18286  
Размер бумаги 62 x 94 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> п. л. Объем 1 <sup>1</sup>/<sub>4</sub> п. л. 55488 зн. в п. л.  
Сдано в набор 5/ХІІ 1936 г.  
Подписано к печати 16/ІІІ 1937 г.

1-я тип. Трансжелдориздата НКПС, Москва  
Б. Переяславская, 46

# ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЛЬСАХ

## 1. Введение

Поступающие с металлургических заводов для укладки в путь железнодорожные рельсы никогда не бывают свободными от так называемых остаточных внутренних напряжений, т. е. таких напряжений, которые уравновешены внутри самого рельса без воздействия на него внешних сил.

Небезызвестно, что современный виньольевский профиль железнодорожного рельса с производственной точки зрения не обеспечивает равномерного обжата металла в прокатных валках и равномерного охлаждения уже готовых рельсов после прокатки. Вследствие этого остывшие после прокатки рельсы, как правило, бывают сильно покороблены и требуют последующей холодной правки. В результате наклепа, вследствие холодной деформации металла при правке, рельс в значительной степени теряет свою пластичность и становится более хрупким.

Сравнительные испытания под копром правленных и неправленных рельсов, проведенные харьковским Институтом металлов, показали, что сопротивление рельса копровому удару непосредственно после правки изменяется сравнительно мало, но после выдержки правленного рельса в течение 30 дней его сопротивляемость удару падает почти в два раза <sup>1</sup>.

Лабораторные испытания на разрыв и ударную вязкость образцов правленных и неправленных рельсов, проведенные Центральной лабораторией Кузнецкого металлургического комбината им. Сталина <sup>2</sup>, также показали, что:

а) при одном и том же временном сопротивлении рельсовой стали правленные на роликовой машине рельсы имеют на 20—25% понижение предела упругости против неправленных рельсов;

б) ударная вязкость на образцах Шарпи у правленных рельсов на 12—15% ниже, чем у неправленных.

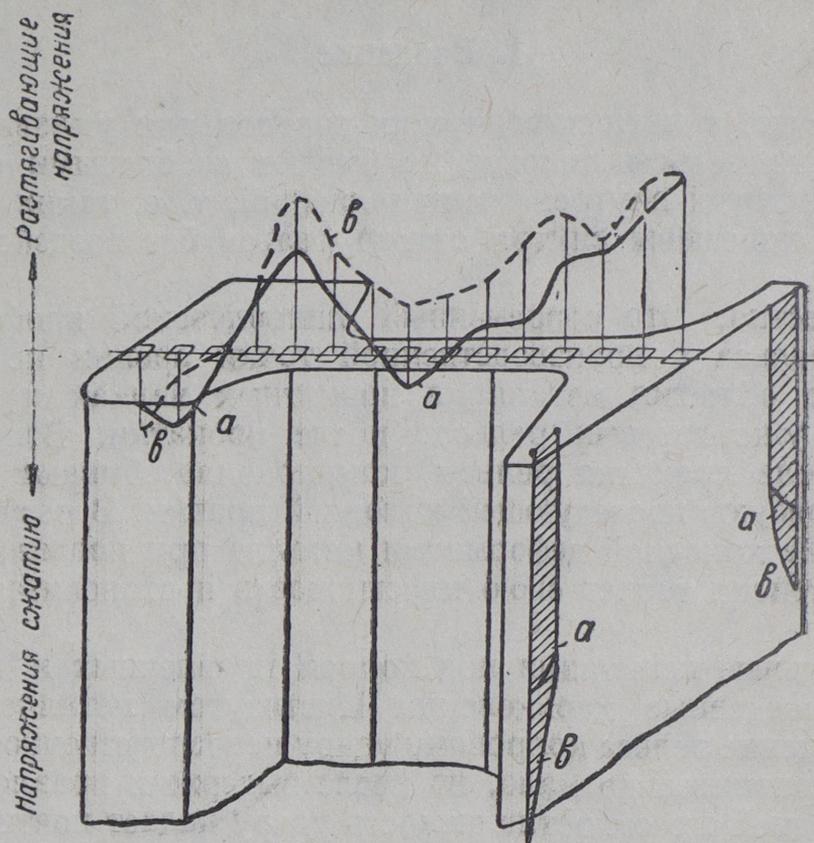
Вопрос о поведении в пути рельсов, полученных с завода с различной величиной напряжения, изучен очень мало, а потому за отсутствием конкретных данных отсутствует и достаточно объективная оценка поведения таких рельсов в пути. Можно лишь полагать, что остаточные напряжения в значительной степени повышают в рельсах чувствительность к разного рода повреждениям и аномалиям в условиях их службы. В связи с этим рельсы с достаточно высокими остаточными напряжения-

<sup>1</sup> Доклад инж. В. А. Тиховского, газ. «Техника», № 38 от 21/IV—36 г.

<sup>2</sup> Инж. Т. Н. Лященко, К вопросу о настройке ролико-правильной машины Журнал «Кузнецкстрой», № 1-2 за 1935 г.

ми могут представлять собой скрытую угрозу вследствие внезапного их разрушения под подвижным составом.

Последние работы по исследованию причин возникновения изломов усталости в железнодорожных рельсах, проведенные в Америке под руководством проф. Мура<sup>1</sup> в исключительно большом масштабе, показали, что первоначальное образование мелких волосных трещин в головке рельса, из которых потом развивается «излом усталости», связано с неравномерным остыванием рельсов после прокатки.



Фиг. 1. Диаграмма внутренних напряжений в рельсах до холодной правки (по Мейеру).

Немецкий исследователь Мейер<sup>2</sup> методом разрезки темплетов правленных и неправленных рельсов установил, что остаточные внутренние напряжения в рельсах до холодной правки сравнительно невелики (фиг. 1), но после холодной правки они возрастают в несколько раз (фиг. 2). При этом разрезка снятых с пути рельсов показала, что полученные рельсом на заводе остаточные напряжения по своей величине и направлению могут сохраняться в нем в течение ряда лет службы в пути.

Еще в 1900 г. в постановлении парижского Международного железнодорожного конгресса о вредности холодной правки были записаны следующие строки: «Вред, приносимый рельсам холодной правкой, настолько велик, что многие рельсы благодаря только одной этой причине лопаются в пути после нескольких месяцев службы»<sup>3</sup>.

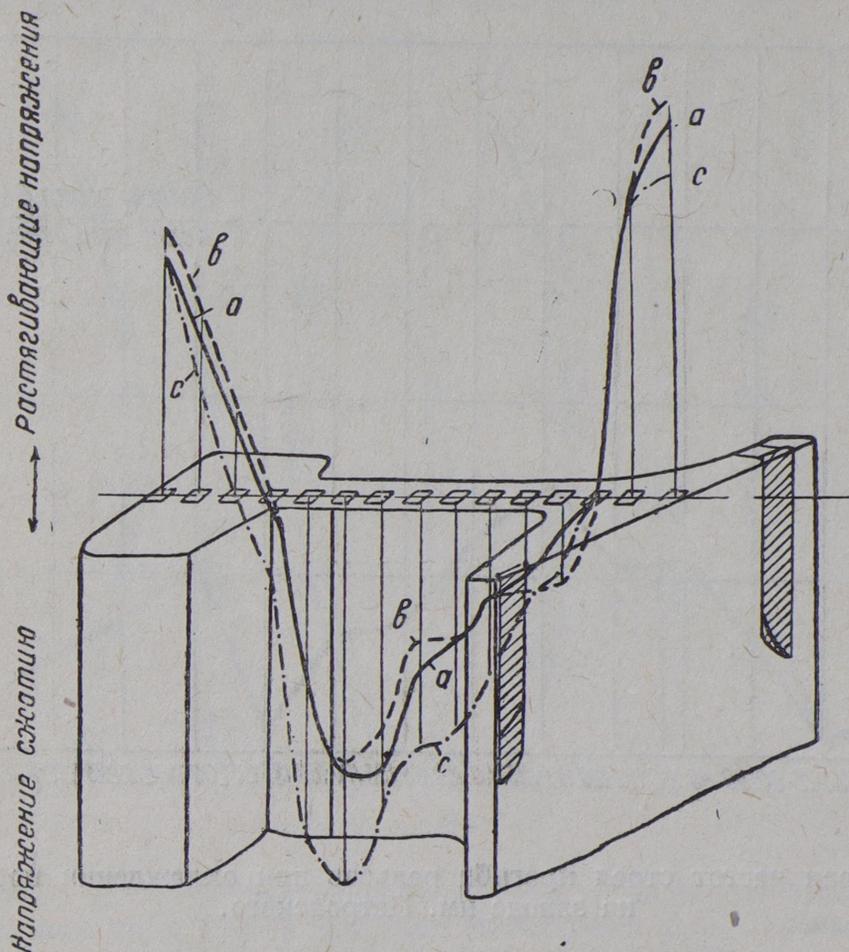
<sup>1</sup> «*Ry Age*» от 13 июня 1936 г., стр. 940—944 и «*Ry Age*» от 3 августа 1936 г., стр. 269—274.

