

Исследование структуры и свойств

Физические методы исследования и контроля

УДК 669.539.382:669:17:669.046

АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ В РЕЛЬСАХ, ПОДВЕРГНУТЫХ ОБЪЕМНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ЗАКАЛКЕ¹

© К. В. Морозов², В. Е. Громов³, Ю. Ф. Иванов⁴,
А. М. Глезер⁵, В. А. Батаев⁶

Статья поступила 27 мая 2014 г.

Проведен сравнительный анализ структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры, формирующихся на разной глубине от поверхности катания по центральной оси и выкружке рельсов, подвергнутых объемной закалке в масле, а также дифференцированной закалке сжатым воздухом. Исследованы объемная доля цементита, параметр решетки α -Fe, микронапряжения, области когерентного рассеяния, относительное содержание структурных составляющих, межпластинчатое расстояние, плотность изгибных экстинкционных контуров.

Ключевые слова: структура; фазовый состав; рельсы; закалка; электронная микроскопия.

Технология объемной закалки 25-метровых рельсов с печного нагрева, сыграв положительную роль на определенном этапе развития железных дорог России, постепенно себя исчерпала. Как показывает анализ различных видов термообработки рельсов [1 – 4], для 100-метровых рельсов более перспективной и эффективной является технология дифференцированной закалки с прокатного нагрева. Вопросы формирования структурно-фазовых состояний при закалке являются предметом тщательного рассмотрения с точки зрения как научных исследований, так и опытно-конструкторских и технологических разработок. Закономерности формирования структуры, фазового состава, дислокационной структуры при объемной и дифференцированной закалке приведены в работах [5 – 9], где методами современного физического материаловедения исследованы количественные параметры и природа образования структуры по разным направлениям от поверхности катания.

Цель настоящей работы, продолжающей исследования [5 – 9], — сравнительный анализ структурно-фазовых состояний и дефектной структуры, формирующихся в рельсах в результате объемной закалки в масле и дифференцированной закалки сжатым воздухом.

Как и в работах [5 – 9], для исследований использованы образцы объемно-закаленных рельсов категорий «В», «ИК», «НЭ» и дифференцированно закаленных ДТ 350 по трем режимам (ГОСТ 51685–2000, ГОСТ 24182–80, ГОСТ 1778–70, ГОСТ 18267–82), приведенным в работах [5, 8, 9]. Морфологию и дефектную субструктуру выявленных фаз, анализ внутренних полей напряжений, установление мест лока-

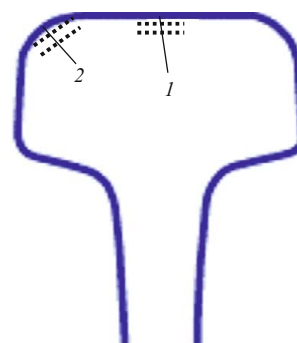


Рис. 1. Схема образца рельса при исследовании его структуры методами электронной дифракционной микроскопии: сплошными линиями выделены направления исследования по центральной оси (1) и по выкружке (2); пунктирными — условно указаны места расположения слоев металла, использованных для приготовления фольги

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12009 офи_м, госзадания Минобрнауки 2708ГЗ и № 3.1496.2014/К.

² ОАО «Евраз-ЗСМК», г. Новокузнецк, Россия; e-mail: Vadim.Kosterev@evraz.com

³ Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия, e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

⁴ Томский национальный исследовательский политехнический университет, г. Томск, Россия; e-mail: yufi55@mail.ru; Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия.

⁵ ЦНИИЧермет имени И. П. Бардина, Москва, Россия; e-mail: a.glezer@mail.ru

⁶ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия; e-mail: vabataev@yandex.ru

лизации концентраторов напряжений исследовали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (ПЭМ) тонких фольг [10, 11] в слоях, расположенных на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности катания (рис. 1).

