

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель Генерального директора –
директор НЦ «РСТМ» АО «ВНИИЖТ»



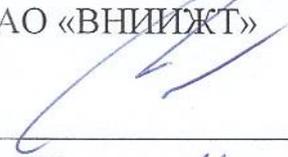
« 07 » _____ 2023 г.


ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

**на износостойкость и контактно-усталостную выносливость образцов
из колес марки 2 с композиционным металлоалмазным покрытием**

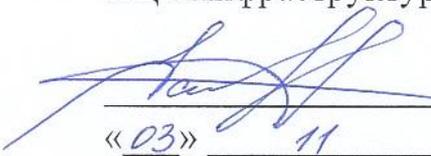
(Гарантийное письмо ООО «УТК» № 541/3.НЦИ.10.13162/23 от 13.10.2023 г.)

Директор НЦ «Инфраструктура»
АО «ВНИИЖТ»



« 03 » _____ 2023 г.

Заместитель директора по
материаловедению
НЦ «Инфраструктура» АО «ВНИИЖТ»



« 03 » _____ 2023 г.

Москва – 2023г.

1. Испытание на износостойкость.

Испытание на износостойкость проводили на образцах (роликах), изготовленных из обода стандартного колеса марки 2 по ГОСТ 10791-2011. На образцы, предназначенные для оценки износостойкости композиционного металлоалмазного покрытия, перед испытанием было нанесено композиционное покрытие по всей цилиндрической рабочей поверхности. Сравнительные образцы из колеса проходили испытание без покрытия.

Всего испытанию подвергали 4 колесных ролика с композиционным покрытием и 4 сравнительных ролика:

- ролики №№ 14, 15, 16 и 17 – с композиционным металлоалмазным покрытием на основе наноалмазного хрома, изготовленным и нанесенным ООО «РАМ» по заказу ООО «УТК»;

- ролики №№ 5, 6, 7 и 8 – без покрытия.

Ответные образцы из рельса (контртела) для использования в паре трения с колесными образцами изготовили из стандартного рельса марки Э76ХФ категории ДТ350 по ГОСТ Р 51685-2013.

Цель испытания – сравнительная оценка износостойкости образцов из колес марки 2 с композиционным покрытием и без покрытия.

Лабораторное испытание на износ проведено по специальной методике, разработанной АО «ВНИИЖТ» и позволяющей дать сравнительную оценку износостойкости колесных сталей. Режим испытания образцов моделировал износ гребня колеса в условиях эксплуатации с 10%-ным проскальзыванием относительно боковой грани головки рельса. Данная методика позволяет испытывать различные группы образцов из колесной стали, отличающиеся друг от друга химическим составом, механическими свойствами (твердостью) и (или) покрытием.

Образцы из колес в виде цилиндрических роликов диаметром 40 мм и толщиной 10 мм (рис. 1) изготавливали согласно приведенной на рис. 2 схеме с глубины 27 мм от поверхности катания, соответствующей середине рабочего слоя металла обода колеса.

Рельсовые контролики диаметром 40 мм и толщиной 6 мм (рис. 3) изготавливали непосредственно из головки рельса вблизи поверхности катания согласно схеме вырезки на рис. 4.

Для получения более точных результатов изготавливали и испытывали четыре колесных ролика с композиционным покрытием и четыре колесных ролика без покрытия. Рельсовые контролики при этом использовались одноразовые и их количество соответствовало количеству колесных роликов.

Испытание на износостойкость проводили на машине трения МИ-1 типа Амслера с механическим приводом, предназначенной для изучения процессов трения и износа металлов и сплавов (рис. 5).

Режим испытания (рис. 6) предусматривал качение колесного ролика по рельсовому с продольным 10%-ным проскальзыванием при постоянной нагрузке в контакте 75 кгс и контактном давлении ~ 700 МПа (соответствует давлению на площадке (пятне) контакта приработанных профилей колеса и рельса в эксплуатации). Нагрузка на образцы 75 кгс, обеспечивающая контактное давление ~ 700 МПа, определена по формуле Герца для линейного контакта.

Колесный ролик закрепляли на верхнем валу машины, а рельсовый контролик – на нижнем (опережающем) валу, после чего прикладывали нагрузку в контакте 75 кгс. До начала испытаний роликов производили их приработку с целью исключения возможного отклонения от соосности роликов и формирования равномерного и полного пятна их контакта. После приработки роликов производили их начальное взвешивание и начинали испытание на износ. С целью интенсификации процессов износа смазочный материал в зону контакта не подавали. Износ образцов учитывался как истирание и уменьшение веса колесного и рельсового роликов. Через каждые 20000 оборотов колесного ролика машину трения останавливали и производили взвешивание роликов. Испытание каждого комплекта образцов заканчивали после 60000 оборотов (три периода по 20000 оборотов) с фиксацией итогового весового износа колесного и рельсового роликов. Взвешивание образцов для определения износа производили на весах с точностью 0,001 г. В процессе испытаний регистрировали число оборотов ролика по счетчику машины, а также

контролировали стабильность приложения нормальной нагрузки на образцы (75 кгс). Длительность испытания 60000 оборотов является необходимой и достаточной для сравнительной оценки износостойкости образцов с композиционным покрытием и без покрытия.

Полученные в результате испытаний данные по износу для каждого комплекта колесных роликов и ответных рельсовых контрольных роликов приведены в Приложении А (таблица А.1). В качестве результата испытаний принимали среднее значение износа по четырем образцам каждого комплекта роликов.

По полученным данным построен график зависимости износа от числа оборотов колесных роликов с композиционным покрытием и без покрытия (рис. 7).

На основе полученных результатов произведена количественная сравнительная оценка износостойкости колесных роликов с композиционным покрытием и без покрытия, а также определены следующие характеристики процесса изнашивания:

- интенсивность износа (удельный износ) колесного/рельсового образца - разность масс колесного/рельсового образца между смежными периодами испытания, отнесенная к числу оборотов рабочего вала машины за один период испытания (20000 циклов);
- износ колесного/рельсового образца нарастающим итогом – сумма износов колесного/рельсового образца за все периоды испытания (60000 циклов);
- средняя износостойкость колесных/рельсовых роликов каждого типа – определялась как величина, обратная средней интенсивности износа;
- суммарный износ пары трения – определяли как сумму средних значений износа колесных и рельсовых роликов каждой группы.

Результаты количественной сравнительной оценки параметров процесса изнашивания и износостойкости колесных роликов с композиционным покрытием и без покрытия приведены в таблице 1.