<sup>2</sup> «*Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*», № 15, 1936 г., стр. 320—329.

<sup>3</sup> Исследование рельсовой стали. Запросы председателя комиссии по исследованию рельсовой стали. Петербург, 1906 г.

Стрелы прогиба рельсов после окончательного их остывания на наших рельсопрокатных заводах колеблются в весьма широких пределах. Наиболее типичные размеры искривления могут быть представлены кривой частот стрел прогиба по заводу им. Петровского для рельсов типа II-а (фиг. 3).

Чем сильнее искривлен рельс при охлаждении после прокатки, тем более интенсивная холодная правка требуется, и тем, очевидно, больше при прочих равных условиях будет иметь рельс остаточных вредных внутренних напряжений перед укладкой в путь.



Фиг. 2. Диаграмма внутренних напряжений в рельсах после холодной правки на роliko-правильной машине (по Мейеру).

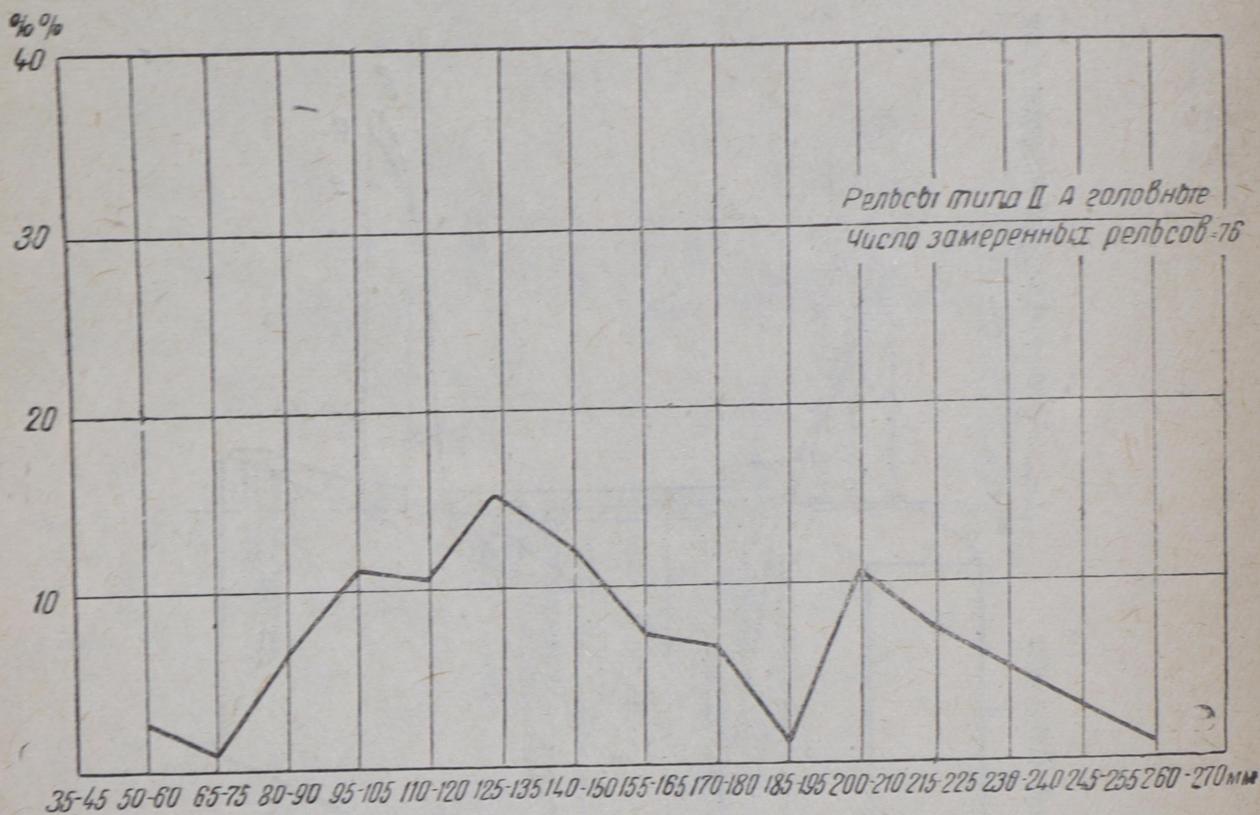
Все это позволяет утверждать, что коробление рельсов и связанная с этим явлением холодная правка их являются важнейшими причинами хрупкости рельсовой стали. А так как опасение хрупкости рельсов является основной причиной, заставляющей воздерживаться от перехода на более твердые рельсы, то холодную правку и чрезмерное коробление рельсов нужно признать основными факторами, задерживающими переход на сталь более твердую, а следовательно и более стойкую против износа.

В изучении причин коробления рельсов после прокатки общая закономерность в последовательном искривлении рельса по мере его остыва-

ния была подмечена еще членом Первой рельсовой комиссии инж. Жуковским, который в трудах этой комиссии в 1906 г. дал следующую принципиальную схему деформаций рельса в процессе его остывания (фиг. 4).

Из этой схемы мы видим, что железнодорожный рельс в процессе остывания после прокатки два раза изгибается на подошву, два раза становится изогнутым на головку и три раза за это время делается на некоторое время совершенно прямым.

Дальше этой, исключительно важной, принципиальной схемы построения деформаций рельса в процессе его остывания Жуковский не



Фиг. 3. Кривая частот стрел прогиба рельсов при охлаждении после прокатки на заводе им. Петровского.

пошел. Последние работы, опубликованные в этом направлении у нас и за границей, также не выходят за пределы качественной оценки явления коробления рельсов.

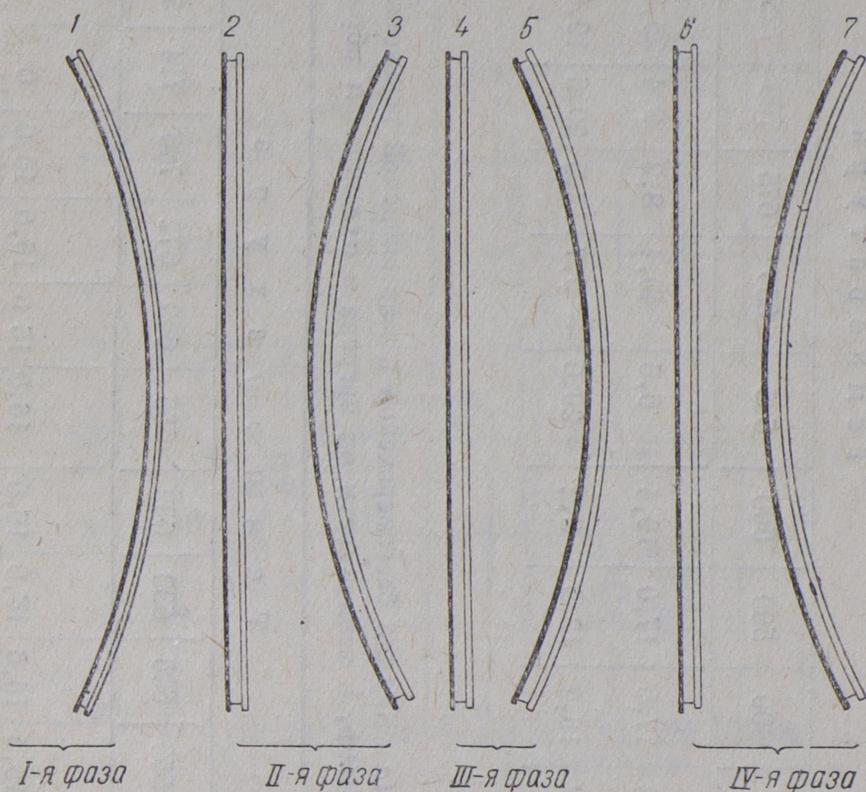
В своей работе по исследованию термических напряжений в рельсах мы поставили себе задачей не только установить физическую сущность коробления рельсов, но и найти пути к определению аналитическим расчетом количественных значений остаточных напряжений и деформаций в рельсах в зависимости от их профиля и условий остывания, т. е., другими словами, указать пути к «термическому расчету» профиля рельса.

