

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА НЕТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ МИНСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

**В. А. Андрияшин¹, В. И. Комарова¹, А. И. Комаров¹, В. И. Матвеев²,
А. А. Кебиков²**

¹*Институт механики и надежности машин НАНБ, г. Минск*

²*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Проанализирована микроструктура, остаточные макронапряжения, микродеформации, микротвердость рельсов в исходном состоянии и после эксплуатации. Показано, что микроструктура поверхности катания головки рельсов из прямого и кривого участков пути после эксплуатации имеют близкий характер.

Малые осевые нагрузки, короткие интервалы движения поездов и сравнительно высокая грузонапряженность в метрополитене определяют тяжелые условия работы рельсов. В этих условиях рельсы должны обладать следующими основными свойствами: износостойкостью, усталостной прочностью, высокой сопротивляемостью хрупкому излому, низкими внутренними напряжениями, высокой долговечностью.

Известно, что все эти свойства в значительной мере определяются структурой и составом металла, которые, в свою очередь, зависят от режимов изготовления рельсов, в том числе режимов их термической обработки [1, 2]. При разработке технологических решений повышения долговечности рельсов большое значение имеют сведения об их структуре как на стадии изготовления, так и после эксплуатации.

Цель данного исследования состояла в изучении и анализе микроструктуры, остаточных макронапряжений, микродеформаций, микротвердости рельсов после эксплуатации и в исходном состоянии.

Объектом исследования являлись рельсы метрополитена. Образцы изготавливались из рельсов, вырезанных из прямого и кривого участков пути, и представляли собой срезы, параллельные поверхности катания и боковой поверхности скольжения головки (таблица 1). Высота среза исходного образца и образца, соответствующего рельсу из прямого участка, составляла 10–11 мм, рельсу из кривого участка – 3–4 мм.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых образцов

Номер образца	Состояние	Тип участка, где использовался исследуемый рельс	Исследуемая поверхность
1	Исходное	-	Поверхность катания
2	После эксплуатации	Прямая	Поверхность катания; слой, удаленный от поверхности на 460 мкм; слой, удаленный от поверхности на 1330 мкм
3		Кривая радиусом 600 м	Поверхность катания; слой, удаленный от поверхности на 420 мкм; слой, удаленный от поверхности на 790 мкм
4			Боковая поверхность; слой, удаленный от поверхности на 645 мкм

Методика исследований. Основное внимание при исследованиях уделялось изучению структурных характеристик поверхности катания и боковой поверхности скольжения головки рельса. Наряду с этим проводилось изучение структуры их поперечного сечения. Для более систематического изуче-

ния особенностей формирования структур в зонах поверхности катания и боковой поверхности головки рельсов было предпринято изучение их подповерхностных зон. Это достигалось путем электролитического удаления слоев из рабочих поверхностей (см. таблицу 1).

Проводилось также исследование эталонного образца, полученного из материала исходного рельса путем рекристаллизационного отжига.

Для изучения микроструктуры исследуемых образцов готовились поперечные шлифы головки рельса. Исследования проводились с использованием рентгеноструктурного и металлографического анализов.

Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре ДРОН-3М, съемка осуществлялась в режиме сканирования с шагом $0,1^\circ$ в CuK_α -излучении. С целью обеспечения высокой чувствительности использованных методов запись дифракционных отражений проводилась в монохроматизированном вторичном излучении.

Рентгенофазовый анализ образцов проводился в интервале углов рассеяния $2\theta=20\dots70^\circ$. Продолжительность набора импульсов в каждой точке составляла 20 с. Для фазового качественного анализа использовалась стандартная картотека PDF [3].

Оценка структурных характеристик исследованных образцов проводилась вдоль и поперек рабочих поверхностей головки рельса. Остаточные макронапряжения в исследуемых зонах образцов определялись методом рентгеновской тензометрии с использованием наклонной съемки [4–6]. При этом съемки осуществлялись под углами наклона $\psi = 0, 10, 20, 30, 40, 50^\circ$.

Структурное состояние поверхностей трения головки рельса, а также микроискажения в этих зонах определялись на основе анализа физического уширения и углового положения дифракционных линий (110), (200), (220), (222) CuK_α матричной α -фазы.

Для более полного представления о процессах, происходящих в материале рельсов в процессе эксплуатации, проводилось изучение распределения микротвердости в поперечном сечении головки от поверхности катания и от боковой поверхности. Измерение микротвердости структурных составляющих в этих зонах выполнялось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузках на индентор 0,49; 0,98 Н.

Исследование фазового состава металла. На рисунке 1, а представлена дифрактограмма поверхности катания образца в исходном состоянии (до эксплуатации). На этой дифрактограмме отчетливо видны два интерференционных максимума с межплоскостным расстоянием d/n 2,032 Å, 1,437 Å, которые относятся к матричной α -фазе (α -Fe) стали и соответствуют ее линиям (110) и (200) CuK_α .

Наряду с этим наблюдается ряд максимумов со значительно меньшей интенсивностью. Проведенный анализ показал, что эти отражения можно сформировать в три группы, соответствующие орторомбическому карбиду Fe_3C , оксиду кремния SiO_2 и сульфидам FeS , MnS .

После эксплуатации рельсов фазовый состав поверхности катания как в случае рельса из прямого, так и из кривого участков качественно не отличается от состава исходного образца (рисунок 1, б, в).

На основании сопоставления полученных данных можно сделать заключение, что эксплуатация рельсов не оказывает какого-либо заметного влияния на фазовый состав поверхности катания и количественное содержание цементита и неметаллических включений (сульфидов и силикатов) в них.

Исследование остаточных макронапряжений. Оценка остаточных макронапряжений в поверхностных слоях дорожки катания и боковой поверхности скольжения проводилась методом наклонной съемки [4–6]. Напряжения определялись в двух направлениях головки рельсов – вдоль и поперек. Расчет напряжений выполнялся по формуле [5, 6]

$$\sigma_\psi = E/1 + \mu \text{ctg} \theta_0 (\theta_0 - \theta_\psi), \quad (1)$$

где E – модуль упругости стали; μ – коэффициент Пуассона; θ_0, θ_ψ – углы дифракции при рентгеновских съемках под углами наклона 0 и ψ° соответственно.

Результаты исследований приведены в таблице 2.

Как следует из таблицы 2, на поверхности катания головки рельса исходного образца обнаружены напряжения сжатия, при этом вдоль и поперек дорожки эти напряжения имеют одну и ту же величину, равную 154 МПа.

Сжимающие напряжения существуют также на поверхности катания для образца из прямого участка рельса, прошедшего эксплуатацию. Однако значения напряжений в осевом направлении рельса и поперек заметно различаются. Следует отметить, что после эксплуатации уровень напряжения в продольном направлении ниже по сравнению с исходным состоянием. На расстоянии 460 мкм от по-

верхности, равном толщине удаленного поверхностного слоя, наблюдается дальнейшее снижение сжимающих напряжений до значения 26 МПа. Что же касается поперечного направления, то удаление от поверхности на 460 мкм практически не приводит к изменению знака и величины напряжений. Снижение уровня напряжений в продольном направлении, по-видимому, следует связывать с появлением в этом направлении растягивающих напряжений.