Результаты сравнительных испытаний на износостойкость образцов из колес марки 2 с композиционным металлоалмазным покрытием и без покрытия

Показатель	Образцы из колеса без покрытия	Образцы из колеса с композиционным металлоалмазным покрытием	
	абс.	абс.	отн., %
Износостойкость колесного ролика, (циклов/грамм)$\times 10^5$	0,480	0,570	+19
Средняя интенсивность износа колесного ролика, (грамм/цикл) $\times 10^{-5}$	2,083	1,756	-16
Износ колесного ролика за все время испытания, г	0,625	0,527	-16
Износостойкость рельсового ролика, (циклов/грамм) $\times 10^5$	2,393	2,464	+3
Средняя интенсивность износа рельсового ролика, (грамм/цикл) $\times 10^{-5}$	0,418	0,406	-3
Износ рельсового ролика за все время испытания, г	0,251	0,244	-3
Суммарный износ пары трения, г	0,876	0,771	-12

Анализ графика износа на рис. 7 и данных в таблице 1 показывает, что колесные образцы с композиционным металлоалмазным покрытием на 19 % превосходят по износостойкости сравнительные колесные образцы без покрытия.

Сравнительные диаграммы износостойкости колесных образцов с композиционным покрытием и без покрытия приведены на рис. 8.

Полученные данные по износостойкости композиционного покрытия подтверждаются сравнительной диаграммой износа колесных роликов и рельсовых контроллеров после завершения испытания (рис. 9). При этом установлено, что износ ответных рельсовых роликов, работавших в паре с колесными роликами с композиционным покрытием, не отличается от износа рельсовых роликов, работавших в паре с колесными роликами без покрытия. Таким образом, испытания показали, что применение в паре трения колесных

роликов с композиционным покрытием не оказывает влияния на износ ответных роликов из рельса и не приводит к его увеличению.

Кроме этого, результаты испытаний показали, что пара трения с колесными роликами с композиционным покрытием характеризуется снижением суммарного износа образцов «колесный ролик+рельсовый контрролик» – меньше на 12 % в сравнении с парой трения без покрытия (рис. 10).

Состояние поверхностей трения комплектов колесных роликов и работавших в паре с ними рельсовых контрроликов в конце испытания после 60000 циклов показано на рис. 11 и 12.

2. Испытание на контактно-усталостную выносливость.

Испытание на контактно-усталостную выносливость проводили на образцах (дисках), изготовленных из обода стандартного колеса марки 2 по ГОСТ 10791-2011. На образцы, предназначенные для оценки контактно-усталостной выносливости композиционного металлоалмазного покрытия, перед испытанием было нанесено композиционное покрытие на плоскую рабочую поверхность. Сравнительные образцы из колеса проходили испытание без покрытия.

Всего испытанию подвергали 6 колесных дисков с композиционным покрытием и 6 сравнительных дисков:

- диски №№ K21, K22, K23, K24, K25 и K26 – с композиционным металлоалмазным покрытием на основе наноалмазного хрома, изготовленным и нанесенным ООО «РАМ» по заказу ООО «УТК»;

- диски №№ 21, 22, 23, 24, 25 и 26 – без покрытия.

Цель испытания – сравнительная оценка контактно-усталостной выносливости образцов из колес марки 2 с композиционным покрытием и без покрытия.

Лабораторное испытание на контактно-усталостную выносливость проведено по специальной методике, позволяющей дать сравнительную оценку стойкости колесных сталей к выщербинообразованию. Режим испытания

образцов моделировал процесс контактной усталости поверхности катания колеса в условиях эксплуатации. Данная методика позволяет испытывать различные группы образцов из колесной стали, отличающиеся друг от друга химическим составом, механическими свойствами (твердостью) и (или) покрытием.

Образцы из ободьев колес в виде плоских дисков диаметром 26 мм и толщиной 6 мм с коническими фасками (рис. 13) изготавливали согласно схеме, приведенной на рис. 14, с глубины 27 мм от поверхности катания, соответствующей середине рабочего слоя металла обода колеса.

Для получения более точных результатов изготавливали и испытывали шесть колесных дисков с композиционным покрытием и шесть колесных дисков без покрытия.

Испытание на контактно-усталостную выносливость проводили на машине ЛТМ (ВНИИПП) с механическим приводом и системой рычажного приложения вертикальной нагрузки на образцы (рис. 15). Схема испытания образцов приведена на рис. 16 и моделирует циклическое контактное взаимодействие поверхности катания колеса с поверхностью головки рельса. Режим испытания на контактно-усталостную выносливость представляет собой чистое качение шариков-контртел по плоскости колесного образца при нагрузке на обойму с шариками 1,5 кгс и скорости вращения колесного образца 4250 об/мин.

С целью интенсификации процесса возникновения контактно-усталостных повреждений испытание колесных образцов проводили в масле (индустриальное масло И-20).

Браковочным критерием при определении контактно-усталостной выносливости установлено возникновение на рабочей поверхности (дорожке качения) образца визуально видимых выкрашиваний (трещин). После возникновения выкрашиваний испытательную машину останавливали и испытание прекращали. Выявление момента возникновения выкрашиваний проводили визуальным методом при помощи лупы.

Контактно-усталостную выносливость каждого образца определяли числом оборотов, совершенных образцом до возникновения выкрашиваний.

Полученные в результате испытаний данные по контактно-усталостной выносливости для каждого комплекта колесных образцов приведены в Приложении Б (таблица Б.1). Фактическое значение контактно-усталостной выносливости рассчитывали, как среднее арифметическое по результатам испытаний шести образцов каждого комплекта.

Результаты количественной сравнительной оценки контактно-усталостной выносливости колесных дисков с композиционным покрытием и без покрытия приведены в таблице 2. Диаграмма значений контактно-усталостной выносливости, построенная по результатам испытаний, приведена на рисунке 17.

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний на контактно-усталостную выносливость образцов из колес марки 2 с композиционным покрытием и без покрытия

Показатель	Образцы из колеса без покрытия	Образцы из колеса с композиционным металлоалмазным покрытием	
	абс.	абс.	отн., %
Контактно-усталостная выносливость, циклов×10⁶	0,40	0,43	+8

Результаты испытаний показали, колесные образцы с композиционным металлоалмазным покрытием на 8 % превосходят по контактно-усталостной выносливости колесные образцы без покрытия.

Общий вид типовых колесных образцов каждой группы с характерными контактно-усталостными повреждениями на дорожках качения после завершения испытаний показан на фотографиях в Приложении В.

Заключение.

По результатам сравнительных испытаний на износостойкость и контактно-усталостную выносливость образцов из колес марки 2 с композиционным металлоалмазным покрытием и без покрытия установлено следующее:

1. Композиционное металлоалмазное покрытие на основе наноалмазного хрома, изготовленное и нанесенное ООО «РАМ» по заказу ООО «УТК», на 19 % повышает износостойкость колесных образцов в сравнении с колесными образцами без покрытия.

2. Применение в паре трения колесных роликов с композиционным металлоалмазным покрытием не оказывает существенного влияния на износ ответных роликов из рельса и не приводит к его увеличению, при этом суммарный износ колесного и рельсового образцов на 12 % ниже, чем в паре трения без покрытия.

