

УДК 539.3

## РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ФРИКЦИОННЫХ ТОРМОЗНЫХ ДИСКОВ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ СЕМЕЙСТВА БЕЛАЗ

**В.В. РУДЫЙ**

(Белорусский автомобильный завод, Минск);

д-р техн. наук **В.Е. АНТОНЮК**

(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);

д-р техн. наук, проф. **Э.М. ДЕЧКО**

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлен анализ действующего технологического процесса изготовления фрикционных дисков для специальных большегрузных машин и исследованы причины выхода дисков из строя. Для повышения ресурса тормозных устройств предлагается ввести в технологический процесс изготовления тормозных дисков операции динамической стабилизации. Это обеспечит повышение точности по отклонению от плоскостности до 0,2...0,35 мм, уменьшение припусков на операциях шлифования, снижение остаточных напряжений и повышение ресурса.

Увеличение объемов грузоперевозок и совершенствование конструкций транспортных машин сопровождается возрастанием нагрузок на их тормозные устройства. Это обуславливает необходимость разработки специальных тяжелонагруженных тормозных устройств, к которым относятся многодисковые маслоохлаждаемые тормоза (ММОТ).

Многодисковые маслоохлаждаемые тормоза являются эффективной конструкцией, позволяющей существенно повысить мощность и надежность тормозной системы при длительных, многократных торможениях и интенсивном тепловыделении, что характерно для большегрузных карьерных самосвалов при движении на затяжных спусках.

В современных тяжелых карьерных самосвалах таких предприятий и фирм, как БелАЗ, CLARK, KOMATSU и CATERPILLAR, в качестве тормозных систем используются маслоохлаждаемые тормоза с фрикционными дисками, наружный диаметр которых достигает до 900 мм. Анализ результатов эксплуатации карьерных самосвалов с ММОТ показал, что работоспособность ММОТ и соответственно работоспособность и надежность работы карьерного самосвала в значительной степени зависят от точности и качества изготовления тормозных фрикционных дисков.

Например, карьерный самосвал грузоподъемностью 90 т БелАЗ-75570 прошел испытания в условиях эксплуатации в ОАО «Ерунаковский угольный разрез». При пробеге 64950 км произошло разрушение маслоохлаждаемых тормозных механизмов (рис. 1).

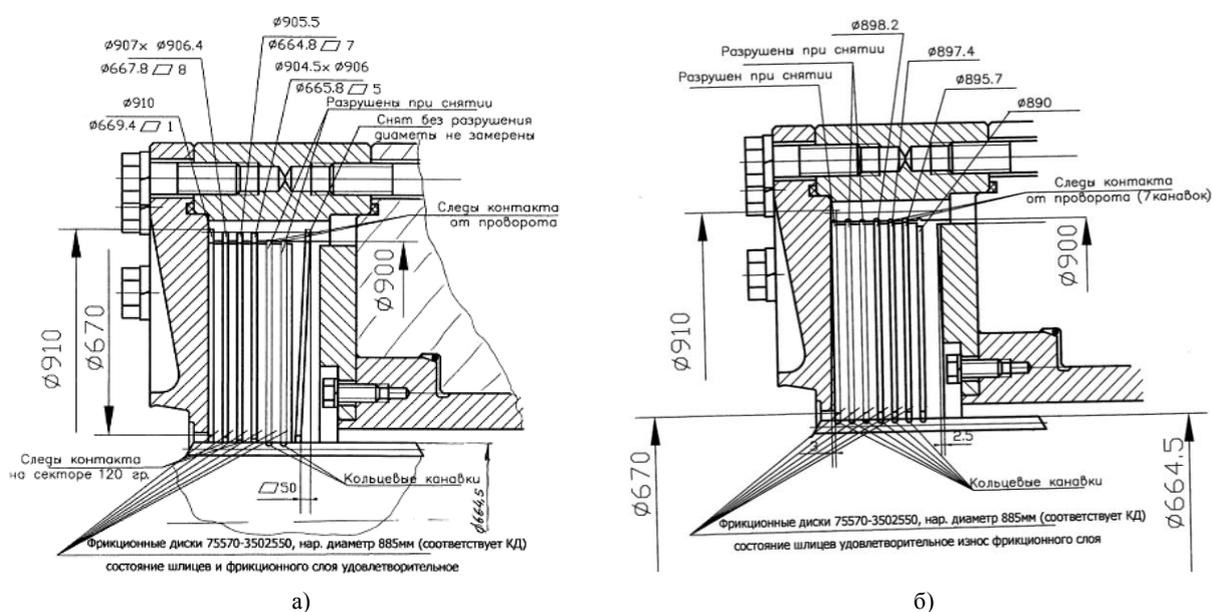


Рис. 1. Основные зоны разрушения ММОТ ведущего моста БелАЗ-75570:

а – левого; б – правого

Анализ состояния фрикционных дисков ММОТ показал следующее:

- уменьшение наружного диаметра тормозных промежуточных дисков на 20 мм, что привело к выходу их из шлицевого соединения и провороту;
- увеличенная «тарельчатость» тормозных промежуточных дисков до 100 мм;
- наличие кольцевых канавок на зубчатых венцах корпусных деталей в местах контакта с тормозными дисками;
- раскрытие стыка на 5...10 мм при радиальном разрезе диска после окончательной термообработки и складывание частей диска на 20...100 мм от разреза после работы в условиях эксплуатации, что связано, вероятно, с остаточными напряжениями.

Можно предположить, что причиной отказа ММОТ могли быть перегрев ММОТ и коробление тормозных промежуточных дисков из-за остаточных внутренних напряжений, полученных при обработке. В результате проведенного анализа установлено, что фрикционные диски ММОТ имели повышенное отклонение от плоскостности уже в процессе изготовления (шлифование со снятием слоя 1 мм на сторону) – образовались остаточные напряжения. Во время эксплуатации при включении и выключении тормоза под действием температуры и колебательных процессов при включении и выключении тормоза тормозные диски освобождаются от внутренних напряжений и приобретают «тарельчатость», которая усиливается из-за неравномерного нагрева по радиусу вследствие разных работ сил трения. При отводе поршня для первого диска от поршня образуется свободное пространство, и диск, приобретая «тарельчатость», занимает это пространство, затем точно так же второй и последующие и т.д. После набора «тарельчатости» диски занимают все свободное пространство (гарантированный зазор) для отвода поршня, и под действием «тарельчатости» возникает постоянное подтормаживание дисков. Потока масла становится недостаточно для охлаждения, температура повышается. Происходит нагрев корпуса ММОТ, крышки и диска нажимного. Под действием температуры диск нажимной и крышка также приобретает «тарельчатость». Нагрев корпуса ММОТ должен привести к увеличению диаметра обода тормоза. В результате приобретения «тарельчатости» на тормозном диске уменьшается площадь контакта между тормозным и фрикционным дисками, возрастают удельные давления с высокой локальной температурой и происходит срыв фрикционной накладки на фрикционных дисках. Так как масса металла со стороны нажимного диска несколько меньше, чем со стороны крышки, то повышенная температура и наибольшие деформации наблюдаются на первых фрикционных дисках со стороны нажимного диска. В результате уменьшения наружного диаметра тормозных дисков и увеличения наружного диаметра обода тормоза ММОТ происходит сначала смещение дисков с оси ММОТ, от эксцентричного положения тормозного диска возникает обкатное движение наружных зубьев диска по внутренним зубьям корпуса, а также внутреннего диаметра диска по наружным зубьям фланца, причем с изменяющейся высотой контакта, что приводит к образованию канавок на ободу тормоза и на фланце. По мере увеличения зазоров происходит сначала односторонний выход дисков из зубчатого зацепления. Возникновение обкатного движения способствует такому выходу, так как вследствие даже небольшого перекоса диска возникает его винтовое перемещение и осевое усилие, вытягивающее диск из зубчатого зацепления, что приводит к его заклиниванию.

На БелАЗе для изготовления фрикционных дисков ММОТ применяется технологический процесс изготовления стальных промежуточных дисков (контртел) и стальной основы под последующую наклейку фрикционных «бумажных» накладок, состоящий из операций:

- кислородно-плазменная вырезка заготовки, правка при необходимости;
- закалка при температуре 800...820 °С и выдержке 45...60 минут в пакете по 25 штук;
- мойка, при необходимости ручная правка;
- отпуск при 550 °С в прессе по 1 штуке с выдержкой 15 минут или отпуск при 520...540 °С с выдержкой 2...2,5 часа в пакете по 25 штук;
- предварительное шлифование торцов;
- токарная обработка;
- нарезание зубчатого венца;
- отпуск 620...660 °С, выдержка 1,5...2 часа, охлаждение пакетом;
- окончательное шлифование торцов;
- термофиксация при 450...460 °С, выдержка 1,5...2 часа, охлаждение пакетом;
- ручная правка при необходимости.