Фазовый состав исследовали методами рентгено-структурного анализа путем использования метода внешнего стандарта — так называемого метода корундовых чисел. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) и микронапряжения ($\Delta d/d$) для α -железа рассчитывали по методу Вильямсона – Холла по пикам, расположенным на (2θ) 44 и 116 град [12, 13].

В поверхностном слое рельсовой стали толщиной ~10 мм независимо от режима термической обработки (дифференцированная или объемная закалка) формируется поликристаллическая структура, представленная зернами перлита пластинчатой морфологии — эвтектоидной смесью феррита и цементита, в которой обе фазы имеют форму вытяженных пластинок (рис. 2, *а*), зернами феррита, в объеме которых наблюдаются частицы цементита сферической, глобулярной и пластинчатой форм (далее — зерна ферритно-кар-

бидной смеси) (рис. 2, *в, з*), а также зернами структурно-свободного феррита, т.е. не содержащими в объеме частиц карбидной фазы (рис. 2, *д*). Основная структурная составляющая рельсов независимо от режима термической обработки — зерна пластинчатого перлита. Для выявления степени однородности структуры рельсов сравнивали соответствующие параметры по центральной оси и на выкружке. Степень неоднородности структуры рельсов определяли из соотношения

$$\Delta(X) = X_1 - X_2,$$

где X_1 , X_2 — средние значения параметра структуры стали по центральной оси и по выкружке соответственно.

Установлено, что в слое толщиной ~10 мм более однородная структура (более близкие параметры по центральной оси и по выкружке, выявленные при исследовании стали методами дифракции рентгеновских лучей) формируется при объемной закалке рельсов (табл. 1).