3. Колесные образцы с композиционным металлоалмазным покрытием на 8 % превосходят по контактно-усталостной выносливости колесные образцы без покрытия, т.е. имеют сопоставимую стойкость к контактно-усталостным повреждениям.

4. Рекомендуется провести корректировку технологического процесса нанесения на колеса композиционного металлоалмазного покрытия в части повышения его износостойкости и толщины.

5. Рекомендуется продолжить работу по апробации композиционного металлоалмазного покрытия для колес грузовых вагонов с целью подтверждения снижения износа гребней в эксплуатационных условиях.

Начальник отдела
«Материаловедение рельсов и колес»
НЦ «Инфраструктура»,
кандидат технических наук

Г.И. Брюнчуков

Технический эксперт отдела
«Материаловедение рельсов и колес»
НЦ «Инфраструктура»,
кандидат технических наук

Ю.В. Ронжина

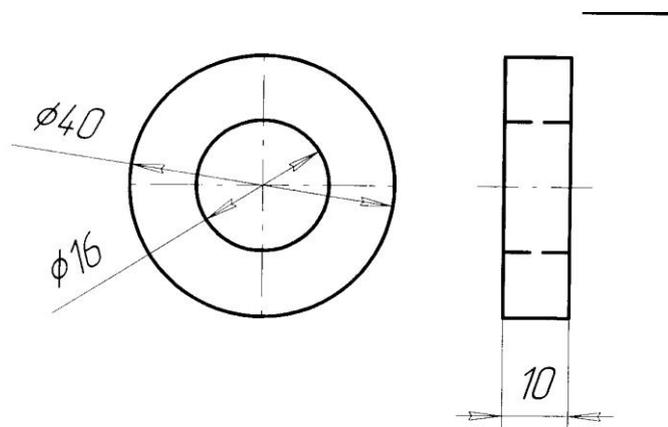


Рис. 1. Эскиз колесного ролика для испытания на износостойкость

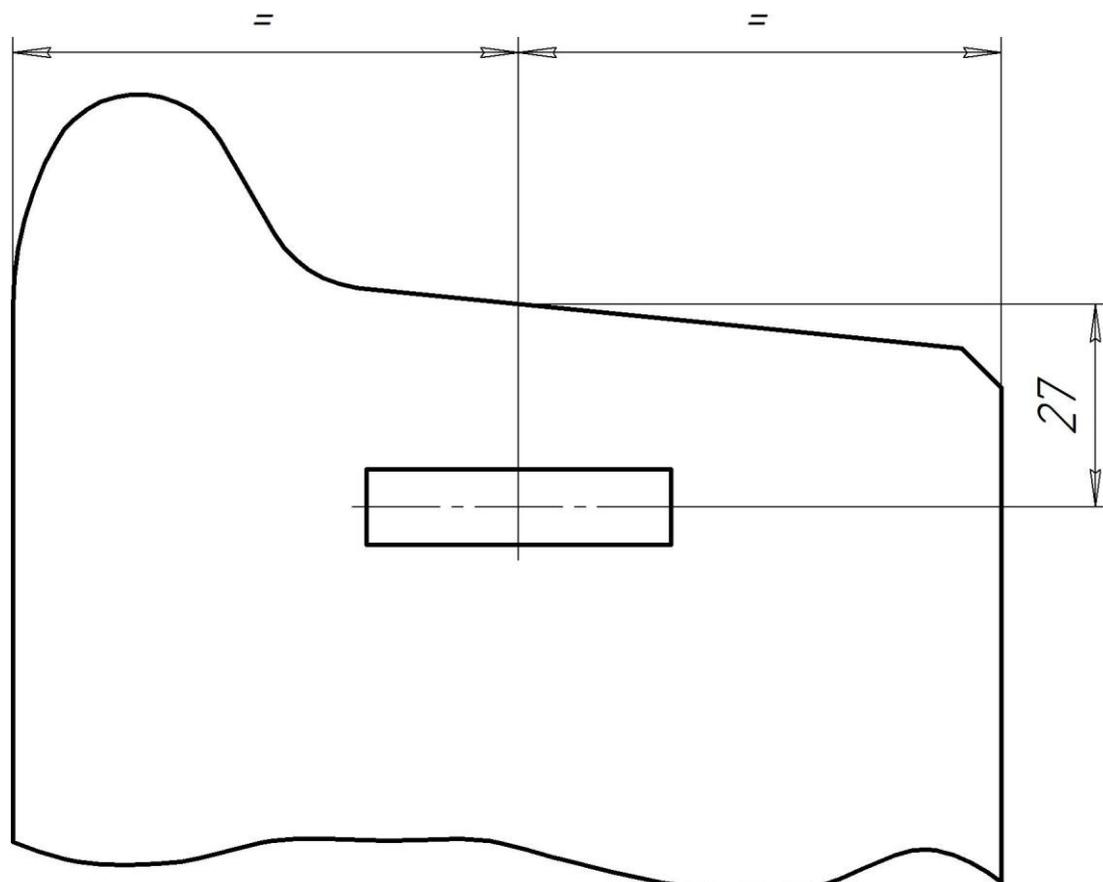


Рис. 2. Схема вырезки роликов из колес

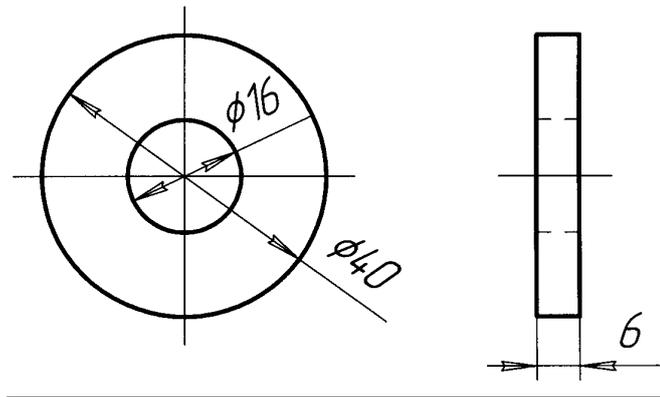


Рис. 3. Эскиз рельсового ролика для испытания на износостойкость