Применяемый на БелАЗе технологический процесс изготовления стальных дисков и стальной основы можно считать традиционным, за исключением применения термофиксации после окончательного шлифования. На большинстве предприятий, изготавливающих стальные диски, такая операция не применяется. Наклейка фрикционных «бумажных» накладок на стальную основу производится на других предприятиях, за пределами БелАЗ, и не оказывает существенного влияния на отклонение от плоскостности. В связи с этим основное внимание по исследованию причин возникновения погрешностей при изготовлении фрикционных дисков уделено исследованию и анализу технологического процесса изготовления стальных дисков и стальной основы фрикционных дисков на БелАЗ.

С целью определения фактической точности изготовления стальных фрикционных дисков на БелАЗ проводился статистический анализ точности изготовления фрикционных дисков 7555В-3502595 и 7555В-3502554 по параметру «отклонение от плоскостности» после основных операций. Измерение отклонения от плоскостности проводилось щупом на контрольной плите в соответствии с принятой схемой контроля этой погрешности в технологическом процессе. Размер выборки – 25 фрикционных дисков 7555В-3502595 и 7555В-3502554, которые измерялись после операций закалки и отпуска, предварительного шлифования, отпуска, окончательного шлифования, термофиксации. Размер выборки позволял рассчитать основные параметры статистического анализа и построить кривые нормального распределения. Для сравнения результатов достигаемой фактической точности при изготовлении фрикционных дисков первые измерения были проведены в 2005 году и ежегодно повторялись.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты измерения точности фрикционных дисков 7555В-3502595 и 7555В-3502554 по отклонению от плоскостности. В таблице 3 дана оценка точности изготовления дисков по отношению к допускаемым отклонениям на различных операциях.

Таблица 1

Точность изготовления фрикционных дисков 7555В-3502595

После операции	Допуск на отклонение от плоскостности, мм	Фактический интервал по отклонению от плоскостности, мм	Центр рассеяния (математическое ожидание) $X_0$ , мм	Среднее квадратическое отклонение $\sigma$ , мм
Закалка при нагреве 800...820 °С отпуск при 520...540 °С	1,0	0,15...1,10	0,663	0,266
Предварительное шлифование торцов, токарная обработка, нарезание зубчатого венца	–	0,4...2,6	0,84	0,435
Отпуск 620...660 °С	0,2	0,3...1,8	0,617	0,315
Окончательное шлифование торцов	0,2	0,35...1,6	0,760	0,317
Термофиксация при 450...460 °С	0,2	0,3...1,77	0,692	0,352

Таблица 2

Точность изготовления фрикционных дисков 7555В-3502554

После операции	Допуск на отклонение от плоскостности, мм	Фактический интервал по отклонению от плоскостности, мм	Центр рассеяния (математическое ожидание) $X_0$ , мм	Среднее квадратическое отклонение $\sigma$ , мм
Кислородно-плазменная вырезка заготовки	1,0	0,65...9,5	2,635	1,851
Закалка при нагреве 800...820 °С, отпуск при 520...540 °С	1,0	0,1...0,85	0,339	0,191
Предварительное шлифование торцов, токарная обработка, нарезание зубчатого венца	–	0,2...0,9	0,460	0,178
Отпуск 620...660 °С	0,2	0,15...0,65	0,353	0,137
Окончательное шлифование торцов	0,2	0,2...0,7	0,400	0,158
Термофиксация при 450...460 °С	0,2	0,1...0,6	0,244	0,136

Таблица 3

Расчетный процент брака по результатам статистического анализа

После операции	Допуск на отклонение от плоскостности, мм	Фрикционные диски	
		7555В-3502595	7555В-3502554
Кислородно-плазменная вырезка заготовки, правка при необходимости	1,0		79
Закалка при нагреве 800...820 °С, отпуск при 520...540 °С	1,0	11	
Нарезание зубчатого венца	–		
Отпуск 620...660 °С	0,2	100	87
Окончательное шлифование торцов	0,2	100	89
Термофиксация при 450...460 °С	0,2	100	63

Измерение диска 75570-3502595-10 показало, что после предварительного шлифования торцов, токарной обработки и нарезания зубчатого венца отклонение от плоскостности составляет 0,45...2,2 мм, причем возникает тарельчатость диска до 2 мм.

После кислородно-плазменной вырезки заготовки для вырезанных колец по мере необходимости применяется правка на листопрямительной валковой машине за несколько ходов с изменением направления движения колец. Для проверки эффективности правки проведены измерения 10-ти заготовок дисков 75570-3502595-10 после кислородно-плазменной вырезки и правки за 5...6 ходов. Отклонение от плоскостности составляло 0,3...1,5 мм. После вылеживания этих заготовок в течение 30 дней были проведены повторные измерения отклонения от плоскостности, которые составили 0,7...1,95 мм. Увеличение отклонения от плоскостности было зафиксировано на всех дисках от 30 до 50 %.