Таблица 2 – Напряжения поверхностных слоев образцов

Образец	Исследуемая зона	Напряжение, МПа	
		вдоль головки рельса	поперек головки рельса
№ 1 исходный (до эксплуатации)	Поверхность катания	- 154	-154
№ 2 (из прямого участка)	Поверхность катания	- 41	- 113
	460 мкм от поверхности	- 26	- 103
	1330 мкм от поверхности	+ 77	- 20
№ 3 (из кривого участка)	Поверхность катания	+ 51	- 232
	420 мкм от поверхности	- 71	-71
№ 4 (из кривого участка)	Боковая поверхность	- 130	- 390
	460 мкм от поверхности	- 71	- 80

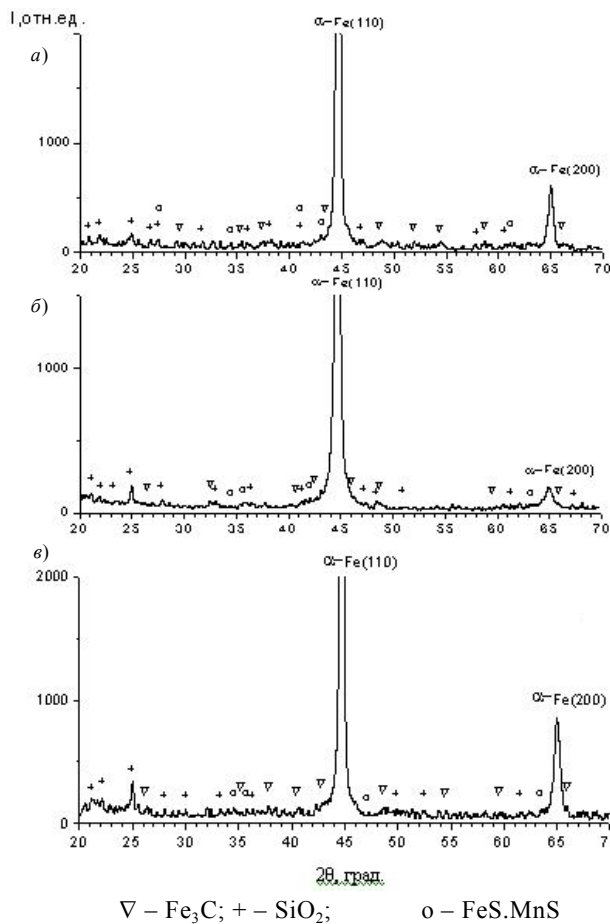


Рисунок 1 – Фрагменты дифрактограмм поверхностей катания исследуемых образцов: а – исходный; б, в – после эксплуатации (б – рельс из прямого участка, в – рельс из кривого участка)

Действительно, как следует из представленных результатов, удаление от поверхности катания на 1330 мкм приводит к появлению в продольном направлении растягивающих напряжений, равных 77 МПа. В этих слоях в поперечном направлении по-прежнему регистрируются сжимающие напряжения, однако они снижаются до значения 20 МПа. Различие значений напряжений в продольном и поперечном направлениях в исследуемых зонах поверхности катания головки рельса из прямого участка свидетельствует о некоторой анизотропии свойств материала.

После эксплуатации рельса на кривом участке в поверхностных слоях, согласно полученным данным, формируются неоднородные по характеру напряжения. В продольном направлении они являются растягивающими (51 МПа), в поперечном – сжимающими (232 МПа). Следует отметить, что напряжения в этом направлении примерно в 2 раза превышают уровень напряжений для рельса из прямого участка. С удалением от поверхностного слоя напряжения снижаются. При этом как в продольном, так и поперечном направлениях они сжимающие и на расстоянии 420 мкм от поверхности составляют 71 МПа.

Эксплуатация рельсов в кривых участках приводит к формированию в продольном и поперечном направлениях на боковой поверхности сжимающих напряжений. Как следует из сопоставления полученных результатов, напряжения на боковой поверхности, по сравнению с напряжениями на поверхности катания, характеризуются более высоким уровнем. Так, для поперечного направления величина σ_{ψ} достигает 390 МПа, что в 3 раза превышает соответствующие напряжения для поверхности катания головки рельса из прямого участка, и в 1,5 раза выше напряжений, регистрируемых для рельса из кривого участка. По мере удаления от боковой поверхности напряжения также снижаются, и на расстоянии 460 мкм от нее составляют 71 и 80 МПа, соответственно для продольного и поперечного направлений. Следует подчеркнуть, что такой уровень напряжений регистрируется практически для всех исследуемых образцов при удалении от поверхности примерно на 420–460 мкм.

На основании полученных данных можно заключить, что технологический процесс изготовления рельсов сопровождается формированием в поверхностных слоях головки сжимающих напряжений. По истечении заданного ресурса эксплуатации поверхностные слои головки рельса из прямого участка также характеризуются наличием в них сжимающих напряжений как в продольном, так и поперечном направлении. На поверхности катания головки рельса из кривого участка в продольном направлении образуются растягивающие напряжения, в поперечном – сжимающие. Поверхностные слои боковой поверхности характеризуются наиболее высоким уровнем напряжений, которые вызывают эффект сжатия. По мере удаления от поверхности во всех случаях наблюдается снижение уровня напряжений.

Рентгеновское исследование структуры. С целью получения сведений о структурном состоянии матричной фазы исследовался ряд ее дифракционных линий. В качестве примера на рисунках 2–5 представлены профили дифракционной линии (220) CuK_{α} , записанных от рабочих поверхностей исследуемых образцов. В начале каждой серии дифрактограмм приведена линия эталона, приготовленного путем рекристаллизационного отжига образца из исходного рельса. Видно, что линия (220) CuK_{α} эталонного образца с низкой степенью дефектности кристаллической решетки характеризуется достаточно узким профилем с четко разрешаемыми $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ дублетами.

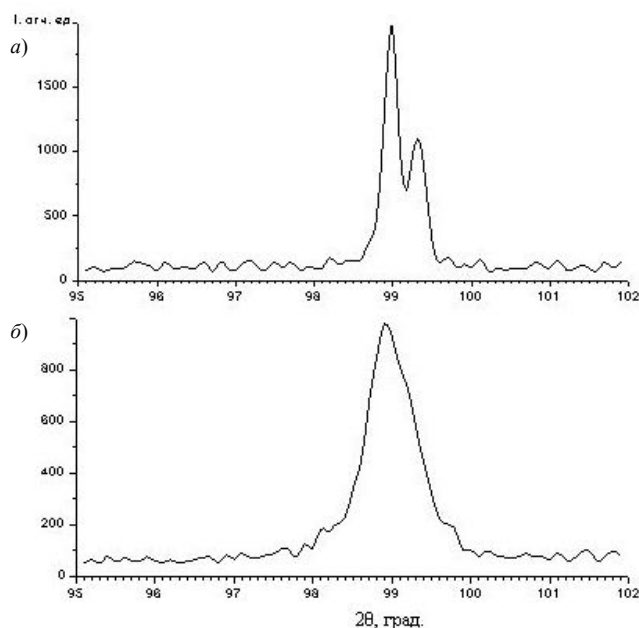


Рисунок 2 – Профиль линии (220) эталона (а) и исходного образца (б)

Как следует из приведенных данных, дифракционные картины от поверхностей катания и боковой поверхности образцов рельсов существенно отличаются от вида линии (220) эталона. Уже в исходном материале рельса дифракционная линия претерпевает значительное размытие профиля, при этом дублетные ее максимумы практически не разрешаются (рисунок 2). Еще большему размытию подвержены линии (220) CuK_α , записанные от поверхностей катания образцов из прямого (рисунок 3) и кривого (рисунок 4) участков, боковой поверхности скольжения (рисунок 5), что свидетельствует об относительно высокой плотности дефектов кристаллической решетки [7–8] материала рельсов как в исходном состоянии, так и после эксплуатации.

Природа размытия дифракционных линий исследуемых материалов может быть установлена на основе исследования закономерностей изменения уширения отражений, расположенных на различных углах рассеяния. Если уширение соответствующих дифракционных линий пропорционально $\text{tg}\theta$, то размытие связано с формированием в материале дислокационных структур. Если же уширение линий изменяется пропорционально $\text{sec}\theta$, то причина размытия отражений заключена в образовании в процессе деформации фрагментированных ячеистых структур [9, 10]. На основе этих позиций проведен анализ рентгеновских данных, полученных при исследовании образцов.