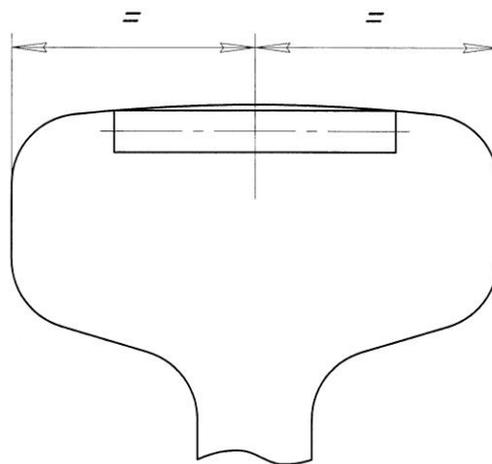


Рис. 4. Схема вырезки роликов из рельса

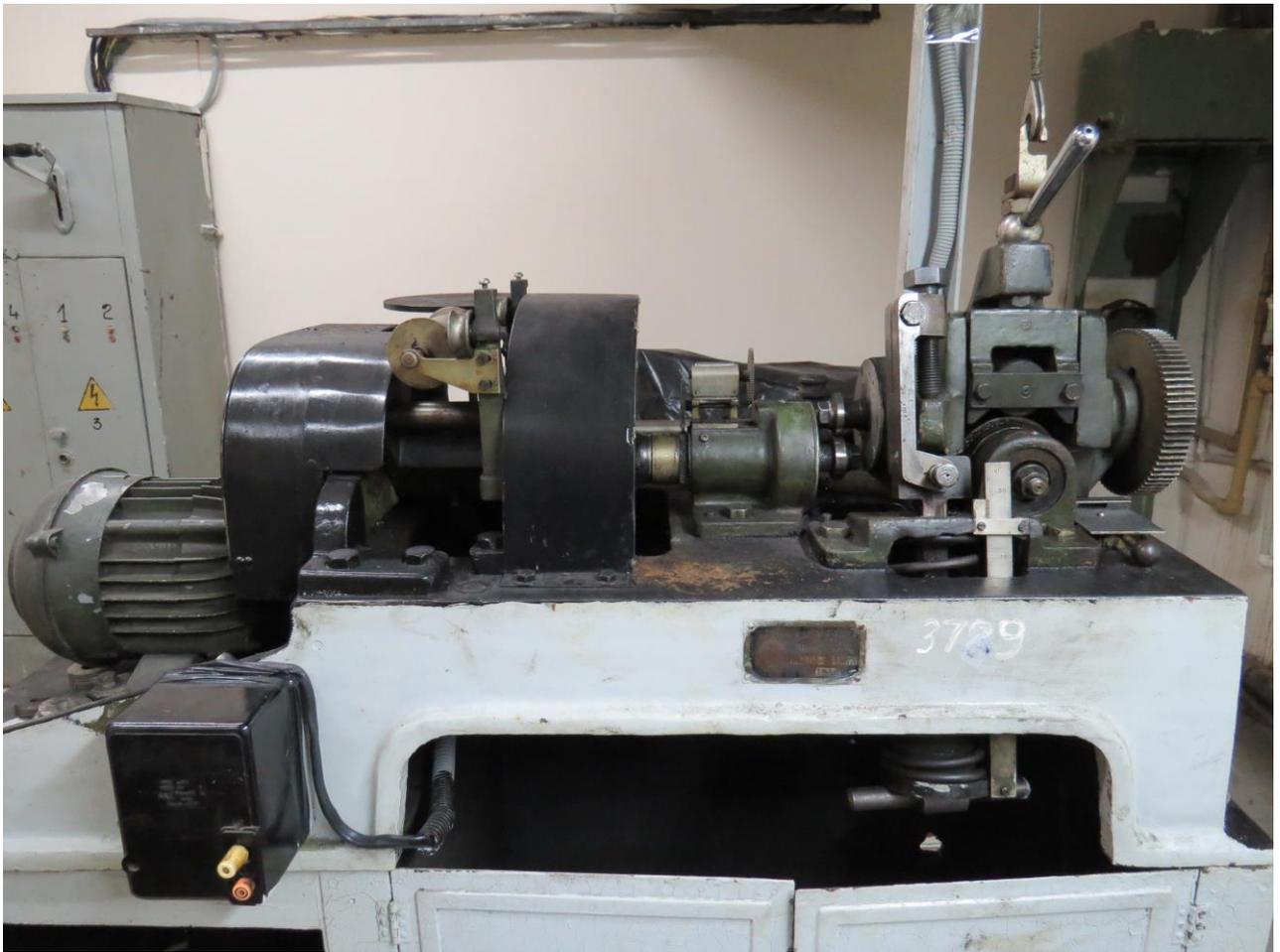


Рис. 5. Общий вид машины трения МИ-1

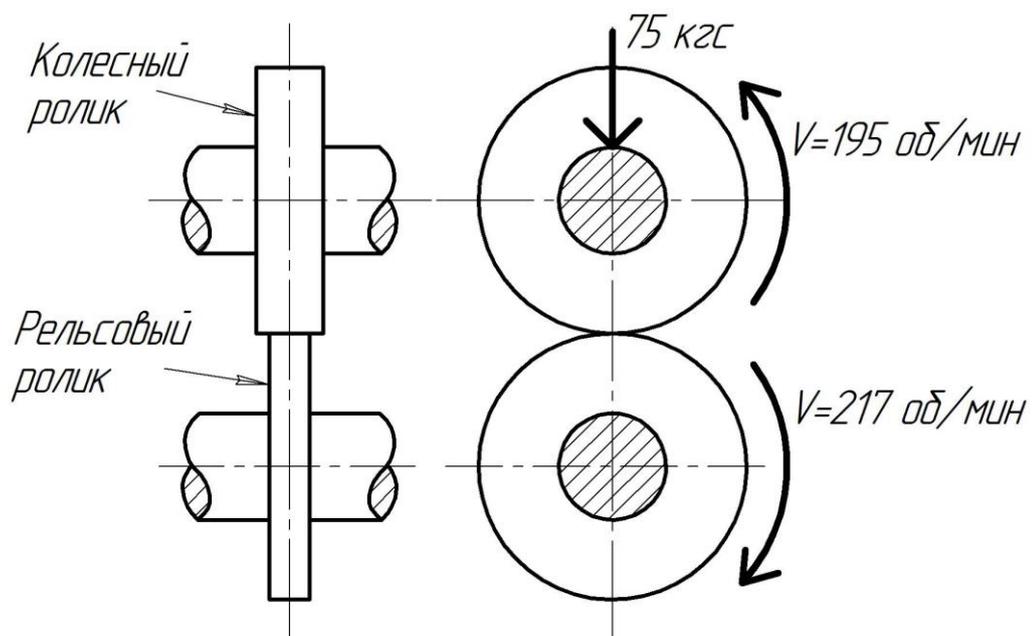


Рис. 6. Схема испытания на износостойкость

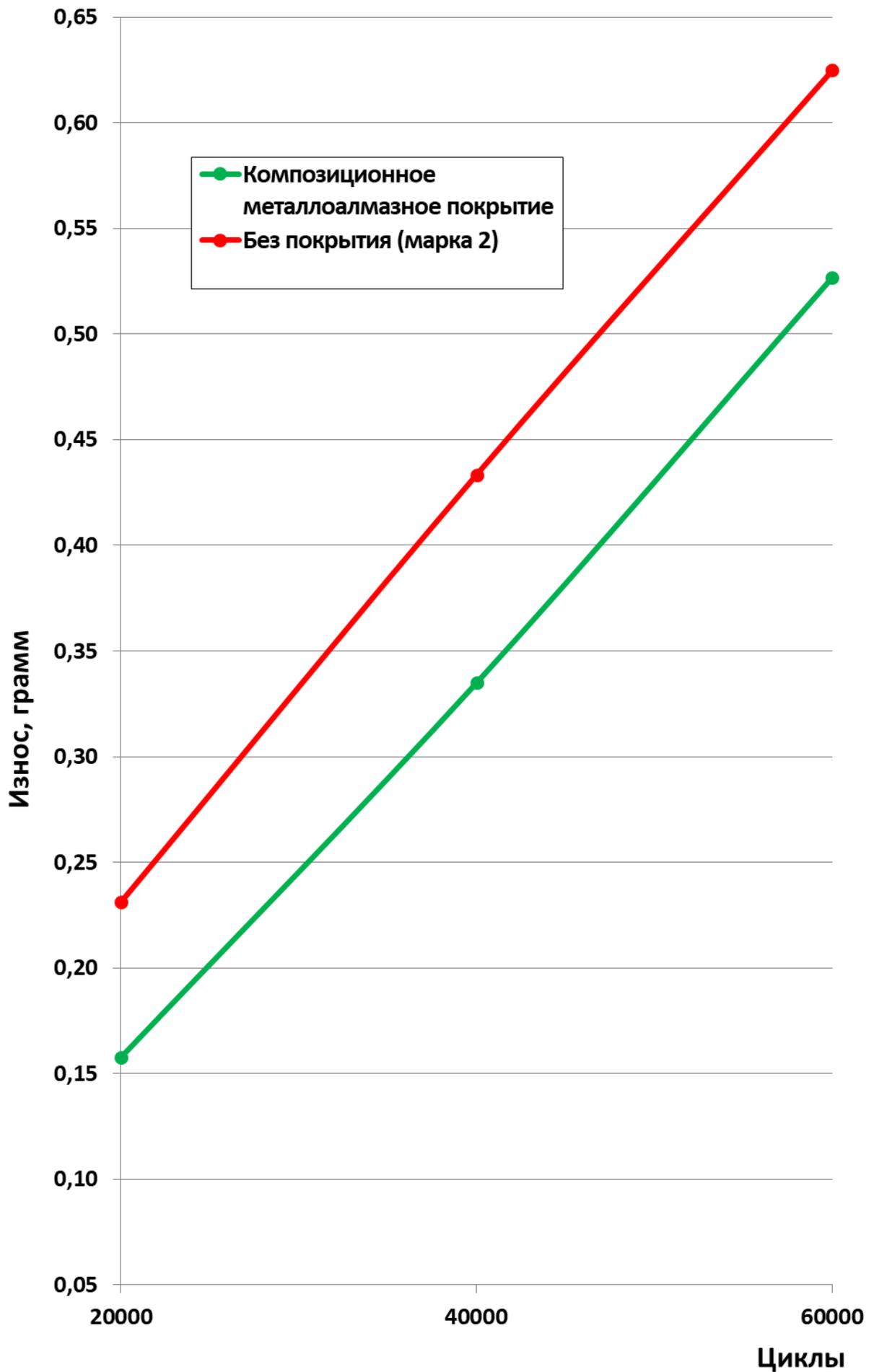


Рис. 7. Износ колесных роликов с композиционным металлоалмазным покрытием и без покрытия за время испытания

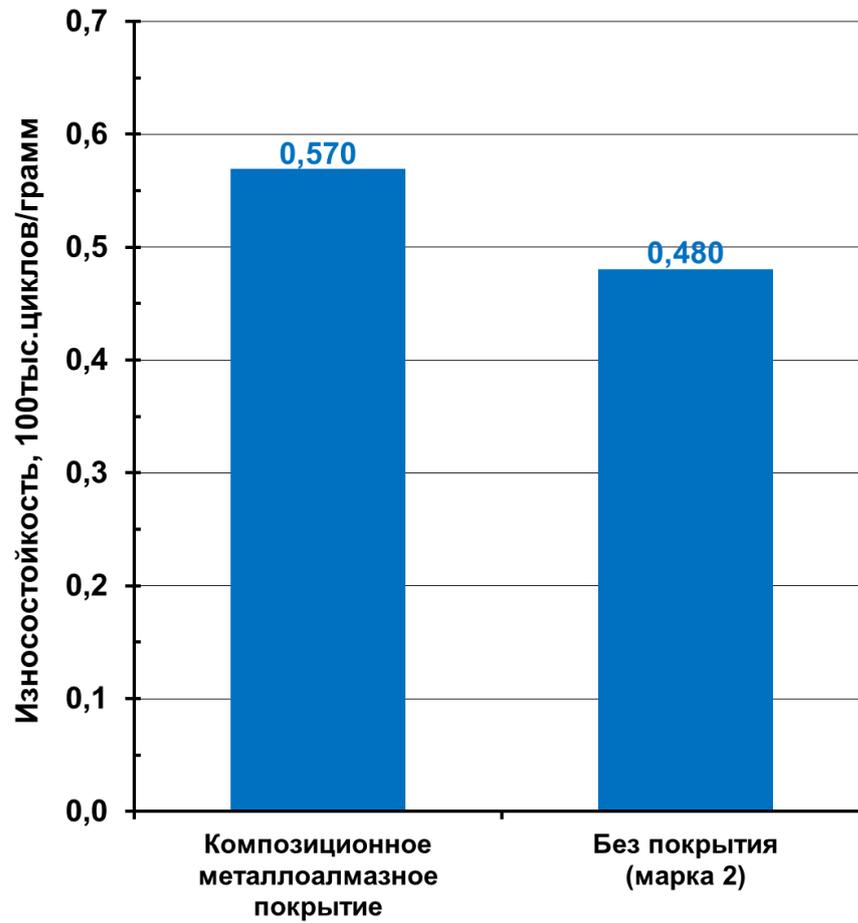


Рис. 8. Сравнительная износостойкость колесных роликов с композиционным металлоалмазным и без покрытия