Ряд особенностей делал поставленную нами задачу исключительно трудной. Приходилось изучать поведение рельса при температурах порядка 900—1000°. Об упругих свойствах материалов, в частности рельсовых сталей, при таких высоких температурах до сих пор известно было очень мало. Мало известно также было, в какой мере, при каких высоких температурах можно считать металл упругим.

В связи с этим пришлось провести большую лабораторную работу по изучению поведения рельсового металла при высоких температурах. К числу законченных нами наиболее крупных лабораторных работ<sup>1</sup> в этом направлении относятся:

а) определение коэффициентов линейного расширения для бессемеровской и мартеновской рельсовых сталей в пределах температур от 1000 до 50° С;

б) определение температурного поля и стрел прогиба для рельсов типа II-а в условиях свободного остывания на воздухе;



Фиг. 4. Экспериментальная кривая хода искривления рельса типа II-А в процессе охлаждения при обычных условиях укладки рельсов на стеллажах.

в) определение модуля Юнга, модуля сдвига и коэффициент Пуассона для рельсовых сталей в интервале температур от комнатной до 1000° С;

г) определение теплопроводности рельсовой стали при тех же температурах.

## 2. Определение тепловых расширений

Работа по определению коэффициентов линейного расширения для рельсовых сталей выполнена нами, в целях большей достоверности полученных результатов, одновременно в двух местах и разными методами определения: 1) в лабораториях Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта—на обычном дифференциальном, оптиче-

<sup>1</sup> К работам была привлечена лаборатория физики тепла Научно-исследовательского института физики московского государственного университета.

Значения коэффициентов линейного расширения ( $\alpha \times 10^6$ ) для маргеновской рельсовой стали при охлаждении с температуры 900° С. Работа по определению проведена на дилатометре Шевенара

№	Химсостав		Температура																
	C	Mn	Si	P	S	200	300	400	500	600	625	650	675	700	725	775	800	850	900
1	0,46	0,97	0,23	0,03	0,045	14,4	15,2	17,0	17,0	19,4	6,6	-40,1	8,2	9,4	25,3	20,6	22,7	22,4	20,75
2	0,48	1,15	0,14	0,03	0,04	14,2	14,8	16,2	18,9	3,2	-29,6	-9,7	13,0	20,6	19,8	21,7	22,6	22,1	22,0

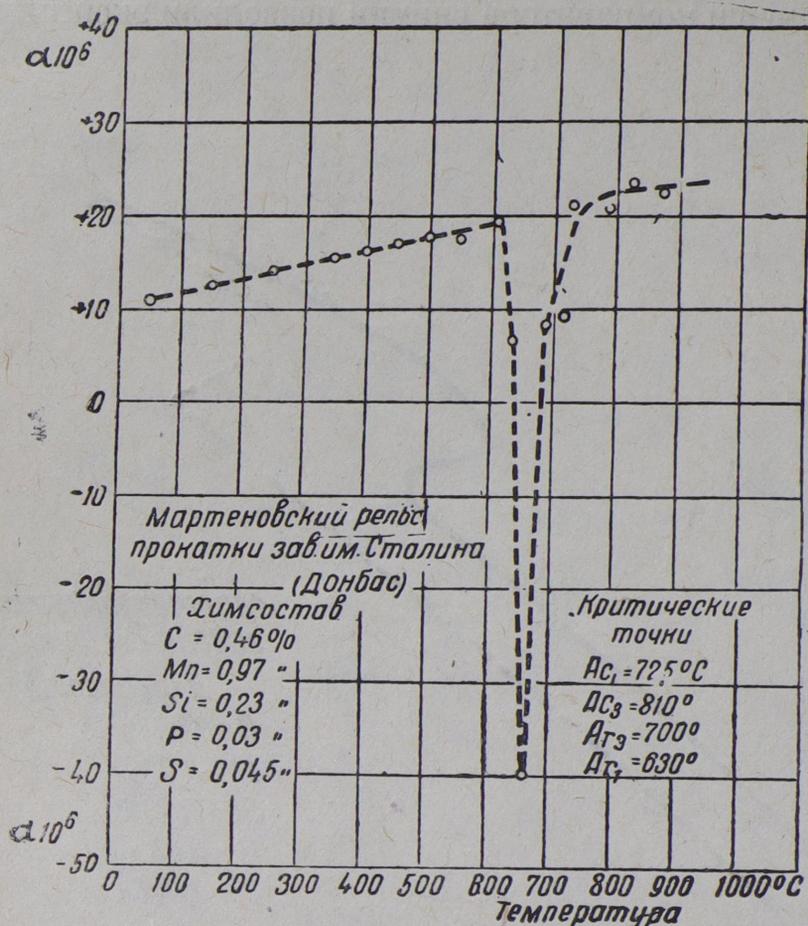
Таблица 2

Значения коэффициентов линейного расширения ( $\alpha \times 10^6$ ) для бессемеровской и маргеновской рельсовых сталей, полученных на оптическом дилатометре НИИФ, в зависимости от нагрева и охлаждения образцов.

Образцы	Температура																	
	200	300	400	500	550	600	630	632	650	669	672	700	714	750	800	850	900	1000
Бессемеровская сталь при нагревании . . .	11,0	12,5	14,0	15,0	15,5	16,6	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	0	0,5	10,0	18,5	18,5	18,5
» охлаждения . . .	11,0	12,5	14,0	14,0	12,5	9,5	0	-21,0	0	0	0	10,0	11,0	14,5	17,7	19,5	19,5	19,5
Маргеновская сталь при нагревании . . .	13,0	14,0	15,0	15,5	15,7	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	1,0	16,0	19,5	19,5	19,5
» охлаждения . . .	13,0	14,0	15,0	15,5	15,7	12,5	0	-18,0	0	0	6,0	16,5	17,5	19,5	21,0	21,0	21,0	21,0

ском дилатометре Шевенара, и 2) в лабораториях Научно-исследовательского института физики московского государственного университета— на специально сконструированном дилатометре, с автоматической фото-записью удлинений испытуемого образца.

Результаты определения представлены в таблицах 1 и 2.



Фиг. 5. Кривая изменения коэффициента линейного расширения рельсовой стали в зависимости от температуры охлаждения образца.

На фиг. 5 представлена кривая изменения коэффициента линейного расширения в зависимости от температуры для образца № 1, табл. 1. Общая дилатометрическая кривая линейных изменений образцов рельсовой стали в зависимости от температуры представлена на фиг. 6.

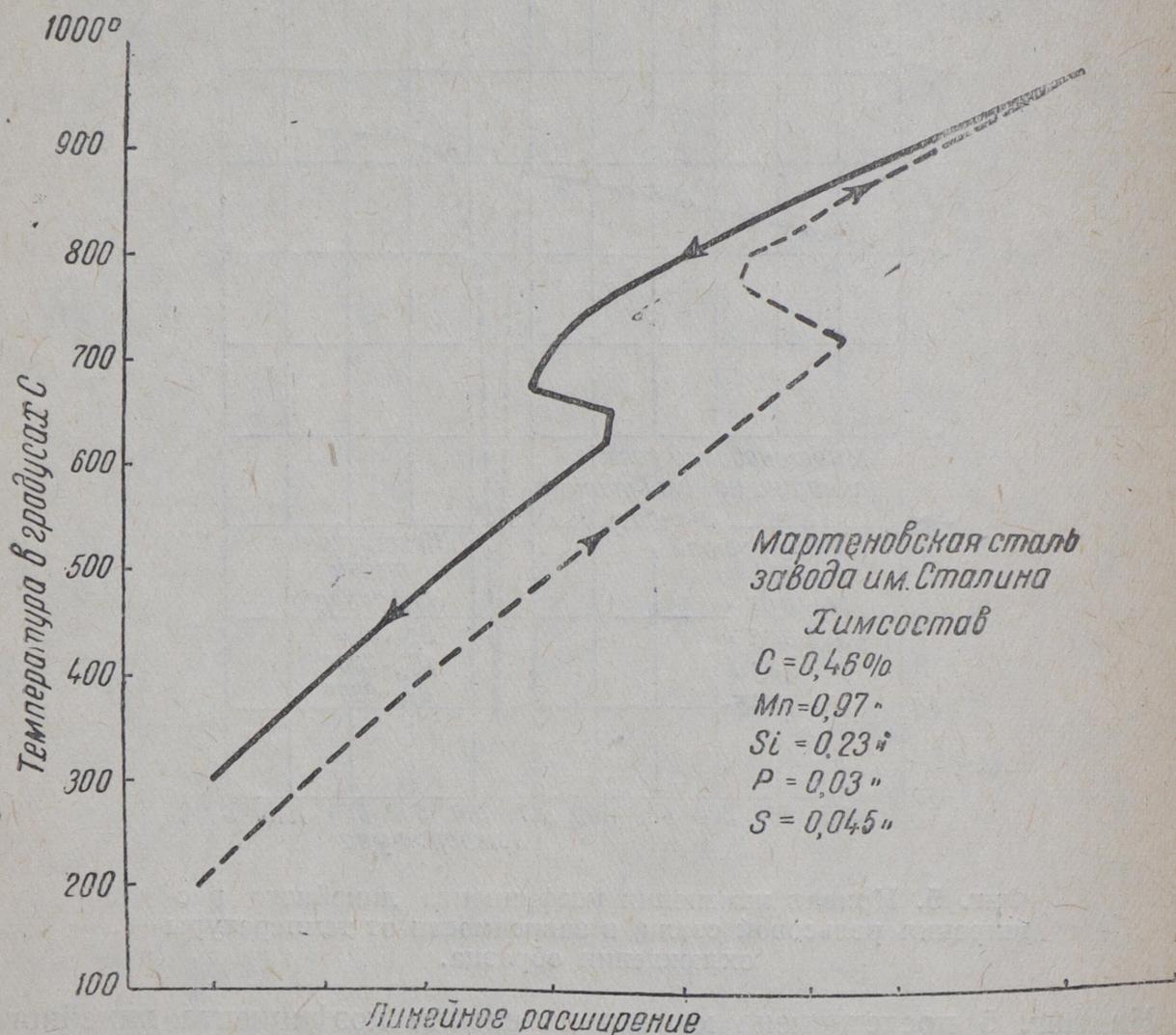
### 3. Определение температурного поля для рельсов типа II-a