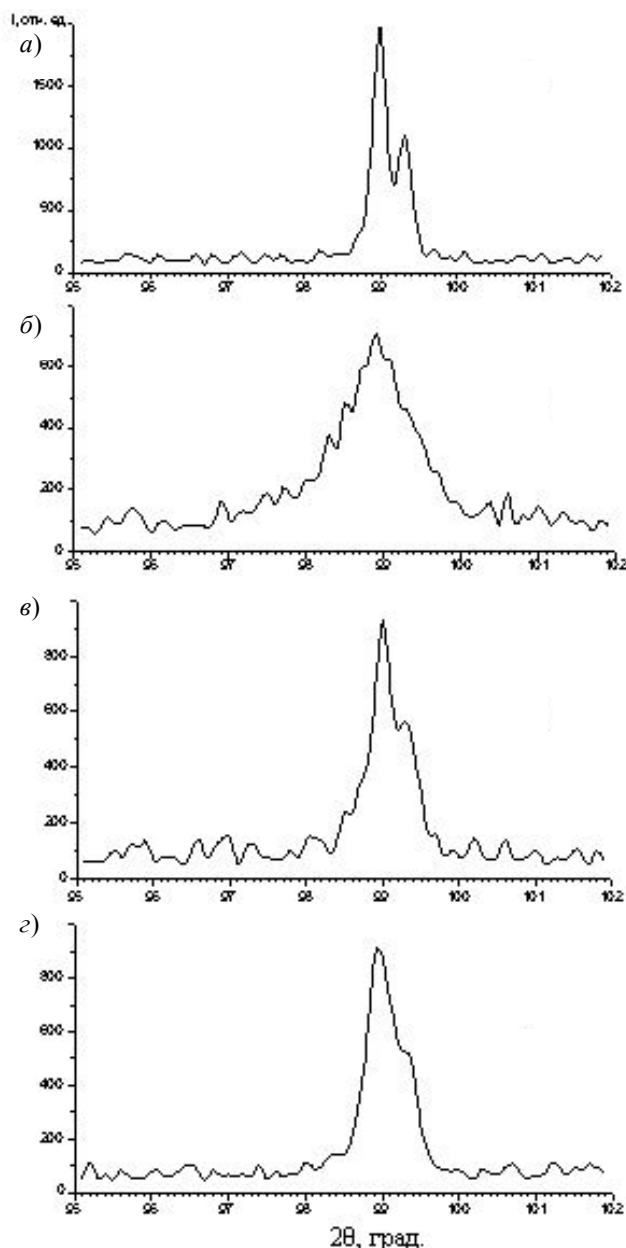


Рисунок 3 – Профиль линии (220) эталона (а) и поверхности катания рельса из прямого участка (б–г):
 б – поверхность катания; в – 460 мкм от поверхности; г – 1330 мкм от поверхности

При определении величины физического уширения дифракционных линий β прежде всего находилась ширина B ($B = S/h$) исследуемой дифракционной линии, которая представляет собой частное от деления площади S , ограниченной профилем кривой и уровнем фона, на высоту максимума h . При нахождении β вводилась поправка на геометрические условия рентгеновской съемки и неоднородность излучения [11, 12].

При определении рентгеновских характеристик образцов рельсов расчет уширения проводился методом аппроксимации. В качестве функции $f(x)$, определяющей распределение интенсивности в линиях эталона, выбиралась функция вида $1/(1+\alpha x^2)^2$. При этом принималось, что такой же функцией описывается распределение интенсивности в соответствующих линиях эталонного образца. Результаты расчета приведены в таблице 3.

Анализ представленных данных показывает, что наибольшие значения уширений линий (110), (220) регистрируются в поперечном направлении верхних слоев рабочих поверхностей головки рельса, что указывает на относительно высокую плотность дефектов кристаллической решетки в этих зонах как для исходного материала рельсов, так и для материала рельсов после эксплуатации. При удалении от рабочих поверхностей уширение дифракционных линий значительно уменьшается, что свидетельствует о снижении плотности дефектов. Следовательно, в этих подповерхностных слоях снижаются микродеформации и искажения.

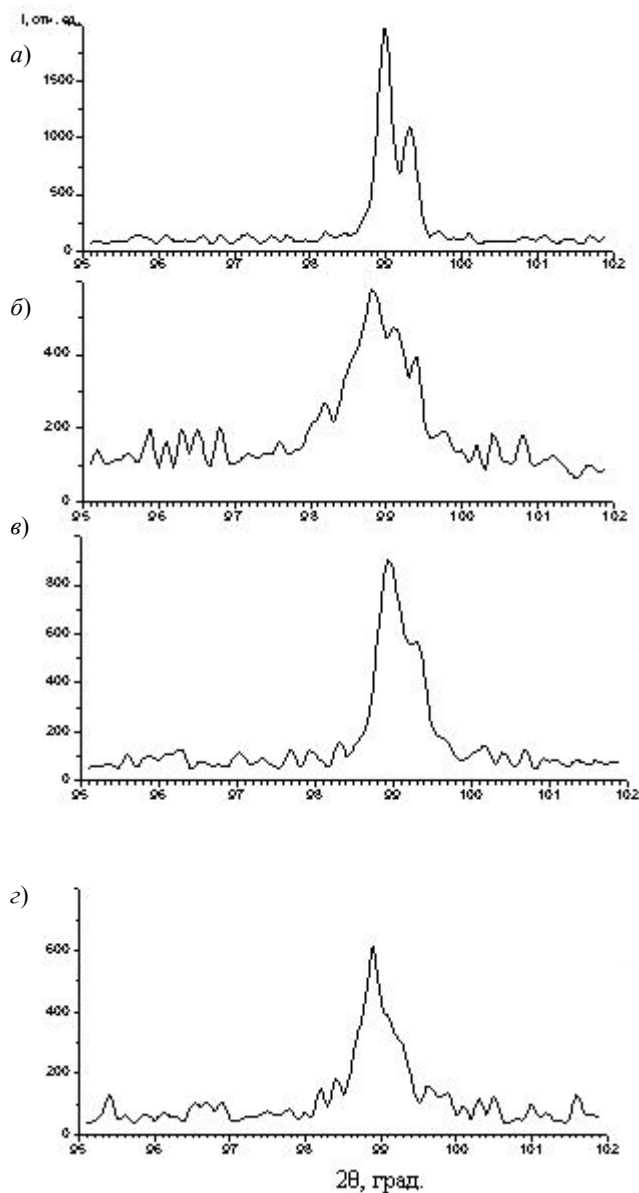


Рисунок 4 – Профиль линии (220) эталона (а) и поверхности катания рельса из кривого участка (б-г):
б – поверхность катания; в – 420 мкм от поверхности; г – 790 мкм от поверхности

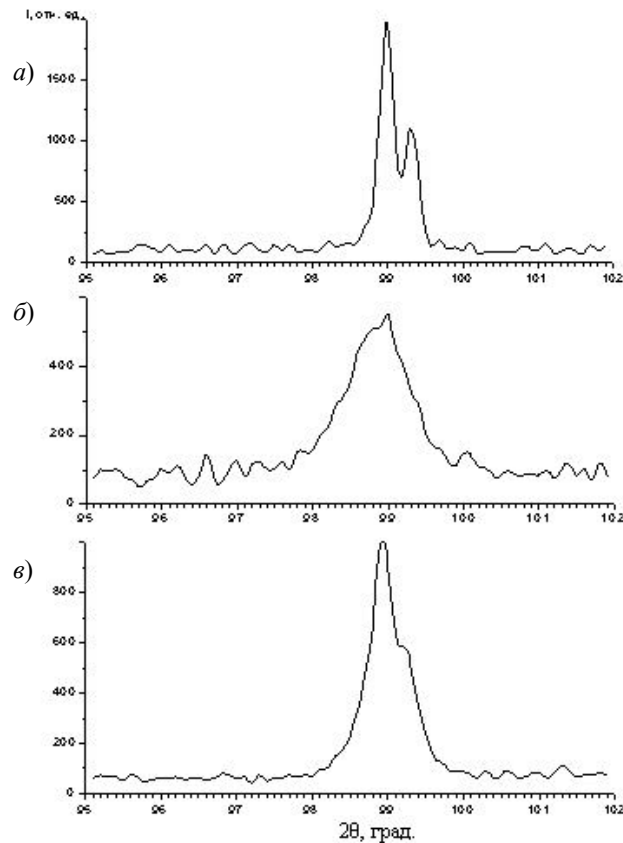


Рисунок 5 – Профиль линии 220 эталона (а) и боковой поверхности рельса из кривого участка (б, в):
б – боковая поверхность; в – 645 мкм от поверхности