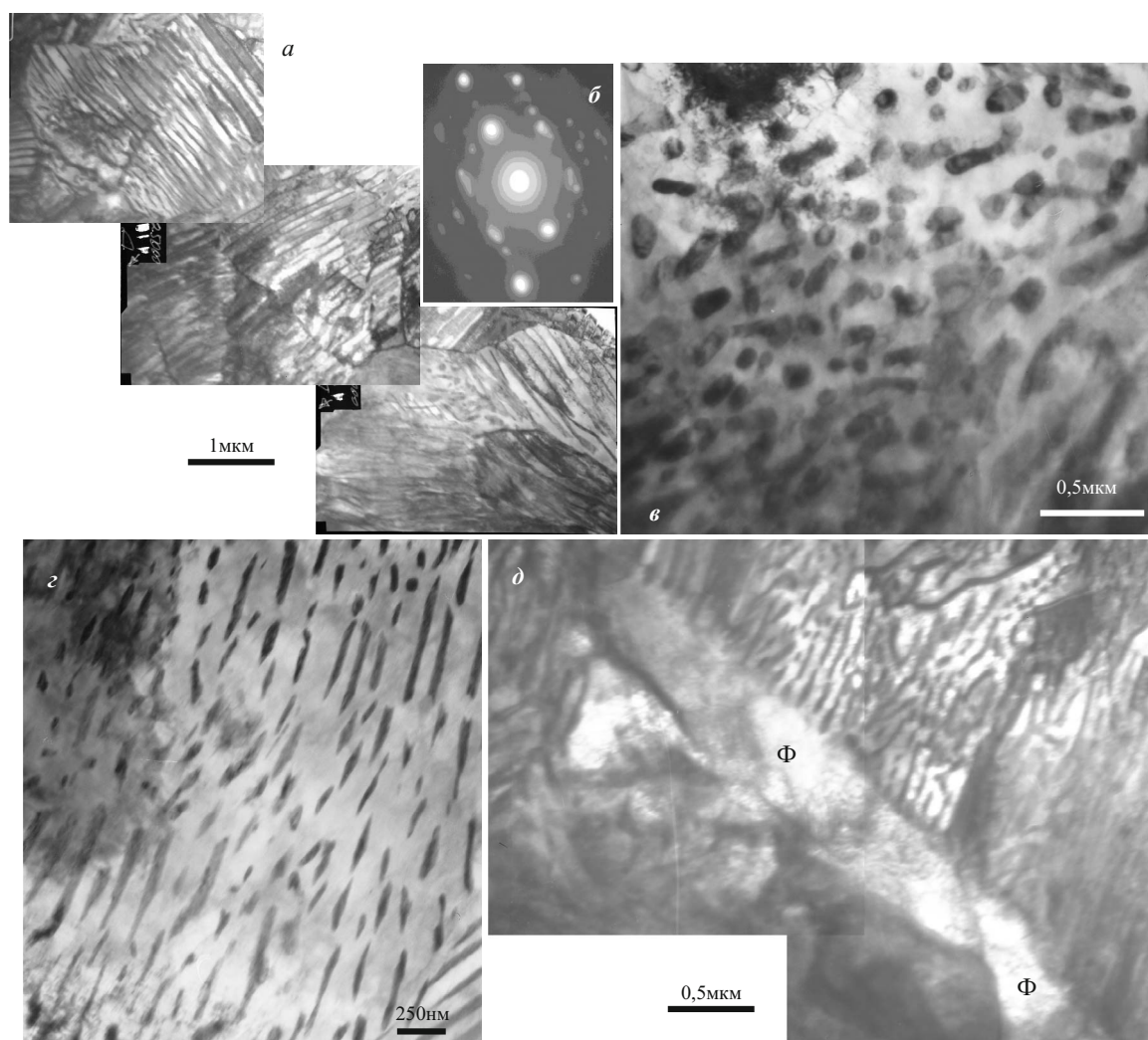


Рис. 2. ПЭМ изображения структуры рельсов: *а, в – д* — светлопольные изображения; *б* — микроэлектронограмма; *д* — Φ -зерно структурно-свободного феррита

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа параметров структуры рельсов, полученных методами дифракции рентгеновских лучей

Режим обработки — закалка	Номер режима, категория рельсов	$\Delta V(\text{Fe}_3\text{C})$, %	Δa ($\alpha\text{-Fe}$), Å	$\Delta(\Delta d/d)$	$\Delta D_{(\text{ОКР})}$, нм
Дифференцированная	1	3,7	0,0026	0,002	25,2
	3	1,4	0,0018	0,001	24,1
Объемная	НЭ	0,9	0,0006	0,00	5,1

Примечания. $\Delta V(\text{Fe}_3\text{C})$, Δa ($\alpha\text{-Fe}$), $\Delta(\Delta d/d)$, $\Delta D_{(\text{ОКР})}$ — неоднородности структуры рельсов по объемной доле цементита; по параметру решетки $\alpha\text{-Fe}$; по микронапряжениям; по размерам областей когерентного рассеяния соответственно.

Таблица 2. Неоднородность относительного содержания структурных составляющих рельсов

Режим обработки — закалка	Расстояние от поверхности, мм	$\Delta V(1)$	$\Delta V(2)$	$\Delta V(3)$
Объемная	2	0,08	0,08	0,00
	10	0,05	0,06	0,01
Дифференцированная	2	0,10	0,10	0,00
	10	0,04	0,04	0,00

Примечания. $\Delta V(1)$, $\Delta V(2)$, $\Delta V(3)$ — неоднородности относительного содержания зерен перлита, феррито-карбидной смеси, структурно-свободного феррита соответственно.

Таблица 3. Неоднородность структуры рельсов по величине межпластинчатого расстояния зерен перлита и плотности изгибных контуров

Режим обработки — закалка	Расстояние от поверхности, мм	Δh , нм	$\Delta \delta$, 10^2 см^{-2}
Объемная	2	11	1,1
	10	10	0,1
Дифференцированная	2	18	0,6
	10	3	0,4

Из анализа результатов по неоднородности структурных составляющих рельсов (табл. 2) следует, что после объемной закалки структура более однородна в приповерхностном слое стали (толщиной ~2 мм и менее однородна в слое, расположенном на расстоянии ~10 мм от поверхности катания (по сравнению со структурой стали, формирующейся в результате дифференцированной закалки).