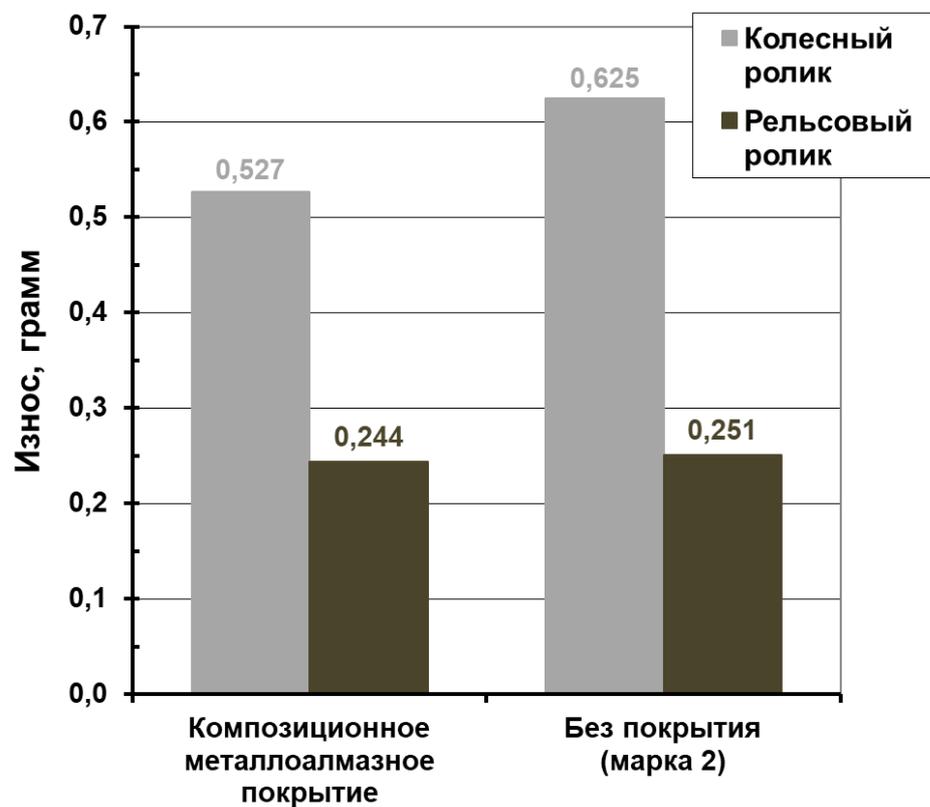


Рис. 9. Износ колесных роликов и рельсовых контроллеров за все время испытания

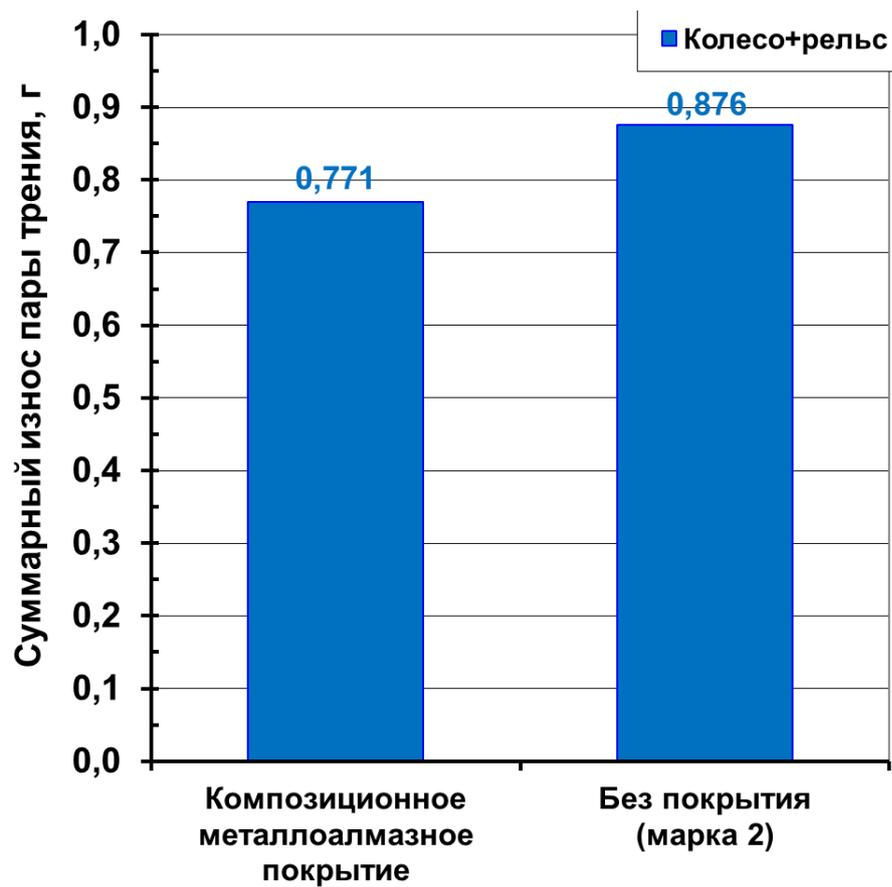


Рис. 10. Суммарный износ пар трения (колесный ролик+рельсовый контролик)



Рис. 11. Внешний вид поверхностей трения колесных роликов с композиционным покрытием (вверху) и ответных рельсовых контроликов (внизу) после завершения испытаний

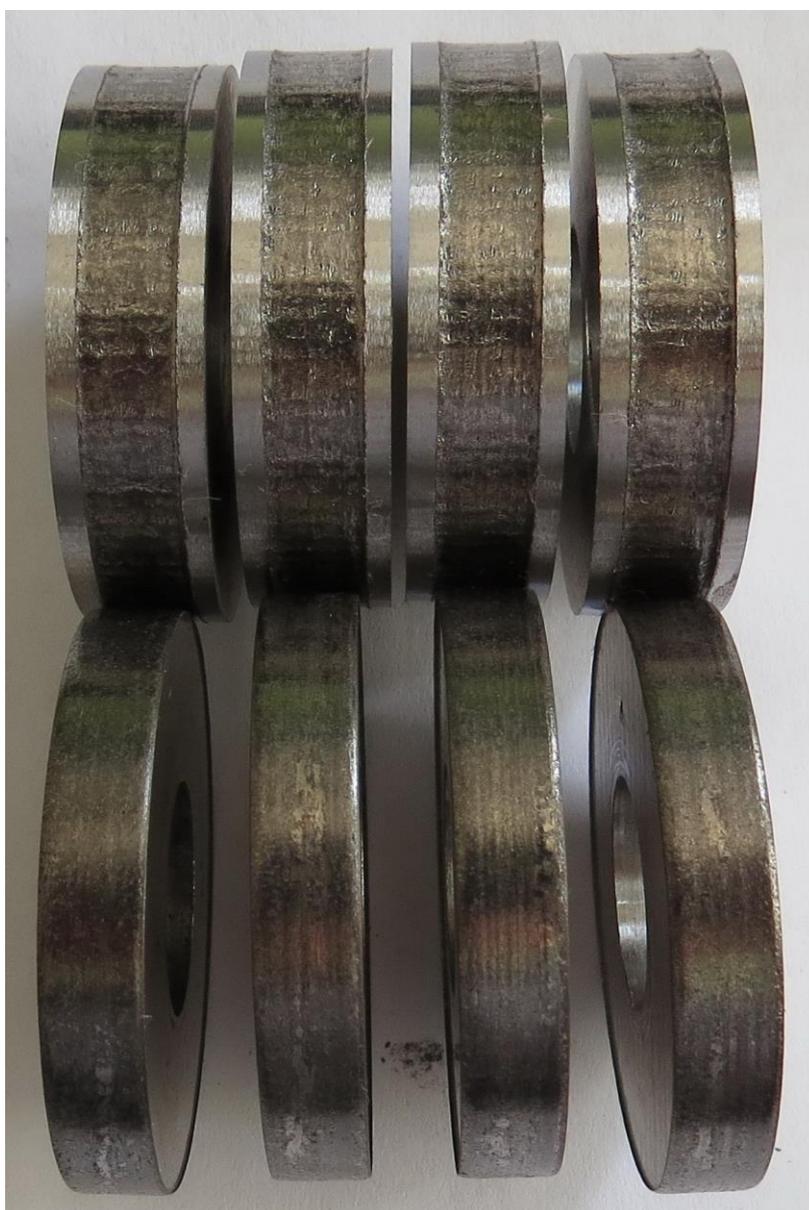


Рис. 12. Внешний вид поверхностей трения колесных роликов без покрытия (вверху) и ответных рельсовых контроликов (внизу) после завершения испытаний