Таблица 3 – Значения физического уширения β дифракционных линий матричной α -фазы

Исследуемая зона	Исследуемое направление	$\beta_{110}, 10^{-3}$ рад	$\beta_{220}, 10^{-3}$ рад	β_{220}/β_{110}
<i>Исходный образец</i>				
Поверхность катания	Вдоль	3,23	10,97	3,4
То же	Поперек	3,57	9,67	2,7
<i>Поверхность катания, прямой участок</i>				
Поверхность катания	Вдоль	6,95	20,07	2,88
То же	Поперек	9,40	23,40	2,49
460 мкм от поверхности	Вдоль	3,00	8,10	2,70
То же	Поперек	5,75	8,10	1,41
1330 мкм от поверхности	Вдоль	2,46	6,40	2,60
То же	Поперек	6,32	6,97	1,10
<i>Поверхность катания, кривой участок</i>				
Поверхность катания	Вдоль	8,22	14,25	1,73
То же	Поперек	8,74	15,58	1,78
420 мкм от поверхности	Вдоль	5,39	9,2	1,70
То же	Поперек	5,97	6,8	1,14
790 мкм от поверхности	Вдоль	4,84	8,6	1,78
То же	Поперек	5,92	7,23	1,22
<i>Боковая поверхность скольжения, кривой участок</i>				
Боковая поверхность	Вдоль	9,71	15,80	1,63
То же	Поперек	12,37	21,20	1,71
645 мкм от поверхности	Вдоль	2,90	4,13	1,42
То же	Поперек	2,67	4,43	1,66
Примечание – $\text{tg}\theta_{(220)}/\text{tg}\theta_{(110)}=2,85$; $\text{sec}\theta_{(220)}/\text{sec}\theta_{(110)}=1,42$.				

Обращает на себя внимание тот факт, что величина отношения β_{220}/β_{110} в одних случаях близка к величине отношения $\text{tg}\theta_{(220)}/\text{tg}\theta_{(110)}$, в других – к величине отношения $\text{sec}\theta_{(220)}/\text{sec}\theta_{(110)}$. Это свидетельствует о том, что в первом случае в поверхностных слоях рабочих поверхностей в процессе фрикционного взаимодействия пары колесо/рельс формируются ячеистые дислокационные структуры в виде хаотически расположенных дислокаций, во втором – фрагментированные структуры, характеризующиеся скоррелированным расположением дислокаций в виде стенок, образующих границы ячеек, блоков или субзерен.

Располагая данными по значению величины β для различных образцов, можно оценить, с одной стороны, плотность дислокаций дислокационных структур, а с другой – размер блоков ячеистой фрагментированной структуры.

Согласно [9, 13] уширение дифракционных линий от дислокаций пропорционально $\text{tg}\theta$, а плотность дислокаций, рассчитанная по уширению, удовлетворительно коррелирует с данными прямых методов наблюдения дислокаций. В соответствии с [13] плотность дислокаций в этом случае может быть определена из выражения

$$\rho = m\beta^2 \text{ctg}^2\theta/b^2, \quad (2)$$

где m – коэффициент, учитывающий долю винтовых и краевых дислокаций, тип кристаллической решетки; β – уширение; θ – угол рассеяния; b – вектор Бюргерса. Согласно [13] $m = 1$, $b = 1,35 \cdot 10^{-7}$ мм.

В соответствии с [10] размер блоков D в скоррелированных ячеистых структурах может быть определен из выражения $D = \lambda/\beta \cos\theta$, где λ – длина волны излучения.

Таблица 4 – Значения плотности дислокаций хаотически распределенных ячеистых структур и величины блоков упорядоченных дислокационных структур, формируемых в поверхностных слоях исследуемых образцов

Номер образца	Исследуемая зона	Исследуемое направление рельса	Характер субзеренных структур	Плотность дислокаций ρ , 10^9 мм ⁻²	Размер блоков, нм
1 исходный	Поверхность катания	Вдоль	Неупорядоченное расположение дислокаций	3,4–4,5	-
		Поперек	То же	3,8–4,2	-
2 из прямого участка	Поверхность катания	Вдоль	– " –	8,6–8,8	-
		Поперек	– " –	22,0–29,0	-
	460 мкм от поверхности	Вдоль	– " –	0,98–2,6	-
		Поперек	Скоррелированное расположение дислокаций	-	28,9–29,3
	1330 мкм от поверхности	Вдоль	Неупорядоченное расположение дислокаций	1,7–2,0	-
		Поперек	Скоррелированное расположение дислокаций	-	26,4–34,0
3 из кривого участка	Поверхность катания	Вдоль	То же	-	16,6–20,2
		Поперек	– " –	-	15,2–19,1
	420 мкм от поверхности	Вдоль	– " –	-	25,8–30,9
		Поперек	– " –	-	28,5–34,8
	790 мкм от поверхности	Вдоль	– " –	-	27,6–34,4
		Поперек	– " –	-	28,6–29,8
4 из кривого участка	Боковая поверхность	Вдоль	– " –	-	15,0–17,2
		Поперек	– " –	-	11,4–13,5
	645 мкм от поверхности	Вдоль	– " –	-	57,5–64,9
		Поперек	– " –	-	53,3–62,4

Проанализируем подробнее представленные в таблице 4 результаты. Как следует из полученных данных, в поверхностных слоях исходного материала рельсов формируются дислокационные структуры с хаотическим расположением дислокаций. При этом в продольном и поперечном направлениях плотность дислокаций имеет близкие значения, которые находятся в интервале $3,4 \cdot 10^9 - 4,5 \cdot 10^9$ мм⁻². Твердость поверхностных слоев исходного образца равна 330 HV, сердцевины – 285 HV (рисунок 6, а).

После эксплуатации в поверхностных слоях головки рельса из прямого участка, как и в случае исходного материала, наблюдаются дислокационные структуры с неупорядоченным расположением дислокаций. Однако, в отличие от исходного состояния, плотность дислокаций на поверхности дорожки катания в 3–10 раз выше. В продольном направлении она составляет $8,7 \cdot 10^9 \text{ мм}^{-2}$, в поперечном – $2,5 \cdot 10^{10} \text{ мм}^{-2}$. Повышение плотности дефектов сопровождается относительно высокими искажениями кристаллической решетки материала поверхностных слоев и его наклепом. Протяженность наклепанного слоя составляет 10–20 мкм, его микротвердость – 390–410 HV. Микротвердость сердцевинки головки равна 285 HV (рисунок 6, б). На этом основании можно считать, что упрочнение поверхностных слоев, обусловленное дислокационными неупорядоченными структурами, составляет $\Delta \text{HV} = 105 \dots 125$. При удалении от поверхности на 460 мкм в продольном направлении головки характер субзеренных структур не изменяется, наблюдается лишь уменьшение плотности дислокаций приблизительно в 10 раз. При этом микротвердость этих слоев соответствует микротвердости сердцевинки. Напротив, в поперечном сечении формируются скоррелированные ячеистые структуры с размером блоков порядка 30 нм. Для более глубоких слоев (1330 мкм от поверхности) наблюдается аналогичная ситуация. Таким образом, полученные данные показывают, что формируемые в процессе эксплуатации дефекты для рельсов из прямого участка, вызывающие относительно высокие искажения кристаллической решетки, имеют наиболее высокую плотность в поверхностных слоях дорожки катания.