Определение температурного поля для рельсов типа II-a проведено нами с равномерным нагревом опытных кусков в печи и с последующим замером температур в пяти точках по профилю рельса в условиях свободного остывания кусков на воздухе с температурой 950°. Замеры температур производились через каждые 30 секунд. Результаты представлены на диаграммах фиг. 7—12.

На фиг. 7 и 8 показаны кривые изменения температуры металла в головке и подошве рельса с профилем типа II-a при свободном остывании на воздухе, а на фиг. 9 и 10—изменение скорости охлаждения рельса по сечению в зависимости от температуры и от времени.

Объемные изменения металла в головке и подошве рельса при остывании представлены на фиг. 11 и 12.

В процессе проведения эксперимента с одного из опытных кусков во время остывания были сделаны фотоаппаратом ФЭД 33 фотоснимка. ФЭД был прочно укреплен над рельсом на линии перпендикуляра, восстановленного из середины рельса к его плоскости симметрии. Обработанные при помощи компаратора снимки позволили экспериментально,



Фиг. 6. Общая диаграмма линейных расширений рельсового металла при нагреве и охлаждении.

в лабораторных условиях, получить кривую хода деформаций рельса в процессе его остывания, которая была необходима при аналитическом определении остаточных деформаций и напряжений в рельсах.

#### 4. Определение модуля Юнга, модуля сдвига и коэффициента Пуассона

Модуль Юнга определялся путем наблюдения над поперечными колебаниями испытуемого стержня, расположенного горизонтально, и связанного по концам с двумя одинаковыми массами грузов, колеблющихся вокруг вертикальных осей, проходящих через центры их тяжести. Испытуемым образцам была придана цилиндрическая форма, возможно малого диаметра с тем, чтобы при измеримом его прогибе он не

переходил за предел упругости при максимальной температуре испытания. Образец был взят длиной 300 мм и диаметром 4 мм.

Модуль сдвига определялся на той же установке, при расположении стержней вертикально и приданием им крутильных колебаний. Зная модуль Юнга и модуль сдвига, был вычислен и коэффициент Пуассона. Результаты определений представлены в таблице 3.

Таблица 3

Зависимость модуля Юнга  $E$  в  $кг/см^2$ , модуля сдвига  $G$  в  $кг/см^2$  и коэффициента Пуассона от температуры рельсовой стали

$t^\circ$	$E/E_{20}$	$E \cdot 10^{-6}$	$G/G_{20}$	$G \cdot 10^{-6}$	$\mu$
20	1,000	2,050	1,000	0,808	0,27
50	0,995	2,040	0,992	0,802	0,27
100	0,985	2,020	0,978	0,791	0,28
150	0,972	1,992	0,962	0,778	0,28
200	0,957	1,963	0,948	0,776	0,28
250	0,942	1,931	0,932	0,754	0,28
300	0,922	1,890	0,906	0,733	0,29
350	0,902	1,850	0,888	0,718	0,29
400	0,878	1,800	0,860	0,695	0,29
450	0,852	1,749	0,840	0,678	0,29
500	0,818	1,679	0,800	0,646	0,30
550	0,783	1,607	0,762	0,615	0,31
600	0,740	1,517	0,715	0,578	0,32
650	0,690	1,414	0,650	0,525	0,34
700	0,600	1,230	0,525	0,424	0,45
750	0,500	1,026	0,485	0,392	0,31
800	0,495	1,015	0,485	0,392	0,30
850	0,495	1,015	0,477	0,386	0,30
900	0,495	1,008	0,475	0,384	0,31
950	0,490	1,005	0,470	0,380	0,32
1 000	0,490	1,005	0,465	0,376	0,33

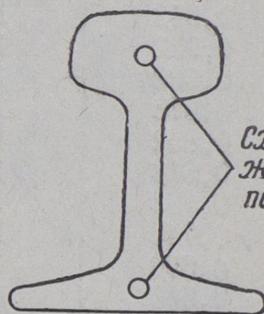
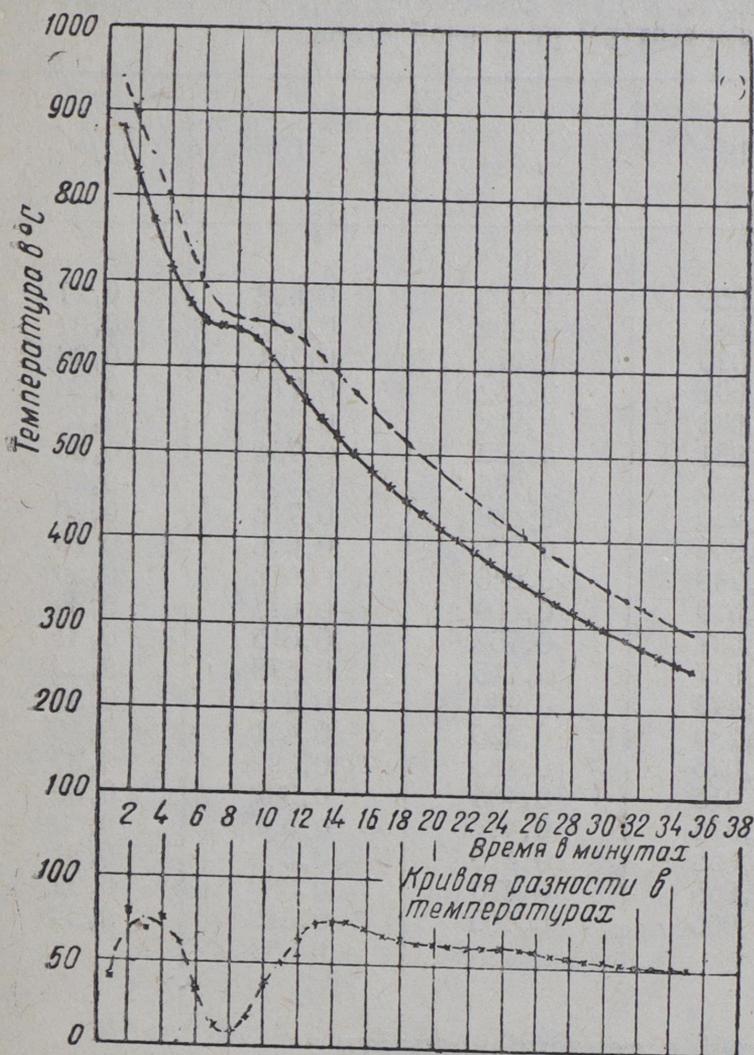
### 5. Определение теплопроводности

Теплопроводность рельсовой стали определялась в зависимости от электропроводности по методу, разработанному Кольраушем.