К аналогичному выводу можно прийти, анализируя данные по дисперсности перлита (табл. 3).

Ранее [5 – 9] отмечалось, что электронно-микроскопические изображения структуры образцов рельсов практически всегда (независимо от категории рельсов и режима закалки) содержат изгибные контуры экстинкции (рис. 3). Наличие на электронно-микроскопических изображениях изгибных контуров экстинкции указывает на изгиб-кручение кристаллической решетки данной области материала, а следовательно, на внутренние поля напряжений, искривляющие тонкую фольгу [10, 11].

Морфология изгибных экстинкционных контуров характеризует градиент изгиба-кручения кристаллической решетки материала, величина поперечного

размера контуров — амплитуду изгиба-кручения кристаллической решетки [14, 15]. Изучая характер и расположение экстинкционных изгибных контуров в структуре материала, можно сделать заключение об источниках (концентраторах) внутренних полей напряжений, объемах их локализации и путях компенсации.

В рельсах концентраторами напряжений являются внутрифазные границы раздела зерен феррита и перлита (см. рис. 3, а, б), зерен перлита и колоний перлита (см. рис. 3, в, г)] и межфазные границы раздела пластин цементита и феррита в перлите (см. рис. 3, в, г), границы раздела глобулярная частица/матрица (см. рис. 3, е). Изгибные экстинкционные контуры наблюдаются и в объеме сравнительно крупных (десятые доли микрометра) частиц цементита. Обращает на себя внимание следующий факт: границы раздела глобулярная частица/матрица являются источниками внутренних полей напряжений исключительно в стали, подвергнутой объемной закалке (см. рис. 3, е).

Величина внутренних полей напряжений обратно пропорциональна поперечным размерам изгибного контура [14, 15]:

$$\sigma_{\tau} = Gt \frac{\partial \varphi}{\partial l} \approx 10^{-2} G \frac{t}{h}, \quad (1)$$

где h — поперечный размер изгибного экстинкционного контура; t — толщина фольги; G — модуль сдвига стали; $\partial \varphi$ — изменение ориентировки отражающей плоскости фольги; ∂l — величина перемещения изгибного контура [14 – 16].

Независимо от категории стали и режима закалки изгибные экстинкционные контуры минимальных поперечных размеров формируются у глобулярных частиц карбидной фазы, расположенных в зернах феррито-карбидной смеси (см. рис. 3, е). Более широкие изгибные контуры фиксируются у межфазных границ. К примеру, контур экстинкции, формирующийся у границ раздела колоний перлита, имеет ширину, изменяющуюся в пределах от 170 до 300 нм; у границ раздела зерен перлита и феррита — от 150 до 200 нм; у границы раздела глобулярной частицы цементита и ферритной матрицы — от 70 до 100 нм. Используя соотношение (1), можно оценить амплитуду внутренних полей напряжений, присутствие которых приво-