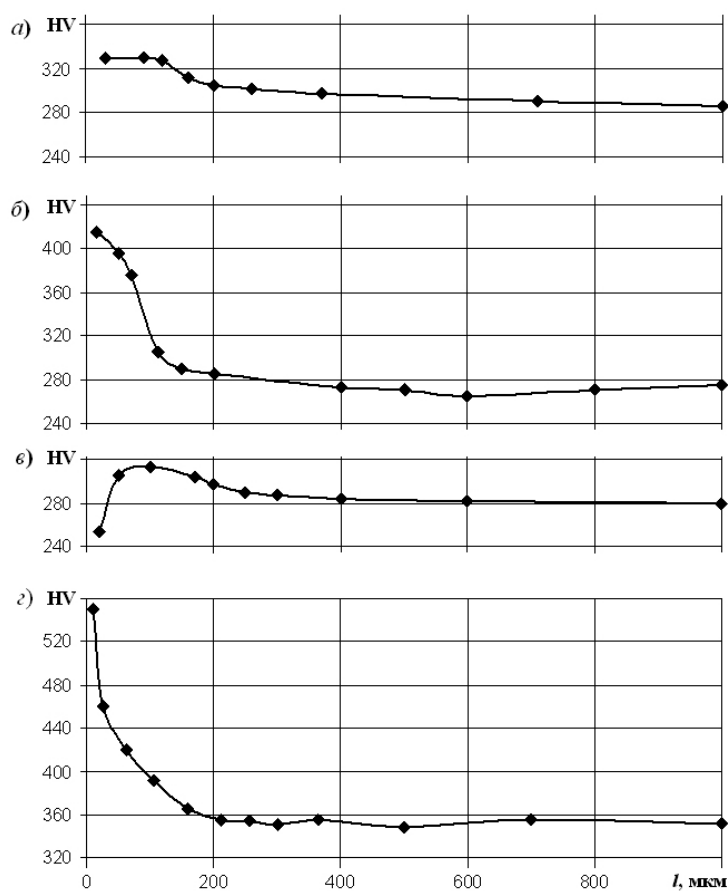


Рисунок 6 – Распределение микротвердости по глубине:
 а – исходный образец; б – поверхность катания, прямой участок;
 в – поверхность катания, кривой участок; г – боковая поверхность скольжения

Контактное взаимодействие колеса с рельсом в течение заданного нормативного срока эксплуатации приводит к формированию в поверхностных слоях поверхности катания образца из кривого участка фрагментированных структур, характеризующихся скоррелированным расположением дислокаций в виде стенок, образующих границы ячеек, блоков или субзерен. Размер блоков составляет 15–20 нм. Эти структуры также вызывают микродеформации и искажения кристаллической решетки в поверхностном слое. Микротвердость этого слоя равна 305–315 HV при твердости сердцевинки 280–290 HV (рисунок 6, в). Таким образом, упрочнение, связанное с наклепом при образовании блоч-

ных структур, составляет 25 HV. Для слоев, расположенных на расстоянии 420 мкм, 790 мкм, характерна также блочная структура. Однако блоки в этом случае более крупные (до 35 мкм).

По прошествии нормативного срока эксплуатации рельсов в поверхностных слоях боковой поверхности, так же, как и на поверхности катания (для кривого участка), наблюдаются фрагментированные структуры с упорядоченным расположением дислокаций. Однако в случае боковой поверхности блоки гораздо мельче – величина D составляет 11–17 нм. Блочные структуры с такими ячейками создают значительные искажения в поверхностных слоях, обеспечивая их наклеп. Об этом непосредственно свидетельствуют данные исследования распределения твердости по глубине головки от поверхности боковой дорожки (рисунок 6, z). Твердость поверхностных слоев этой рабочей поверхности достигает 515–550 HV, при твердости сердцевины – 360 HV. Следовательно, упрочнение, вызванное блочными структурами $\Delta HV=155\dots 190$, т. е. в 6–8 раз больше по сравнению с упрочнением, связанным со структурами, созданными на поверхности катания. С удалением от поверхности характер субзеренных структур не изменяется, а происходит только укрупнение блоков, размер которых на расстоянии 645 мкм от поверхности достигает 65 мкм.

Анализ микроструктуры. В исходном состоянии перед эксплуатацией сталь, из которой изготовлены исследуемые образцы рельсов, имеет структуру сорбитообразного перлита с периодом решетки 0,2868 нм и содержит частицы орторомбического карбида Fe_3C . Процессы деформации оказывают влияние не только на уширение дифракционных линий матричной α -фазы, но могут приводить к существенному изменению постоянной кристаллической решетки стали. Величина $\Delta a/a$ ($\Delta a = a - a_0$, где a , a_0 – постоянная решетки исследуемого образца и эталона соответственно) может быть использована для оценки микроискажений (смещений атомов вдоль определенных направлений решетки) в деформированном материале. Для получения информации о микроискажениях в материале рабочих поверхностей головки рельсов исследовались дифракционные линии матрицы (110), (200), (220), (222) CuK_α . В таблицах 5–7 приведены результаты оценки величины $\Delta a/a$ для различных плоскостей кристаллической решетки α -фазы матрицы исследуемых образцов.

Таблица 5 – Значения величины $\Delta a/a$ для различных плоскостей кристаллической решетки исходного образца

Исследуемая зона	Индексы hkl линии	Исследуемое направление	$\Delta a/a, 10^{-4}$
Поверхность катания	(110)	Вдоль	– 10,8
		Поперек	– 10,8
	(200)	Вдоль	– 6,6
		Поперек	– 6,6
	(220)	Вдоль	+ 1,7
		Поперек	+ 1,7
	(222)	Вдоль	+ 1,1
		Поперек	+ 1,1
Знак (–) – сжатие плоскостей решетки; знак (+) – растяжение плоскостей решетки.			

Таблица 6 – Значения величины $\Delta a/a$ для различных плоскостей кристаллической решетки образца из прямого участка

Исследуемая зона	Индексы hkl линии	Исследуемое направление	$\Delta a/a, 10^{-4}$
Поверхность катания	(110)	Вдоль	– 7,7
		Поперек	– 3,8
	(200)	Вдоль	– 7,7
		Поперек	+ 6,3
	(220)	Вдоль	– 2,4
		Поперек	+ 3,1
	(222)	Вдоль	+ 8,7
		Поперек	+ 8,7
Знак (–) – сжатие плоскостей решетки; знак (+) – растяжение плоскостей решетки.			

Таблица 7 – Значения величины $\Delta a/a$ для различных плоскостей кристаллической решетки образца из кривого участка

Исследуемая зона	Индексы hkl линии	Исследуемое направление	$\Delta a/a, 10^{-4}$
Поверхность катания	(110)	Вдоль	- 13,2
		Поперек	- 3,8
	(200)	Вдоль	- 2,8
		Поперек	+ 6,3
	(220)	Вдоль	+ 1,7
		Поперек	+ 7, 2
(222)	Вдоль	- 2, 1	
	Поперек	+ 10,1	
Боковая поверхность	(110)	Вдоль	- 0,7
		Поперек	- 10,4
	(200)	Вдоль	+ 6,2
		Поперек	+ 8,2
	(220)	Вдоль	+ 7,0
		Поперек	+ 8,4
(222)	Вдоль	+ 6,9	
	Поперек	+10,1	
Знак (-) – сжатие плоскостей решетки; знак (+) – растяжение плоскостей решетки.			

Как следует из полученных данных, величина $\Delta a/a$ для исследуемых плоскостей кристаллической решетки изменяется в широких пределах по абсолютной величине, а также по знаку, что свидетельствует о сложном характере микроискажений в рабочих поверхностях головки рельса. Так, судя по значению $\Delta a/a$, для образца боковой поверхности дорожки скольжения плоскости (110) претерпевают эффект сжатия ($\Delta a/a = -10,4 \cdot 10^{-4}$), а плоскости (222), напротив, – эффект растяжения ($\Delta a/a = +10,1 \cdot 10^{-4}$).

Согласно полученным данным по химическому составу исследуемых образцов рельсы изготовлены из стали с содержанием углерода 0,8 %. В этой стали при температуре 727 °С происходит эвтектоидный распад, при котором аустенит превращается в перлит, твердый раствор углерода в γ -железе распадается на почти чистое α -железо и химическое соединение Fe_3C [7].