Исследуемый образец рельсовой стали цилиндрической формы, длиной 1100 мм и диаметром 20 мм, имел в средней части измерительный участок длиной в 100 мм и диаметром 9-10 мм. На этом измерительном участке на расстоянии 50 мм друг от друга пропиливались три канавки глубиной 7 мм и шириной 4 мм. В эти канавки непосредственно в металл вваривались платино-платинородиевые термопары, с помощью которых производили измерения температуры и потенциала в трех точках. После вварки термопар измеряемый участок покрывался слоем изоляционного порошка из асбесто-магнезии, оборачивался тонким асбестовым листом и помещался в электрическую печь.

Нагрев стержня производился постоянным электрическим током от аккумуляторной батареи, емкостью около 3000 ампер-часов и напряжением в 2 вольта.

В качестве тепловой ванны, уменьшающей теплообмен между исследуемым стержнем и окружающей средой, служила платиновая печь. Постоянство температуры печи достигалось при помощи автоматического терморегулятора с контактным гальванометром, разработанным Д. Л. Тимротом.



Тимсостав  
 $C = 0,44\%$   
 $Mn = 1,02\%$   
 $Si = 0,17\%$   
 $P = 0,07\%$   
 $S = 0,051\%$

Фиг. 7. Кривые охлаждения головки и подошвы рельса типа II-a в зависимости от времени.

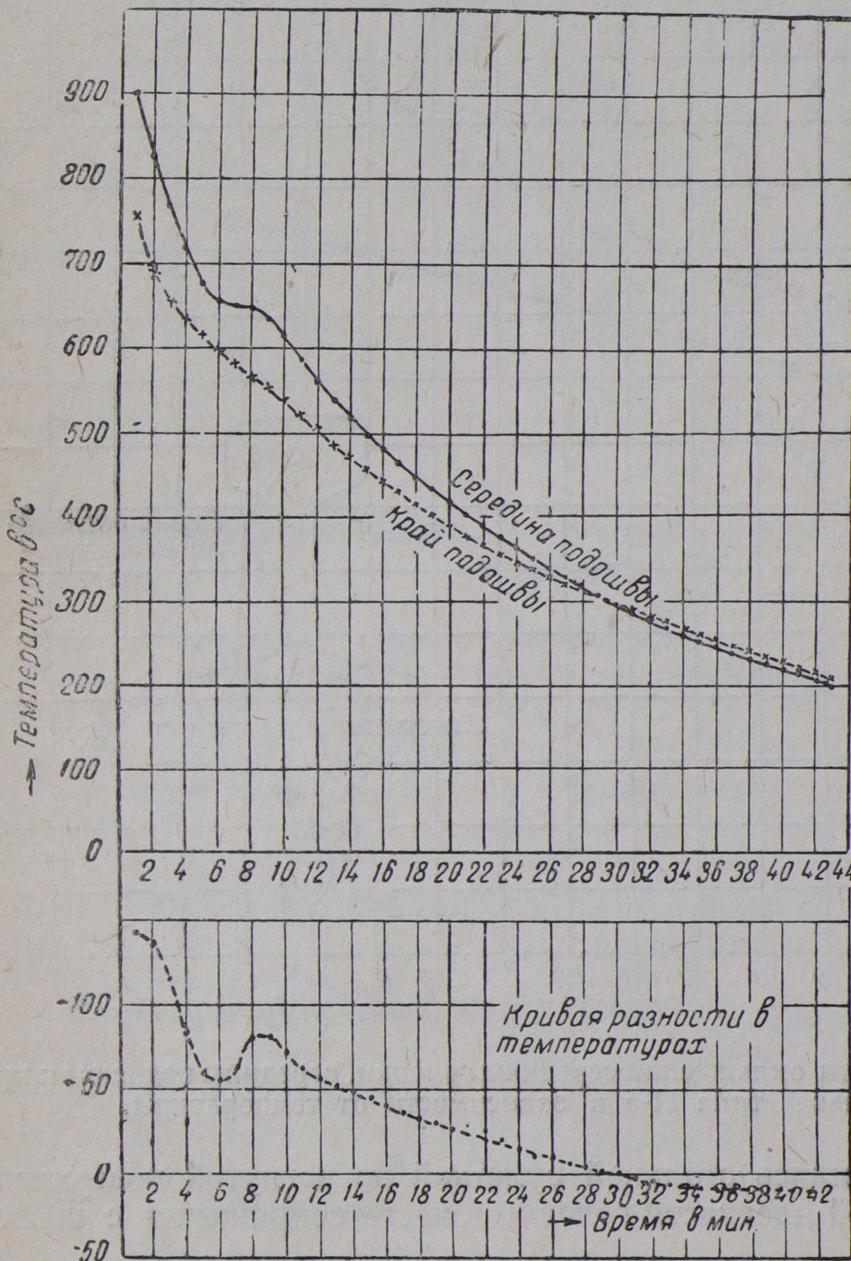
Результаты определения для двух образцов (из бессемеровской и мартеновской рельсовых сталей) представлены в таблицах 4 и 5.

### 6. Определение естественной усадки рельса

Наши наблюдения за естественной усадкой бессемеровских рельсов с профилем типа II-a в условиях остывания, практикуемых на заводе им. Петровского, могут быть представлены нижеследующей таблицей (таблица 6).

Зависимость теплопроводности ( $\lambda$ ) рельсовой бессемеровской стали от температуры

Химсостав					Температура в °С										
С	Mn	Si	S	P	130	166	236	267	428	552	643	720	752	760	828
0,50	0,90	0,08	0,046	0,11	0,105	0,102	0,101	0,097	0,092	0,083	0,077	0,075	0,073	0,071	0,067



Бессемеровский  
рельс типа II-A  
Химсостав

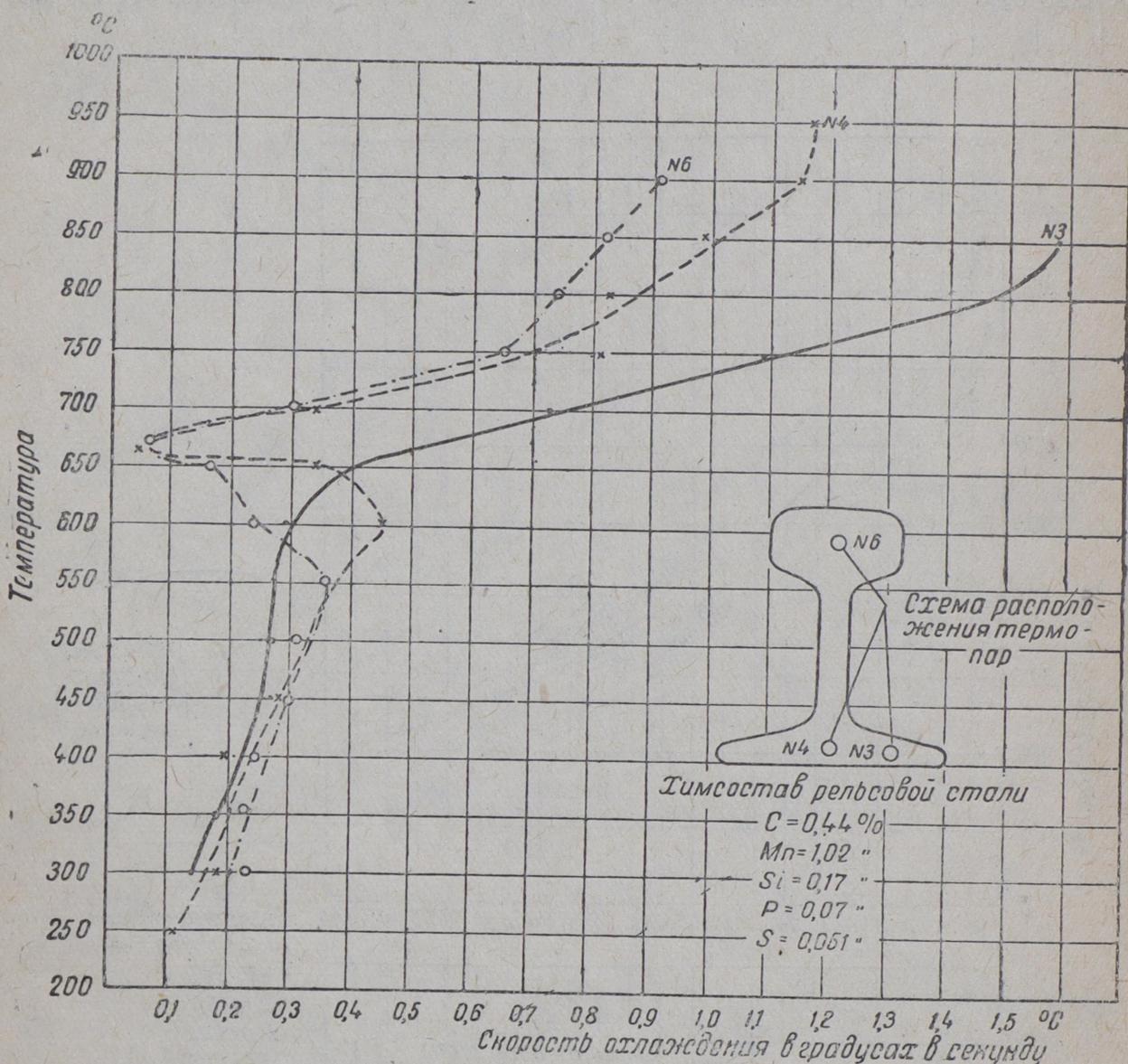
C = 0,44 %  
Mn = 1,02 %  
Si = 0,17 %  
P = 0,07 %  
S = 0,051 %

Фиг. 8. Кривые температурных изменений в середине и у краев подошвы рельса типа II-а, в процессе охлаждения с прокатного нагрева.