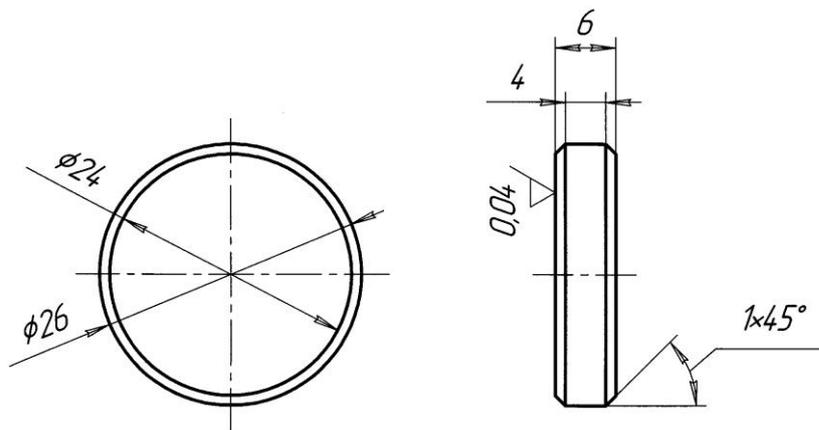


Рис. 13. Эскиз колесного образца для испытания на контактно-усталостную выносливость

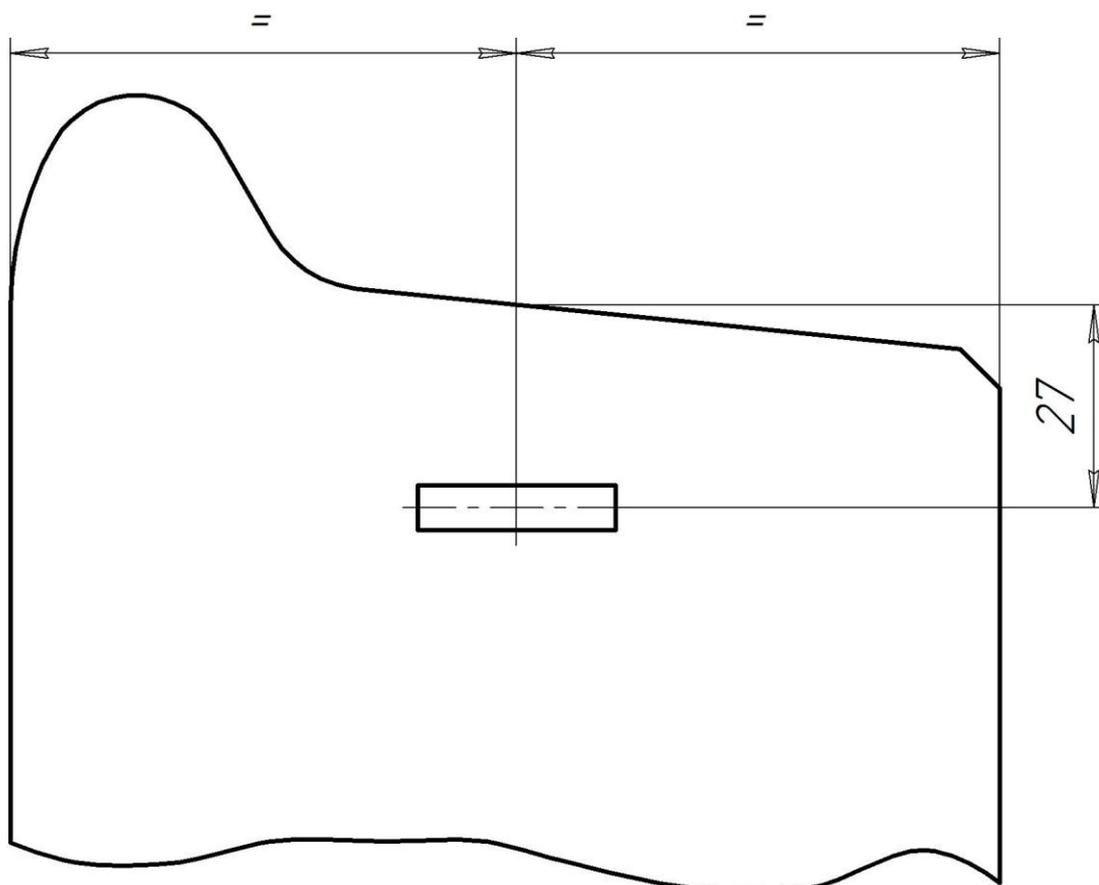


Рис. 14. Схема вырезки образцов из обода колеса для испытания на контактно-усталостную выносливость



Рис. 15. Машина для испытания на контактно-усталостную выносливость

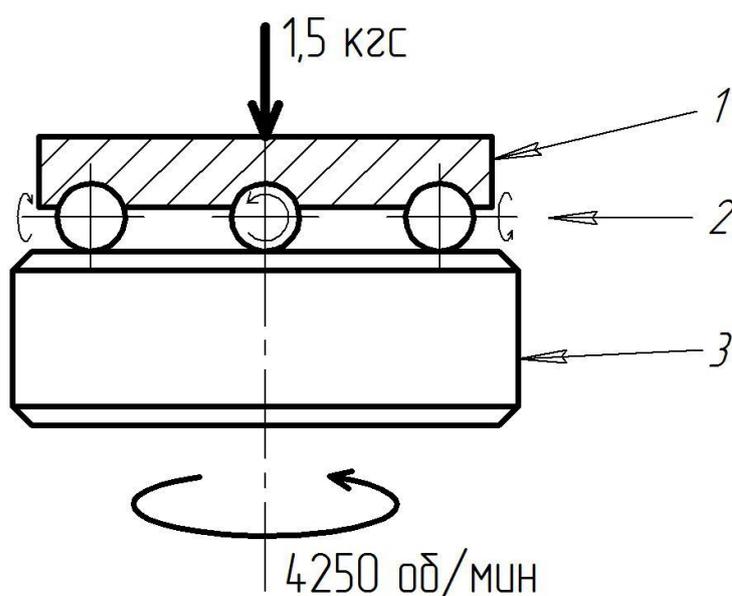


Рис. 16. Схема проведения испытания на контактно-усталостную выносливость:
 1 – неподвижно закрепленная обойма; 2 – шарики-контртела, свободно вращающиеся в обойме; 3) вращающийся колесный образец