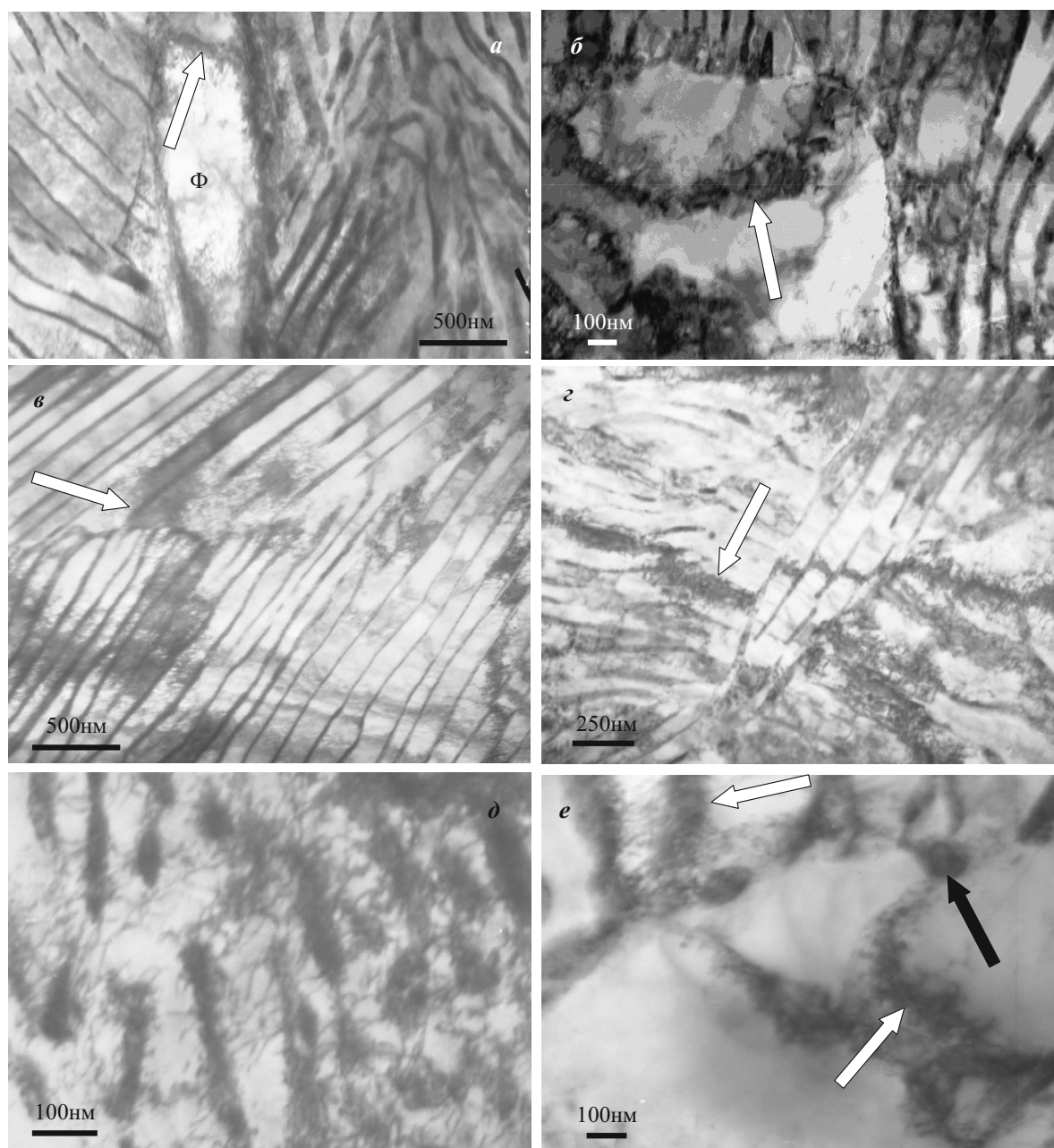


Рис. 3. ПЭМ изображения структуры рельсов после дифференцированной (*а, в, д*) и объемной закалки, а также последующего отпуска (*б, г, е*) (светлыми стрелками указаны изгибные контуры экстинкции, темной — частица второй фазы, являющаяся источником полей напряжений)

дит к изгибу — кручению кристаллической решетки стали. Принимая толщину фольги $t \approx 200$ нм, модуль сдвига стали $G \approx 80$ ГПа, получаем, что внутрифазные границы раздела генерируют поля напряжений величиной (0,5 – 0,9) ГПа, а межфазные границы (частица/матрица) — (1,6 – 2,3) ГПа. Предел текучести стали исследуемых рельсов $\sim 0,85$ ГПа, предел прочности $\sim 1,25$ ГПа. Сопоставляя оценочные результаты с прочностными характеристиками, можно заключить, что внутренние поля напряжений, формируемые внутрифазными границами раздела, не превышают предела текучести; внутренние поля напряжений, генерируемые межфазными границами раздела (частица/матри-

ца), могут достигать величины предела прочности и являться опасными концентраторами внутренних напряжений, способными при эксплуатации изделия привести к формированию микротрещин.