Таблица 5

Зависимость теплопроводности ( $\lambda$ ) рельсовой мартеновской стали от температуры

Химсостав					Температура в °С							
C	Mn	Si	S	P	139	227	453	552	653	762	834	902
0,50	0,72	0,30	0,03	0,035	0,107	0,105	0,091	0,084	0,077	0,058	0,058	0,056



Фиг. 9. Кривые скорости охлаждения середины головки, середины подошвы и края подошвы рельса типа II-а в зависимости от температуры.

Замеры производились стальной рулеткой по вогнутой поверхности подошвы и по нижней плоскости головки в месте сопряжения с шейкой рельса.

Средняя линейная усадка бессемеровского рельса типа II-а, таким образом, выражается в размере 167 мм, или 1,32% от первоначальной длины рельса в горячем состоянии.

## Сокращение длины горячих рельсов типа II-а при охлаждении с температуры конца прокатки до температуры 50—60° С

№ плавки и рельса в слитке	Размер прокатки при резке мм	Условные №№ рельсов	Длина горячего рельса мм	Размеры рельса после остывания до 50—60° С мм			Сокращение длины мм	Усадка в %
				головка	подошва	средн. для рельса		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
530—1	30	5	12 700	12 520	12 533	12 526	174	1,37
532—6	70	29	12 660	12 510	12 533	12 522	138	1,17
526—4	70	4	12 660	12 499	12 516	12 507	153	1,21
526—3	60	3	12 670	12 503	12 519	12 511	159	1,29
525—2	50	2	12 680	12 509	12 525	12 514	166	1,31
526—1	25	8	12 705	12 514	12 531	12 522	183	1,44
530—1	25	13	12 705	12 504	12 527	12 515	190	1,49
530—3	40	7	12 690	12 515	12 526	12 522	168	1,32
530—2	30	6	12 700	12 512	12 530	12 521	179	1,41
526—4	40	11	12 690	12 521	12 536	12 528	162	1,28
526—5	60	12	12 660	12 512	12 521	12 516	144	1,37
530—3	30	15	12 700	12 515	12 535	12 525	175	1,38
530—2	30	14	12 700	12 511	12 537	12 524	176	1,38
526—3	30	10	12 700	12 524	12 535	12 529	171	1,35
Среднее . . . . .			12 687	12 512	12 529	12 520	167	1,32

## 7. Количественное определение остаточных деформаций и напряжений в рельсах

Общими предпосылками к аналитическому расчету остаточных деформаций и напряжений в рельсах послужили нижеследующие основные выводы, полученные из работы.

а) При высоких температурах рельса (порядка 900—1000°) существует определенная область напряжений, внутри которой металл рельса ведет себя как упругий. Пределом этой области является некоторая условная величина, называемая пределом упругости.

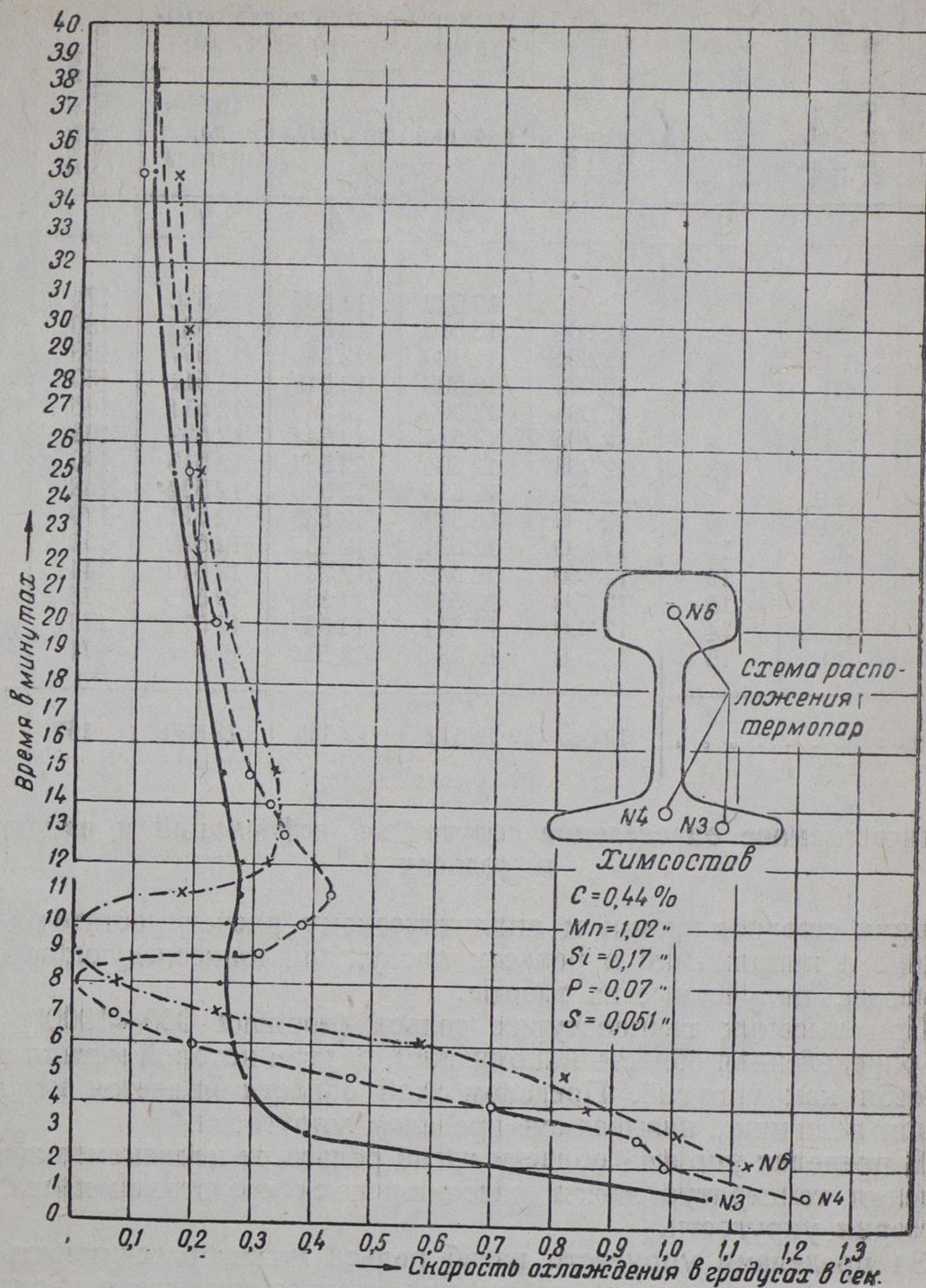
б) В пределах упругой области изгиб рельса от неравномерного распределения температур может рассчитываться средствами математической теории упругости.

в) За пределами упругости изгиб рельса может рассчитываться по приближенной схеме: после нарушения предела упругости происходит явление текучести металла и сохраняется величина напряжения. Происходящие при текучести металла удлинения являются остаточными.

г) Остаточным удлинениям волокон можно дать количественную оценку, а следовательно могут быть вычислены и остаточные стрелы прогиба рельсов.

В качестве метода решения задачи использован так называемый «прямой метод» решения. С помощью принципа Кастильяно решение ди-

Ференциального уравнения изгиба приводится к решению минимальной (собственно вариационной) задачи. Искомой является кривизна рельса.