Перлит представляет собой смесь феррита в форме пластинок или зерен и цементита. При увеличении степени переохлаждения (например, при закалке) дисперсность структуры перлита возрастает, что приводит к образованию перлита более тонкого строения – сорбита и структур мартенситного и промежуточного превращений (троостит, бейнит).

Как правило, перлит является достаточно грубой структурой с легко дифференцируемыми под оптическим микроскопом отдельными составляющими (пластинки феррита и цементита). В перлите более тонкого строения (сорбит) и в структурах промежуточных превращений надежное определение отдельных структурных составляющих возможно при электронно-микроскопических исследованиях. Рассмотрим микроструктуру стали, из которой изготовлены исследуемые образцы рельсов.

На поверхности катания из прямого участка наблюдается поверхностное усталостное выкрашивание (питтинг) в виде цепочек мелких ямок (оспин), располагающихся в виде двух дорожек. Глубина питтинга составляет 2–5 мкм, протяженность – 2–7 мкм. Наряду с этим имеет место незначительная выработка металла и трещинообразование в виде мелких извилистых трещин. Подобные дефекты наблюдаются и у образцов из кривого участка. На поверхности катания рельса из кривого участка в районе, прилегающем к зоне рабочей выкружки рельса, наблюдается приработка металла с блестящей притертой поверхностью.

Боковая поверхность скольжения характеризуется наличием поверхностного износа (незначительная выработка, истирание) металла в виде нешироких полос со значительно более выраженным питтингом по сравнению с другими участками. Наблюдается также трещинообразование в виде мелких извилистых трещин.

На рисунке 7 приведена микроструктура различных зон поверхностных слоев исходного образца. В зоне поверхности катания структура этого образца представляет собой сорбит, сорбитообразный перлит и отдельные мелкие участки тонкопластинчатого перлита. В структуре исходного металла наблюдаются также неметаллические включения (силикаты, окислы) и незначительное количество

зернистых карбидных включений. Размер зерна стали в исходном состоянии составляет 7,9–15 мкм. Поверхностный слой протяженностью 150–180 мкм характеризуется заметным обеднением углеродом.

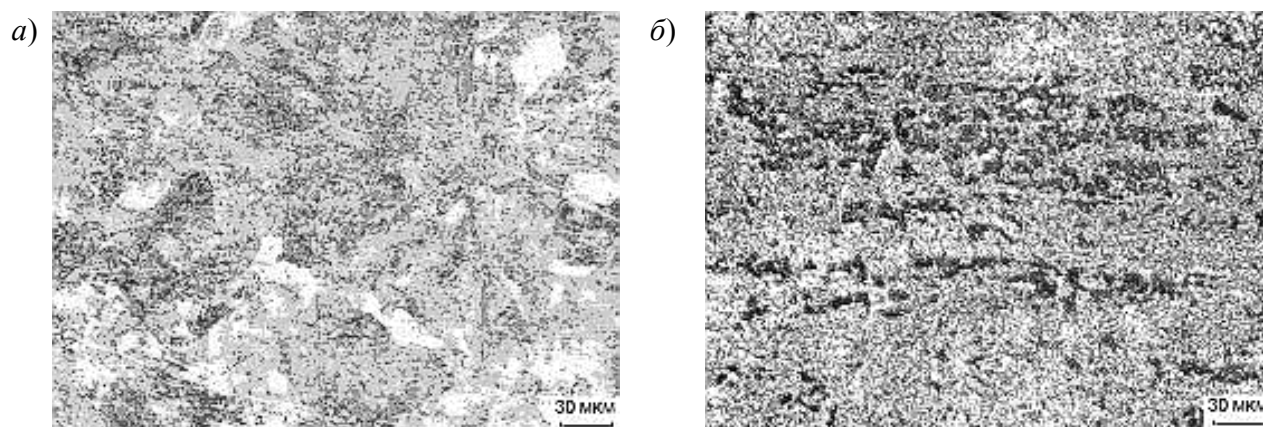


Рисунок 7 – Микроструктура сердцевины исходного образца:
а – перлитно-сорбитные зерна; б – силикаты в структуре металла

Микроструктура поверхности катания из прямого участка как в поверхностных слоях, так и в сердцевине характеризуется наличием сорбита, сорбитообразного перлита, а также отдельных мелких зон тонкопластинчатого перлита (рисунок 8). На глубине 10–15 мкм от поверхности катания наблюдается слаботравящаяся полоса. Этот слой сформировался в процессе эксплуатации рельсов и соответствует зоне с повышенной плотностью дефектов, обуславливающих значительный наклеп в верхних слоях поверхности катания рельсов из прямого участка.

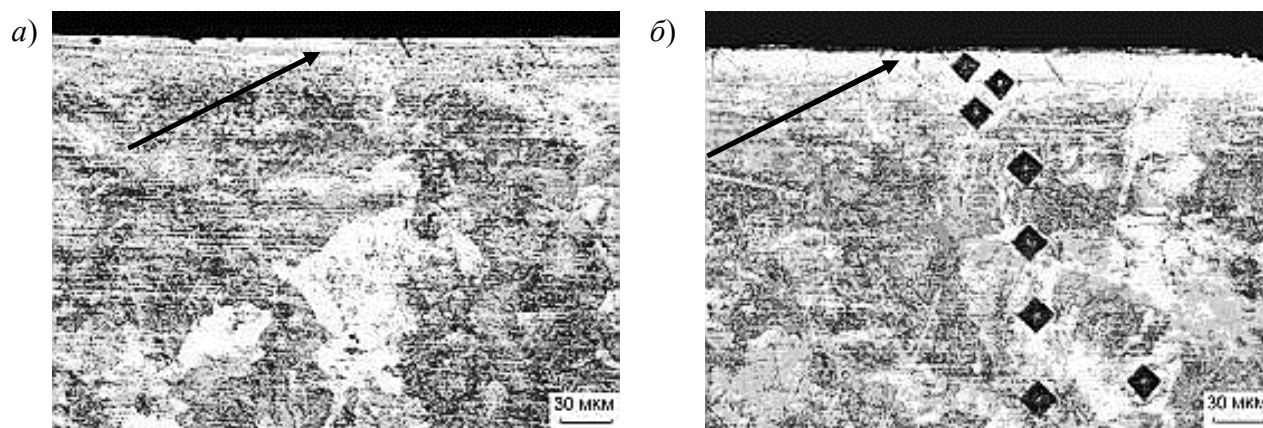


Рисунок 8 – Микроструктура различных зон по глубине поверхности катания головки рельса из прямого участка (стрелкой указан слой с высокой плотностью дефектов)

Зона поверхности катания из кривого участка представляет собой сорбит, сорбитообразный перлит, отдельные мелкие зернистые включения карбидов и тонкопластинчатого перлита (рисунок 9). Микротвердость составляет 280–300 HV. В поверхностном слое наблюдается зона частичного обеднения (глубиной 90–100 мкм) с образованием мягких ферритных составляющих в виде отдельных участков и по границам зерен, приводящих к снижению твердости до 240–250 HV.

Наличие на поверхности катания обезуглероженного слоя толщиной 90–100 мкм скорее всего следует связывать с неполным его удалением с поверхности в процессе эксплуатации (как указывалось выше, в исходном состоянии частичное обеднение углеродом рабочей поверхности распространяется на глубину 150–180 мкм). Если это принять за действительный факт, то можно предположить, что в процессе заданного срока эксплуатации износ поверхности катания рельса из кривого участка пути составил менее 150 мкм.

Анализ полученных данных показал, что микроструктура металла боковой поверхности сформировалась в результате термической обработки со скоростью охлаждения при закалке, обеспечивающей образование мартенситных и промежуточных структур превращения. Для этого образца структура неоднородна по сечению и распределяется следующим образом. В поверхностном слое глуби-

ной до 120 мкм наблюдается бейнит с микротвердостью 420–450 HV (рисунок 10). Далее регистрируется сорбит с микротвердостью 360 HV. Наряду с этими структурами наблюдаются также незначительные участки тонкопластинчатого перлита и отдельные зернистые мелкие включения карбидов. В поверхностной зоне толщиной 10–15 мкм наблюдается слаботравящаяся полоса, твердость которой достигает 520–550 HV. Как и в случае других исследованных образцов, происхождение такой полосы связано с высокой плотностью дефектов в ней и наклепом, образовавшихся в процессе эксплуатации. Наряду с отмеченными выше структурными составляющими в металле головки рельсов присутствуют неметаллические включения, тип и размер которых определялся на продольных сечениях нетравленных микрошлифов исследуемых образцов (рисунок 11). Полученные результаты показали, что в металле всех образцов обнаруживаются такие неметаллические включения, как сульфиды, силикаты, оксиды.