Ранее уже отмечалось, что такие потенциально опасные концентраторы напряжений формируются преимущественно в рельсах после объемной закалки. Анализируя результаты неоднородности рельсов по плотности изгибных экстинкционных контуров $\Delta\delta$ (см. табл. 3), можно заключить, что после объемной закалки структура рельсов менее однородна по этому параметру в приповерхностном слое толщиной ~ 2 мм и более однородна в слое, расположенном на расстоянии ~ 10 мм от поверхности катания.

Таким образом, методами современного физического материаловедения выполнен сравнительный анализ структурно-фазовых состояний, формирующихся на разной глубине от поверхности катания по центральной оси и выкружке в рельсах в результате объемной и дифференцированной закалки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов В. Е., Юрьев А. Б., Морозов К. В., Иванов Ю. Ф. Микроструктура закаленных рельсов. — Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2014. — 213 с.
2. Актуальные проблемы производства рельсов. / Под ред. Громова В. Е. — Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2001. — 260 с.
3. Шур Е. А. Повреждения рельсов. — М.: Интекст, 2012. — 225 с.
4. Снитко Ю. П. Челябинские рельсы будут лучшими / Металлы Евразии. 2009. № 1. С. 42 – 46.
5. Волков К. В., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф. и др. Формирование структуры, фазового состава и тонкой субструктуры в дифференцированно закаленных рельсах / Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11. № 1. С. 50 – 55.
6. Громов В. Е., Волков К. В., Иванов Ю. Ф. и др. Структура, фазовый состав и дефектная субструктура рельсов высшей категории качества / Известия вузов. Физика. 2014. № 2. С. 72 – 76.
7. Громов В. Е., Волков К. В., Иванов Ю. Ф. и др. Формирование тонкой структуры в рельсах низкотемпературной надежности / Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 4. С. 61 – 68.
8. Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Волков К. В. и др. Формирование градиентов структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в рельсах при дифференцированной закалке / Перспективные материалы. 2014. № 3. С. 40 – 45.
9. Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Глезер А. М. и др. Дифференцированная закалка рельсов: структура, фазовый состав и дефектная субструктура поверхностного слоя / Деформация и разрушение материалов, 2014. № 5. С. 42 – 46.
10. Хирш П., Хови А., Николсон Р. и др. Электронная микроскопия тонких кристаллов. — М.: Мир, 1968. — 574 с.
11. Томас Г., Гориндж М. Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. — М.: Наука, 1983. — 320 с.
12. Vilsons Y. C. Mathematical theory of x-ray powder diffractometry — Eindhoven: Contrex, 1963. — 128 p.
13. Фарбер В. М., Архангельская Л. А. Дифракционные методы анализа. — Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2004. — 107 с.
14. Иванов Ю. Ф., Корнет Е. В., Козлов Э. В., Громов В. Е. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения. — Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. — 174 с.
15. Громов В. Е., Козлов Э. В., Базайкин В. И. и др. Физика и механика волочения и объемной штамповки. — М.: Недра, 1997. — 293 с.
16. Конева Н. А., Козлов Э. В., Тришкина Л. И. и др. Дальнедействующие поля напряжений, кривизна-кручение кристаллической решетки и стадии пластической деформации. Методы измерений и результаты / Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела. Сб. трудов международной конференции. — Томск: ТГУ, 1990. С. 83 – 93.