Таким образом, применение листопрямительной валковой машины не обеспечивает в полном объеме заданного отклонения от плоскостности не более 1 мм. Диски, прошедшие правку на листопрямительной машине, имеют большие остаточные внутренние напряжения и продолжают деформироваться. После 30 дней «вылеживания» происходит увеличение отклонения от плоскостности от 30 до 50 %.

В связи с тем, что для исправления отклонения от плоскостности на БелАЗе после окончательного шлифования торцов применяется термофиксация, было проведено исследование влияния термофиксации на исправляемость фрикционных дисков после их окончательного изготовления. Фрикционные диски 75570-3502554 в количестве 150 штук проходили термофиксацию в пакетах по 25 штук при температуре 650 °С в течение 3-х часов с последующим охлаждением до 300 °С, а затем с охлаждением на воздухе. До термофиксации диски имели отклонение от плоскостности в пределах 0,5...1,2 мм, т.е. все диски не соответствовали установленному допуску 0,2 мм. После термофиксации было получено 25 дисков (17 %) с отклонением от плоскостности в пределах 0,3 мм; 63 диска (42 %) с отклонением от плоскостности в пределах 0,4 мм и 62 диска (41 %) с отклонением от плоскостности свыше 0,5 мм.

Для 75 дисков с отклонением свыше 0,3 мм была проведена повторная термофиксация, в результате было получено 12 дисков с отклонением до 0,3 мм, остальные свыше 0,4...0,5 мм.

Следует заметить, что термофиксация после окончательной обработки дисков запрещена на ряде предприятий, изготавливающих фрикционные диски для спецмашин, так как это может приводить к нежелательным структурным изменениям. Повторная термофиксация вообще не применяется, а при повторной термофиксации на БелАЗе возникли такие явления, как спекание дисков в пакете, требующее значительных усилий для их разделения.

Для проверки поведения заготовки при термофиксации фрикционного диска в зажатом состоянии в пакете было проведено исследование изменения размеров фрикционного диска 75570-3502554 при нагреве. Заготовка диска 75570-3502554 после токарной обработки с наружным диаметром 885 нагревались до 200 °С и затем охлаждались. При нагреве до 200 °С происходило увеличение наружного диаметра в пределах от 0,7 до 1,1 мм. При последующем охлаждении наружный диаметр отличался от исходного от +0,1 до -0,2 мм. Экспериментально получено, что если при температуре нагрева до 200 °С происходит увеличение наружного диаметра в среднем на 0,9 мм, то при термофиксации при нагреве до 650 °С увеличение наружного диаметра будет превышать 2 мм. Так как диски в пакете по 25 штук находятся в зажатом положении, сила зажима будет удерживать их от увеличения наружного диаметра при нагреве. Однако усилия зажима, действующие в радиальном направлении, намного меньше температурных сил от увеличения диаметра диска при нагреве. В этом случае будет происходить то же самое, что и при закалке деталей в штампе – происходит превышение температурных сил на одном из сечений детали и «срыв» детали по этому сечению. В результате образуется овальность детали и возрастают внутренние напряжения. Поэтому для получения равномерного деформирования детали при нагреве и охлаждении для деталей типа дисков применяется закалка в штампах на прессах с пульсирующей нагрузкой.

Таким образом, термофиксация окончательно изготовленных дисков не дает положительного эффекта, а повторная термофиксация может приводить к значительным их повреждениям.

Исследование технологических процессов изготовления фрикционных дисков показывает, что увеличенная погрешность по отклонению от плоскостности возникает уже на первых операциях изготовления дисков и наблюдается практически на всех последующих операциях. Дополнительная термическая обработка – термофиксация – после окончательного шлифования рабочих поверхностей не вносит существенных улучшений. Использование листопрямительной валковой машины не снимает внутренних напряжений.

Полученные результаты на БелАЗе совпадают с результатами измерения фрикционных дисков на Уралвагонзаводе, где для окончательно изготовленных деталей не применяется термофиксация [1].

Проведенный анализ технологических процессов изготовления фрикционных дисков ММОТ на БелАЗ позволил сделать выводы о невозможности по действующему технологическому процессу обеспечения требуемой

точности фрикционных дисков по параметру «отклонение от плоскостности» в полном объеме и требуется разработка нового технологического процесса с использованием динамической стабилизации.