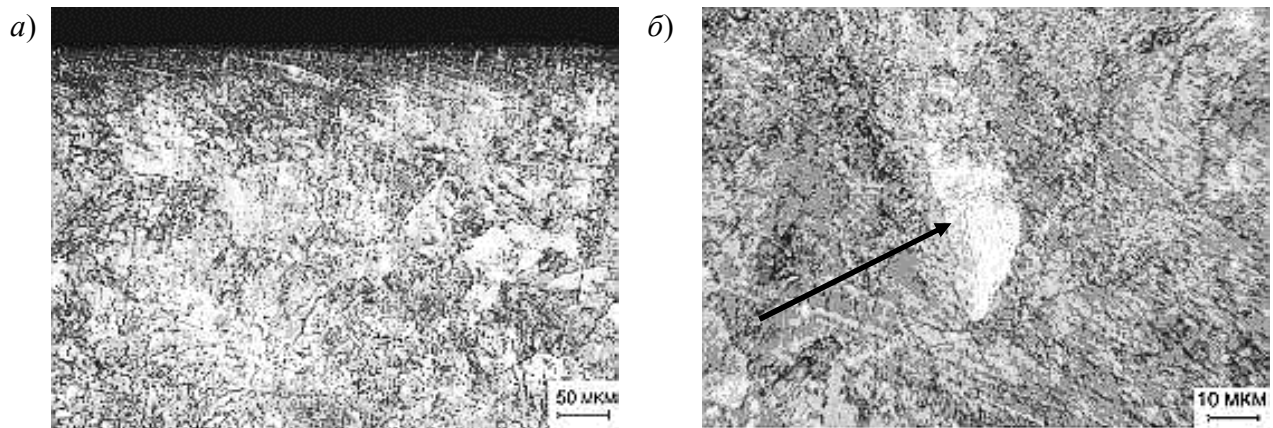


Рисунок 9 – Микроструктура различных слоев поверхности катания головки рельса из кривого участка (стрелкой указан тонкопластинчатый перлит)

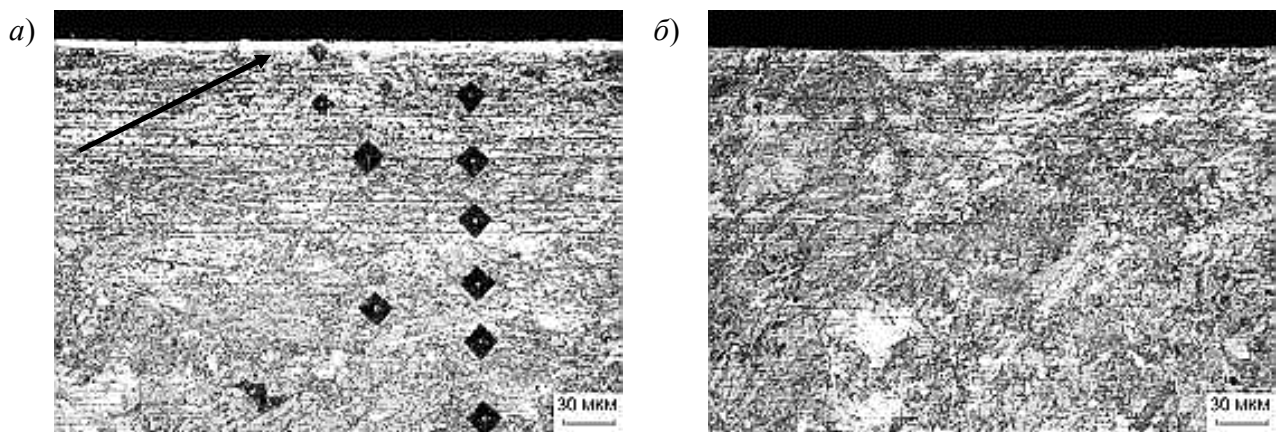


Рисунок 10 – Микроструктура различных участков боковой поверхности скольжения рельса из кривого участка (стрелкой показан наклепанный слой с высокой плотностью дефектов)

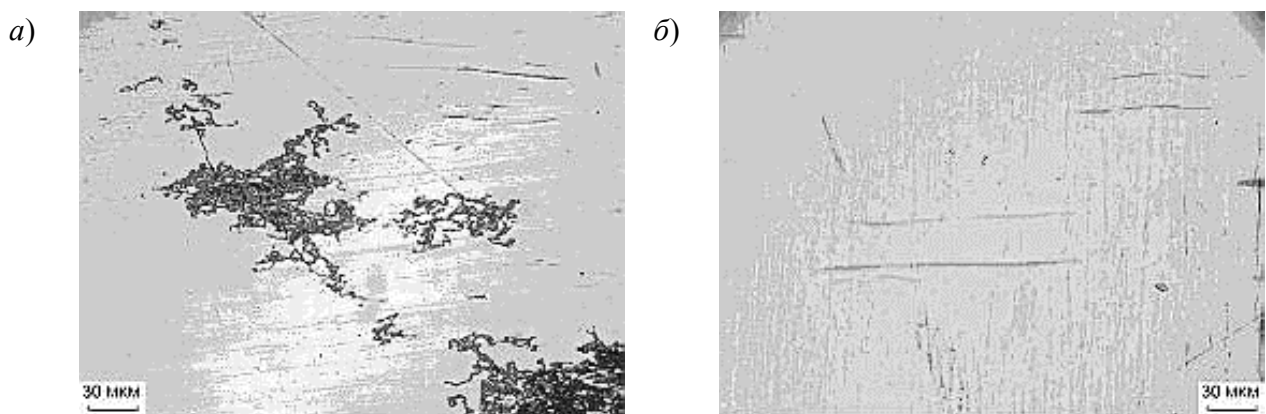


Рисунок 11 – Неметаллические включения в материале образцов: а – силикаты; б – строчки сульфидов

Изучение микротрещин. При микроструктурном исследовании в сечении поверхности катания головки рельса, пропустившего 300 млн т брутто, выявлены наклонные трещины (рисунки 12, 13). Глубина залегания трещин изменяется от 17 до 210 мкм, а протяженность трещин – от 25 до 2000 мкм. Очагами зарождения трещин являются различного рода дефекты. В случае поверхностных трещин такими дефектами является питтинг, внутренних – дислокации, силикаты. Наряду с этим наблюдается ряд внутренних трещин, не выходящих на поверхность и ориентированных преимущественно параллельно поверхности (рисунок 14).

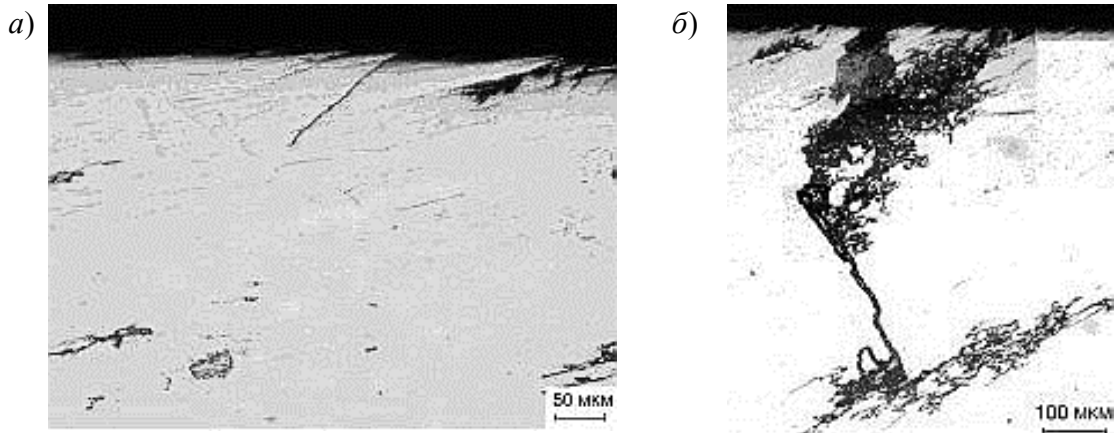


Рисунок 12 – Усталостное поверхностное контактное повреждение поверхности катания (рельс из прямого участка)



Рисунок 13 – Усталостное поверхностное контактное повреждение поверхности катания рельса из прямого участка



Рисунок 14 – Подповерхностная усталостная трещина

Изменения в микроструктуре по краям трещин не обнаруживаются. По характеру и расположению выявленные трещины имеют усталостное происхождение и образовались в процессе эксплуатации.