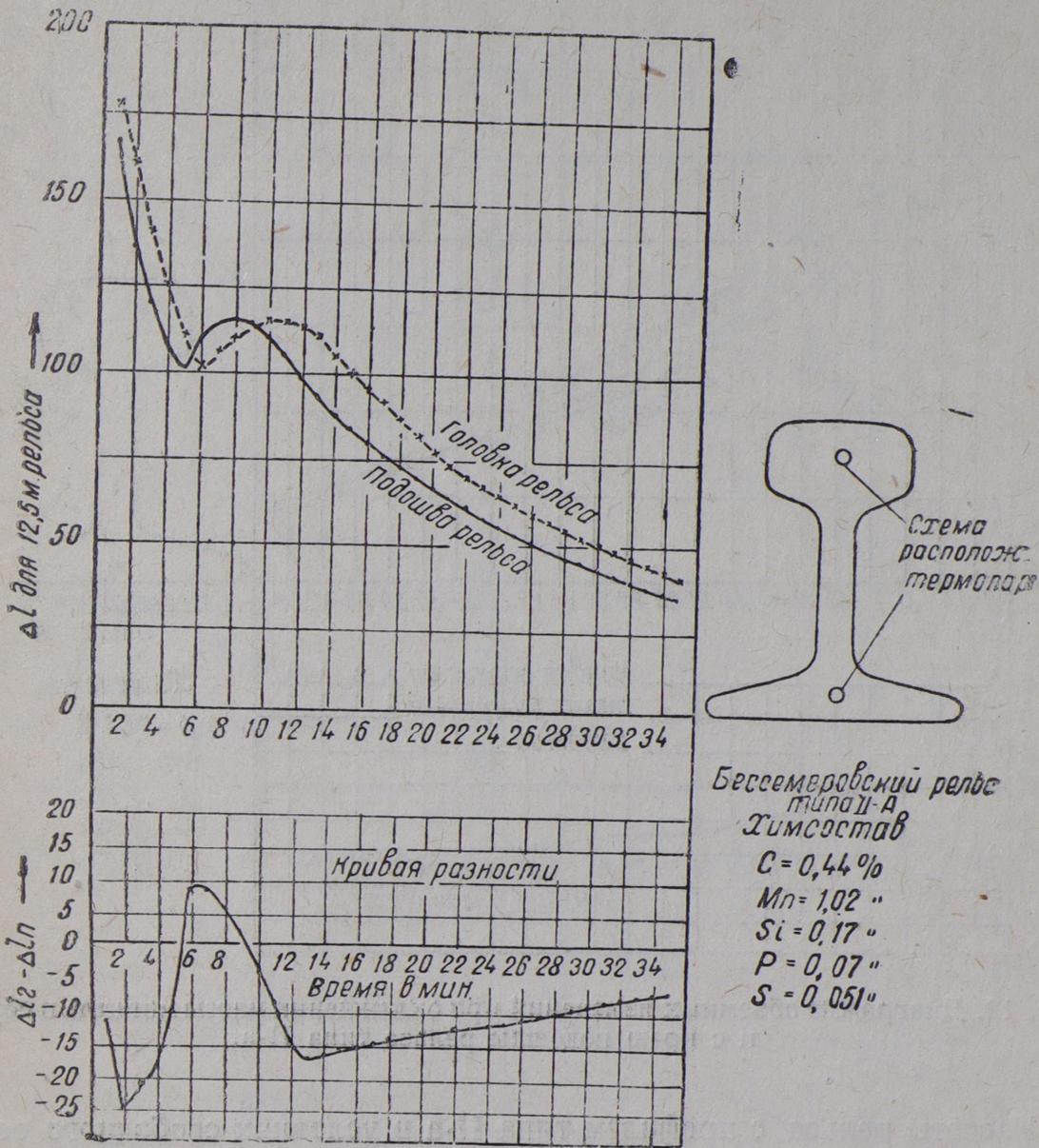


Фиг. 10. Кривые скорости охлаждения середины головки, середины подошвы и края подошвы рельса типа II-а в зависимости от времени.

Она принимается в первом приближении постоянной. Это допущение в первом приближении вполне законно. При большой длине рельса и равномерном охлаждении его по длине нет видимых причин для изме-

нения изгиба рельса по длине. В таком предположении потенциальная энергия рельса является простой квадратичной функцией кривизны рельса, и последняя находится средствами анализа из требования минимума потенциальной энергии.

Задачу можно было бы решить и в случае непостоянства кривизны рельса по его длине и даже в еще более общих случаях. При этом потен-

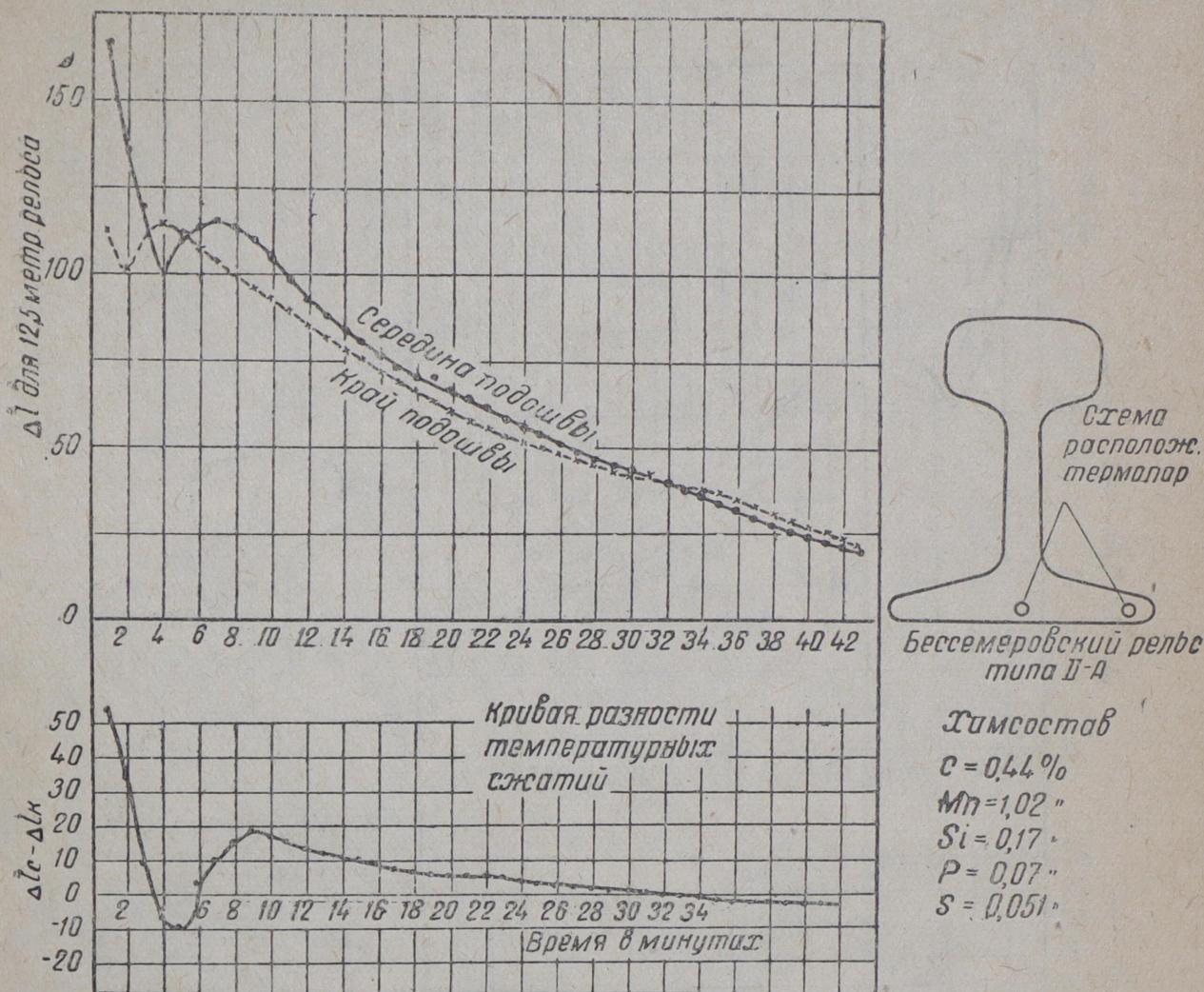


Фиг. 11. Диаграмма объемных изменений при охлаждении с прокатного нагрева массы металла в головке и подошве рельса типа II-а.