При разработке типового технологического процесса применительно к изготовлению фрикционных дисков ММОТ, используемых в карьерных самосвалах семейства БелАЗ, были заложены следующие основные принципы использования динамической стабилизации:

а) динамическая стабилизация дисков вводится на промежуточных стадиях изготовления дисков, а именно:

- после вырезки заготовки диска;
- после предварительного шлифования;
- окончательно обработанного диска.

То есть после тех операций, где возникают наибольшие деформации дисков;

б) предусматривается возможность использования динамической стабилизации при изменении толщины поставляемого листа в качестве заготовки фрикционного диска:

- толщиной 3,4 мм;
- толщиной 3 мм.

Это позволяет планировать переход на использование холоднокатаного листа вместо горячекатаного и полностью отказаться от шлифования рабочих поверхностей дисков.

Типовой технологический процесс изготовления фрикционных дисков с использованием динамической стабилизации представлен в таблице 4, в которой приведено сравнение типового процесса с существующим на БелАЗе [2].

Таблица 4

Сравнение технологических процессов изготовления фрикционных дисков на БелАЗ

Существующая технология БелАЗ		Новая технология с применением динамической стабилизации	
Операции	Толщина диска, мм	Операции	Толщина диска, мм
Кислородно-плазменная вырезка заготовки	5	Кислородно-плазменная вырезка заготовки	4
Ручная правка	5	Динамическая стабилизация	4
Закалка при нагреве 800...820 °С в пакете по 25 шт. Выдержка 45...60 мин	5	Закалка при нагреве 820 °С Выдержка 30...45 мин	4
Моечная машина 70 °С, время 20...25 мин			
Отпуск при 550 °С по 1 шт. в прессе Выдержка в прессе 15 мин Отпуск при 520...540 °С в пакете по 25 шт. Выдержка в пакете 2...2,5 ч; твердость 26...32	5	Отпуск при 450 °С Выдержка в пакете 2...3 ч	4
		Динамическая стабилизация	4
Предварительное шлифование торцов, припуск 0,75 мм	3,5	Предварительное шлифование торцов, припуск 0,3 мм	3,4
Токарная обработка	3,5	Токарная обработка	3,4
Зубодолбежная, наружный и внутренний зуб	3,5	Зубодолбежная, наружный и внутренний зуб	3,4
Отпуск 620...660 °С Выдержка 1,5...2 ч; охлаждение пакетом	3,5	Термофиксация 450...460 °С Выдержка 4...4,5 часа; охлаждение пакетом	3,4
		Динамическая стабилизация	3,4
Окончательное шлифование торцов, припуск 0,25 мм	3,0	Окончательное шлифование торцов, припуск 0,2 мм	3,0
Термофиксация при 450...460 °С Выдержка 1,5...2 ч; охлаждение пакетом	3,0	Динамическая стабилизация	3,0

В настоящее время проведено опробование эффективности операции динамической стабилизации на окончательно изготовленных дисках на опытно-промышленной установке для динамической стабилизации на БелАЗе (рис. 2).

В результате проведенных испытаний установлено:

- для окончательно изготовленных фрикционных дисков 7555В-3502595 и 7555В-3502554 при исходном отклонении от плоскостности в пределах 0,30...1,25 мм достигается отклонение от плоскостности 0,20...0,35 мм;

- для определения оптимальных режимов динамической стабилизации на всех намеченных операциях и для различных типоразмеров фрикционных дисков проводятся дополнительные исследования с учетом потребностей производства.



Рис. 2. Опытно-промышленная установка для динамической стабилизации фрикционных дисков

**Заключение.** Применение нового технологического процесса изготовления фрикционных дисков позволяет достичь требуемой величины их отклонения от плоскостности, снизить припуски под черновое и чистовое шлифование и обеспечить повышение ресурса многодисковых маслоохлаждаемых тормозов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонюк, В.Е. Влияние динамической стабилизации фрикционных дисков на их работоспособность / В.Е. Антонюк // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 1. – С. 84 – 89.
2. Антонюк, В.Е. Технологическая классификация принципов динамической стабилизации параметров деталей / В.Е. Антонюк, Э.М. Дечко, В.В. Рудый // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2007. – № 12. – С. 12 – 18.

Поступила 15.12.2009

#### THE RESEARCH OF ACCURACY AND WORKING CAPACITY OF DUMP TRUCKS' BRAKE DISCS

V. RUDY, V. ANTONYUK, E. DECHKO

*The operating process of friction discs was under the analyses and the reasons of structural failure were studied. To improve the life time of braking devices we propose to implement dynamic stabilization in the technology process of brake discs' manufacturing. This implementation will provide disk grinding with the increase of accuracy (planeness 0,20...0,35 mm), with the improvement of surface's quality and with the decrease of over dimension.*