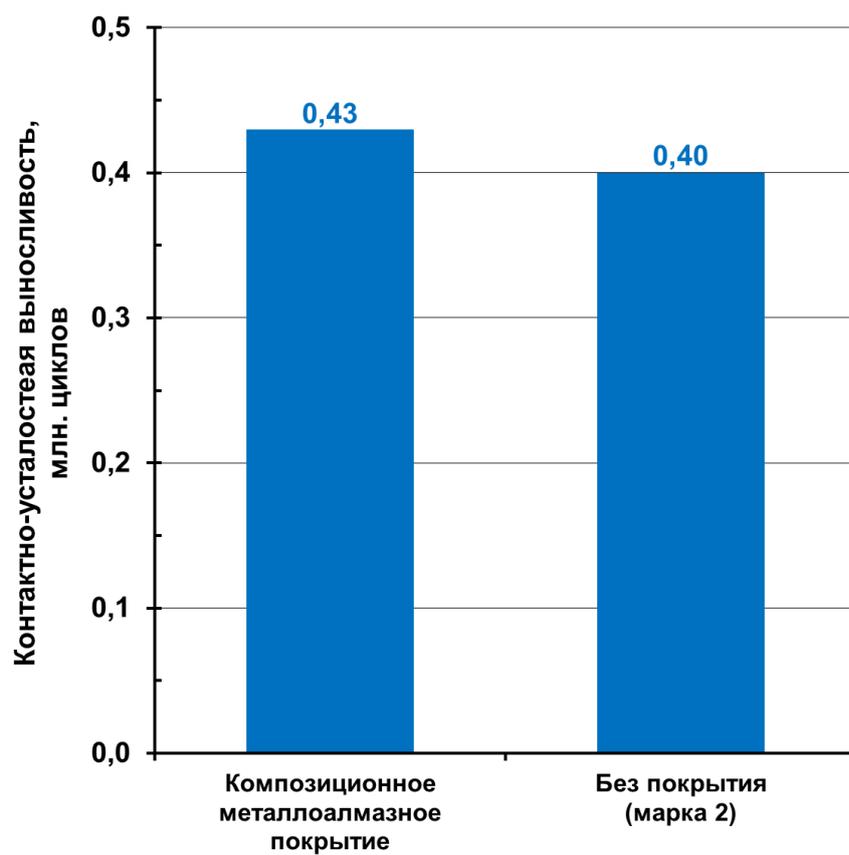


Рис. 17. Сравнительная контактно-усталостная выносливость колесных образцов с композиционным металлоалмазным и без покрытия

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 (начало)

Исходные данные по износу колесных и рельсовых образцов при испытании

Тип покрытия	№ колесного образца	Число циклов испытания, обороты	Масса образца m_i , грамм	Износ образца за один период Δt ($m_{i-1}-m_i$), грамм	Износ образца нарастающим итогом $\Sigma \Delta t$, грамм	№ рельсового образца	Число циклов испытания, обороты	Масса образца m_i , грамм	Износ образца за один период Δt ($m_{i-1}-m_i$), грамм	Износ образца нарастающим итогом $\Sigma \Delta t$, грамм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Композиционное металлалмазное покрытие	14	0	82,460	-	-	9	0	49,344	-	-
		20000	82,287	0,173	0,173		20000	49,239	0,105	0,105
		40000	82,103	0,184	0,357		40000	49,160	0,079	0,184
		60000	81,896	0,207	0,564		60000	49,058	0,102	0,286
	15	0	82,443	-	-	10	0	49,395	-	-
		20000	82,285	0,158	0,158		20000	49,339	0,056	0,056
		40000	82,071	0,214	0,372		40000	49,292	0,047	0,103
		60000	81,849	0,222	0,594		60000	49,197	0,095	0,198
	16	0	82,367	-	-	11	0	49,337	-	-
		20000	82,199	0,168	0,168		20000	49,247	0,090	0,090
		40000	82,031	0,168	0,336		40000	49,137	0,110	0,200
		60000	81,840	0,191	0,527		60000	49,063	0,074	0,274
	17	0	82,403	-	-	12	0	49,351	-	-
		20000	82,271	0,132	0,132		20000	49,282	0,069	0,069
		40000	82,128	0,143	0,275		40000	49,238	0,044	0,113
		60000	81,981	0,147	0,422		60000	49,135	0,103	0,216

Таблица А.1 (окончание)

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
Без покрытия (марка 2)	5	0	82,021	-	-	5	0	49,440	-	-
		20000	81,798	0,223	0,223		20000	49,361	0,079	0,079
		40000	81,600	0,198	0,421		40000	49,293	0,068	0,147
		60000	81,372	0,228	0,649		60000	49,168	0,125	0,272
	6	0	82,145	-	-	6	0	49,364	-	-
		20000	81,902	0,243	0,243		20000	49,287	0,077	0,077
		40000	81,717	0,185	0,428		40000	49,205	0,082	0,159
		60000	81,579	0,138	0,566		60000	49,111	0,094	0,253
	7	0	82,010	-	-	7	0	49,367	-	-
		20000	81,775	0,235	0,235		20000	49,285	0,082	0,082
		40000	81,560	0,215	0,450		40000	49,197	0,088	0,170
		60000	81,357	0,203	0,653		60000	49,140	0,057	0,227
	8	0	82,063	-	-	8	0	49,403	-	-
		20000	81,839	0,224	0,224		20000	49,308	0,095	0,095
		40000	81,628	0,211	0,435		40000	49,224	0,084	0,179
		60000	81,432	0,196	0,631		60000	49,152	0,072	0,251

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1

Результаты испытаний на контактно-усталостную выносливость колесных образцов

Образцы из колеса без покрытия		Образцы из колеса с композиционным металлоалмазным покрытием	
№ образца	Контактно-усталостная выносливость, циклов×10 ⁶	№ образца	Контактно-усталостная выносливость, циклов×10 ⁶
21	0,4	К21	0,3
22	0,3	К22	0,4
23	0,5	К23	0,5
24	0,3	К24	0,4
25	0,5	К25	0,4
26	0,4	К26	0,6
Среднее	0,40	Среднее	0,43

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Общий вид контактно-усталостных повреждений на дорожке качения типовых колесных образцов каждой группы



Рис. В.1. Образец из колеса с композиционным металлоалмазным покрытием (№ К23), состояние после $0,5 \times 10^6$ циклов испытания



Рис. В.2. Образец из колеса без покрытия (№ 25), состояние после $0,5 \times 10^6$ циклов испытания