циальная энергия рельса выразится только в более сложном виде, и минимальная, собственно вариационная, задача станет многим сложнее.

В результате произведенных расчетов разработана математическая теория изгиба рельса, происходящего от неравномерного его остывания, и, как результат теории, даны формулы для определения остаточных стрел прогиба и напряжений в рельсах после остывания с температуры про-

катки<sup>1</sup>. Принимая во внимание, что для термического расчета рельса требуется обязательное знание его температурного поля,—результаты аналитического подсчета остаточных деформаций и напряжений в основном зависят от точности проведенного эксперимента по определению температуры в отдельных частях рельса при остывании.



Фиг. 12. Диаграмма объемных изменений при охлаждении массы металла в середине и с краю подошвы рельса типа II-а.

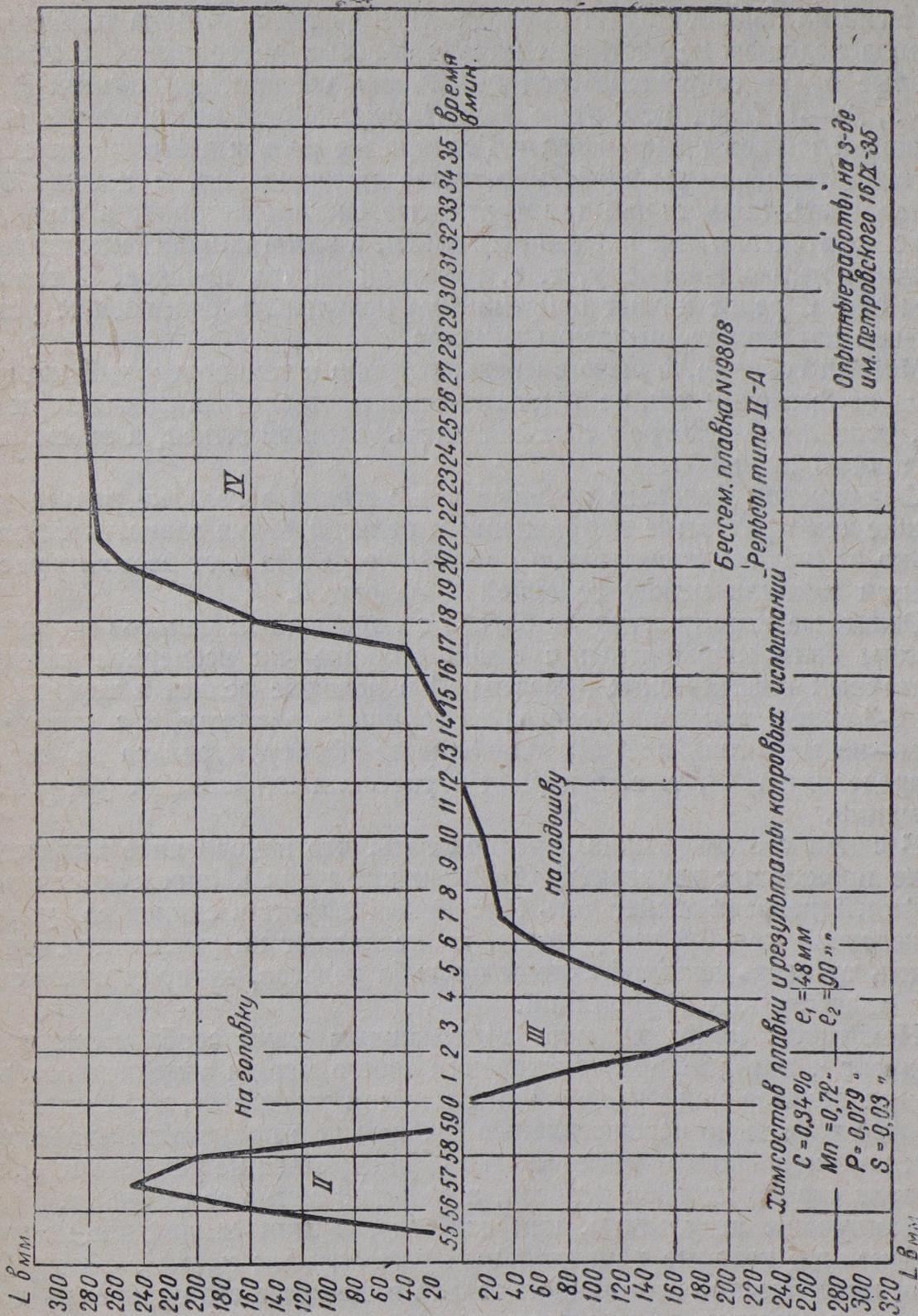
Расчеты рельса с профилем типа II-а в условиях свободного остывания на воздухе показали, что наибольшие остаточные пластические деформации приобретаются рельсом вследствие перенапряжения в подошве в момент перехода металлом последних фазовых превращений, т. е. когда подошва рельса испытывает максимальные растягивающие усилия вследствие искривления рельса на головку.

Остаточные термические напряжения в рельсах типа II-а, в тех же условиях остывания, по своей абсолютной величине сравнительно невелики и совпадают весьма близко с приведенными выше экспериментальными данными Мейера.

<sup>1</sup> Метод математического расчета изгиба рельса разработан и расчеты проведены под непосредственным руководством проф. А. А. Померанцева.

## 8. Заключение

Физическая сущность коробления рельсов при охлаждении после прокатки может иметь следующее объяснение



Фиг. 13. Схематическое изображение последовательного искривления рельса при охлаждении после прокатки.

Рельс после разрезки поступает для охлаждения на стеллажи с температурой головки, примерно около  $950^\circ$ , и подошвы около  $900^\circ \text{C}$ . В первое время, вследствие большей поверхности охлаждения подошвы

и имеющейся уже прокатной разницы в температурах между головкой и подошвой рельса, последняя будет претерпевать достаточно большие температурные сжатия, превышающие по своей абсолютной величине такие же сжатия в головке, и рельс вследствие этой разницы в сжатиях получает первоначальное искривление на подошву (фиг. 13).

Изгиб на подошву будет продолжаться до тех пор, пока температура металла подошвы не достигнет начала фазовых превращений в металле, которые будут сопровождаться небольшим увеличением объема (точки  $Ar-3$ ,  $Ar-1$ ) (фиг. 5). С этого момента дальнейшее искривление рельса подошвой внутрь прекращается. Головка же рельса в это время еще не достигла температуры начала фазового превращения, а потому будет претерпевать нормальные температурные сжатия металла, в силу чего рельс постепенно начнет выпрямляться, а затем получит искривление, обратное первоначальному, т. е. головкой внутрь прогиба. С температуры  $650^{\circ}C$  рельс начнет попрежнему испытывать сжимающие усилия по мере падения температуры металла.

Металл головки, в свою очередь, вступив в температурный интервал фазового превращения, не будет временно претерпевать сжимающих усилий, вследствие чего рельс начнет вновь выпрямляться, а затем получит прогиб на подошву.

С переходом фазового превращения металла в головке рельса дальнейшие температурные напряжения в рельсах будут зависеть исключительно от разности температур по сечению рельса и от весового распределения металла между головкой и подошвой.

Основные мероприятия по борьбе с короблением рельсов на заводах должны быть направлены: с одной стороны—на всемерное снижение остаточных пластических деформаций в подошве рельса в течение первых 2-3 минут остывания рельса на горячих стеллажах, и с другой стороны—на максимальное выравнивание температуры рельса по сечению за пределами  $600^{\circ}$ , т. е. в период нарастания наибольших упругих деформаций.

В связи с этим можно предполагать, что замедленное охлаждение после прокатки с температурой  $600^{\circ}$  и ниже для наших существующих профилей рельсов может дать бесспорный эффект в снижении упругих последствий коробления рельсов, но не сможет ни уменьшить, ни увеличить ту часть видимой стрелы прогиба рельсов, которая возникла за счет пластических деформаций.

Некоторое подтверждение высказанным нами соображениям дает Сандберг<sup>1</sup>, который при обосновании своего метода замедленного охлаждения рельсов под футерованным навесом указывает, что экспериментальные работы по осуществлению его метода в производственных условиях на английском виньолевском профиле рельса не устраняют окончательную стрелу прогиба рельсов, а только заметно ее снижают.

Наилучшие результаты, как известно, в этом отношении получают американцы, которые рациональным размещением металла по профилю свели пластические деформации рельса в процессе его остывания до минимума, а упругие последствия снимают в процессе производства замедленным остыванием.

<sup>1</sup> «Metals and Alloys», № 4, 1932, стр. 89—92.