Формируемые в процессе эксплуатации дефекты имеют наиболее высокую плотность в поверхностных слоях головки рельса, где твердость составляет 390–410 HV, а при удалении от поверхности, с уменьшением твердости до 280 HV, плотность дефектов снижается примерно в 10 раз.

Характер и расположение повреждений свидетельствуют о том, что они есть результат контактной усталости. Можно сделать заключение, что после пропуска нормативного тоннажа в материале рельсов только начинается процесс разупрочнения, что позволяет продолжать эксплуатацию рельсов при обеспечении должного дефектоскопического контроля за развитием повреждений.

Выводы:

1 Показано, что фазовый состав рабочих поверхностей всех образцов включает α -железо, орторомбический карбид железа Fe_3C , а также такие неметаллические включения, как силикаты SiO_2 , сульфиды марганца и железа $FeS \cdot MnS$.

2 Микроструктура поверхности катания головки рельсов из прямого и кривого участков пути имеет близкий характер и представляет собой сорбит, сорбитообразный перлит и отдельные мелкие участки тонкопластинчатого перлита. Наблюдается также незначительное количество зернистых карбидных включений. В поверхностных слоях исходного образца и дорожки катания (криволинейный участок) регистрируется обезуглероживание структуры до микроструктуры феррита.

В зоне боковой поверхности скольжения головки рельса из кривого участка пути структура неоднородна по сечению. В поверхностном слое на глубине до 120 мкм регистрируется бейнит с твердостью 420–450 HV, далее – сорбит (360 HV). Наблюдаются также незначительные участки тонкопластинчатого перлита и отдельные зернистые включения карбидов.

3 С использованием рентгеновской тензометрии исследованы остаточные напряжения в поверхностных слоях головки вдоль и поперек рельсов. На основании полученных результатов показано, что технологический процесс изготовления рельсов сопровождается формированием сжимающих напряжений в поверхностных слоях. По истечении заданного ресурса эксплуатации поверхность катания рельса из прямого участка также характеризуется наличием в них сжимающих напряжений как в продольном, так и поперечном направлениях.

На поверхности катания головки рельса из кривого участка образуется неоднородное напряженное состояние: в продольном направлении формируются растягивающие напряжения, в поперечном, напротив, – сжимающие. Наибольшие напряжения зарегистрированы на боковой поверхности скольжения. В этих зонах уровень напряжений в 3 раза превышает напряжения на поверхности катания рельса из прямого и в 1,5 раза – из кривого участка.

4 Исследованы микроискажения в поверхностных слоях рабочих поверхностей головки рельсов. Показано, что на поверхности катания исходного образца наблюдаются дислокационные структуры с неупорядоченным расположением дислокаций. Дислокационные структуры с хаотическим расположением дислокаций формируются также на поверхности катания рельса из прямого участка. Плотность дислокаций достаточно высока, что обуславливает значительные искажения кристаллической решетки и наклеп поверхности катания. При удалении от поверхности плотность дефектов резко снижается.

Искажения кристаллической решетки для поверхности катания головки рельса из кривого участка, приводящие к деформации и наклепу поверхностных слоев головки рельсов, связаны с образованием в этих слоях фрагментированных структур, характеризующихся скоррелированным расположением дислокаций в виде стенок, образующих границы ячеек, блоков или субзерен.

Наибольшие искажения поверхностных слоев наблюдаются в случае боковой дорожки скольжения и обусловлены они фрагментированными структурами с упорядоченным расположением дисло-

каций, приводящим к образованию ячеистой структуры. С удалением от поверхности характер субзеренных структур не изменяется, а происходит только укрупнение блоков.

5 Оценка величины $\Delta a/a$, характеризующей микроискажения рабочих поверхностей головки рельса, показала, что $\Delta a/a$ изменяется в достаточно широких пределах (от $-13,2 \cdot 10^{-4}$ до $+10,1 \cdot 10^{-4}$), что свидетельствует о сложном характере микроискажений в поверхностных слоях головки рельсов: в одних кристаллографических направлениях проявляется эффект сжатия, в других – растяжения.

6 При микроструктурном исследовании в сечении плоскости катания прямого участка рельса выявлены отдельные поверхностные трещины, идущие в глубь образца под углом $\approx 30^\circ$, а затем распространяющиеся параллельно ей. Наблюдается также ряд внутренних трещин, не выходящих на поверхность и ориентированных преимущественно параллельно поверхности. При этом изменения в микроструктуре по краям трещин не обнаруживаются. По характеру и расположению выявленные трещины имеют усталостное происхождение и образуются в процессе эксплуатации.

Общее заключение: состояние материала рельса после пропуска нормативного тоннажа не является критическим.

Список литературы

- 1 Лемпицкий, В. В. Производство и термическая обработка железнодорожных рельсов / В. В. Лемпицкий. – М.: Металлургия, 1972. – 272 с.
- 2 Полухин, П. И. Прокатка и термическая обработка рельсов / П. И. Полухин. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 325 с.
- 3 Powder diffraction file data cards. Inorganic section/ Sets 1-34. Swarthmore. PA. 1948-1984.
- 4 Баррет, Ч. С. Структура металлов / Ч. С. Баррет. – М.: Metallurgizdat, 1948. – 542 с.
- 5 Комяк, Н. И. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений / Н. И. Комяк, Ю. Г. Мясников. – Л.: Машиностроение, 1972. – 223 с.
- 6 Macherauch E., Muller P.Z. // *Angew. Phys.* 1961. Bd. 13. S. 305-312.
- 7 Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.
- 8 Гитгарц, М. И. Закономерности рассеяния рентгеновских лучей поликристаллами сплава Al-Cu на стадии образования зон Гинье-Престона и θ' -фазы / М. И. Гитгарц, В. И. Комарова // *Физика металлов и металловедение.* – 1976. – Т.41. № 4. – С.787–795.
- 9 Гитгарц, М. И. Процессы старения сплава Al-Cu на стадии релаксационных явлений / М. И. Гитгарц, В. И. Комарова // *Физика металлов и металловедение.* – 1977. – Т.43. № 3. – С.545–553.
- 10 Уманский, Я. С. Рентгенография металлов / Я. С. Уманский. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 476 с.
- 11 Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский [и др.]. – М.: Металлургия, 1983. – 354 с.
- 12 Лысак, Л. И. Определение истинной ширины рентгеновских интерференционных линий с применением стандартного образца / Л. И. Лысак // *Вопросы физики металлов и металловедения.* – Киев: Изд-во АН УССР, 1955. – № 6. – С.40–53.
- 13 Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах / М. А. Кривоглаз. – Киев: Наукова думка, 1983. – 115 с.

Получено 03.05.2005

V. A. Andrijashin, V. I. Komarova, A. I. Komarov, V. I. Matvetsov, A. A. Kebikov. Change of a state of a rails material at operation in conditions of the Minsk underground.

The microstructure, residual macrostresses, microstrains, hardness of rails in a reference state and after operation is analysed. It is shown, that the microstructure of a surface of driving of the head of rails from direct and curve track sections after operation has close character.