

11. Михлин, В. М. Прогнозирование технического состояния машин / В. М. Михлин. – М.: Колос, 1976. – 288 с.

12. Сухарев, Э. А. Теория эксплуатационной надежности машин. Лекционный курс: учеб. пособие / Э. А. Сухарев. – Рівне: Удавг, 1997. – 162 с.

13. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения: ГОСТ 27.301–95. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 1996. – 16 с.

14. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения: ГОСТ 27.00–97. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2005. – 45 с.

Поступила 30.05.08

УДК 621.785.048.7

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И РЕСУРСА РАБОТЫ МНОГОДИСКОВЫХ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ ТРАКТОРА «БЕЛАРУС» ЛАЗЕРНЫМ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕМ БЫСТРОИЗНАШИВАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ

Канд. техн. наук КОБЯКОВ О. С., докт. техн. наук, проф. СПИРИДОНОВ Н. В., инж. БАРКУН А. А.

*Белорусский национальный технический университет,
Минский тракторный завод*

Условия взаимодействия фрикционных механизмов и узлов трения, тормоза трактора «Беларус» модели 1221М, работающих в масляной смазочной среде, характеризуются большим разнообразием одновременно действующих эксплуатационных параметров, включая скоростные режимы относительного скольжения, удельные силовые нагрузки, влияние условий смазки на режимы трения, температурные режимы пар трения.

Одной из проблем является лазерное термоупрочнение внутренних контактных поверхностей корпусных деталей с целью повышения износостойкости и надежности работы тормозных механизмов трактора «Беларус».

Тормозная многодисковая система трактора модели 1221М (рис. 1) отличается повышенной надежностью, долговечностью и отвечает ряду современных требований и международным стандартам качества. Однако, с точки зрения равноресурсности, ряд деталей тормозных механизмов нуждается в повышении ресурса по прочностным и износостойким характеристикам. К числу таких деталей относятся корпусные детали тормоза, в которых повышенному

изнашиванию в процессе эксплуатации подвержены упоры промежуточных дисков тормозных механизмов.

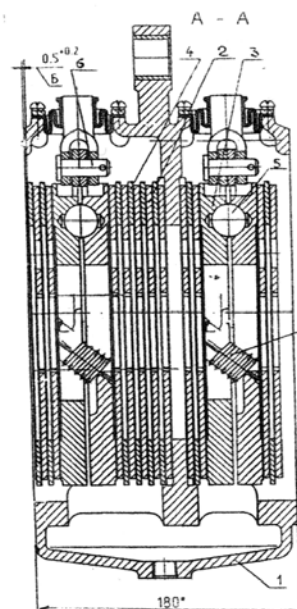


Рис. 1. Сборочный чертеж тормозной системы трактора модели 1221М. Проекция А-А: 1 – корпус тормозной системы; 2 – нажимные диски; 3 – разжимные диски; 4 – промежуточные диски; 5 – шары разжимных дисков; 6 – шарнирный механизм; 7 – возвратные пружины

Исследования и практика показали высокую эффективность новых методов упрочнения с применением высокотемпературных источников нагрева и прежде всего лазерных методов термоупрочнения металлов [1].

При теоретических расчетах контактных поверхностей принято считать, что контурная площадь касания совпадает с номинальной [2]. Однако на практике даже при идеальной механической обработке дисков такого совпадения не происходит. По нашим оценкам, контурная площадь касания, например, ведущего (вращающегося) диска не превышает 60–70 % от номинальной поверхности. В силу этих причин, а также учитывая, что при работе остановочного тормоза участвует одновременно шесть дисков, в системе возможно возникновение автоколебательного режима взаимодействия, приводящего к смещению промежуточных дисков в осевом направлении. Это способствует взаимному трению торцов дисков о поверхность корпусных упоров. Основным условием эффективного торможения является соблюдение режима, при котором момент сил трения, возникающий в результате взаимодействия системы дисковых элементов под действием сжимающих усилий, должен быть больше крутящего момента на валу тормозной системы [3]. При этом должно соблюдаться условие

$$M_{тр} = K_{сц} M_{тм}, \quad (1)$$

где $K_{сц}$ – коэффициент запаса сцепления; $M_{тм}$ – тормозной момент.

Коэффициент запаса сцепления обычно задается из условий работы тормоза и применительно к тракторной технике и в зависимости от конструкции трансмиссии выбирается в пределах от 2,0 до 4,5.

При анализе многодисковых тормозных механизмов модели 1221М наибольший практический интерес представляет изучение динамики процессов взаимодействия и изнашивания металла под действием силовых нагрузок, возникающих в процессе торможения.

Для большей наглядности на рис. 2 представлена физическая модель контактно-силового взаимодействия механизмов тормозной системы, а также взаимодействия промежуточных дисков с поверхностью упоров корпуса. Как видно из рис. 2, на поверхности упоров 5

действуют одновременно несколько сил. Это нормальная составляющая силы P_n и сила, возникающая за счет осевого смещения дисков, P_o , действующая на длине l упоров. В результате одновременного воздействия нормальной и осевой сил возникает результирующая тангенциальная сила P_t . Воздействие нормальной силы способствует процессам сжатия, а тангенциальная сила – сдвиговым напряжениям в металле. Продолжительное воздействие силовых нагрузок приводит в конечном итоге к накоплению дефектов структуры, формированию микротрещин и изнашиванию металла.

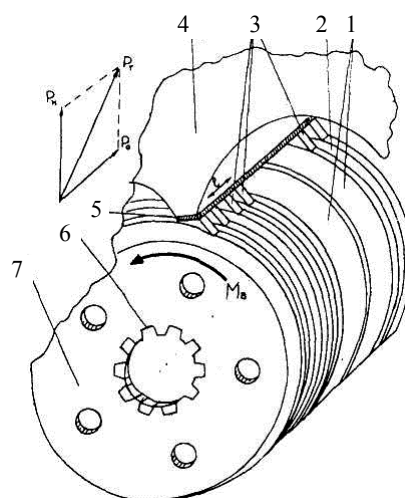


Рис. 2. Физическая модель контактно-силового взаимодействия промежуточных дисков с упорами корпуса: 1 – нажимные диски; 2 – промежуточные (вращающиеся) диски; 3 – промежуточные неподвижные диски; 4 – фрагмент корпуса; 5 – поверхность упоров корпуса; 6 – диск со шлицевыми пазами; 7 – то же ведущий (вращающийся); M_b – крутящий момент на валу тормоза; P_n – нормальная сила; P_o – осевая сила; P_t – результирующая сила

Анализ поверхности чугунов с шаровидным графитом в процессе изнашивания показывает, что разрушение металла при циклических нагрузках резко отличается от разрушения при статических и ударных нагрузках [4]. Для большинства чугунов с шаровидными включениями графита (в том числе и для чугуна ВЧ-50) характерна четко выраженная декогезия разрушения глобулей графита и матричного металла в процессе изнашивания. Нами установлено, что на процесс разрушения влияют прежде всего размер и форма включений графита, фазовый состав легирующих примесей и среднее расстояние между отдельными вклю-

чениями. Так, увеличение размера глобулей от 30 до 90 мкм способствует снижению предела выносливости чугуна с $\sigma_{-1} = 350$ МПа до $\sigma_{-1} = 230$ МПа, а содержание марганца в чугунах ферритно-перлитного класса с содержанием перлита до 50 % вызывает повышенную хрупкость и разрушение металла. Для более пластичных марок высокопрочного чугуна (ВЧ-35, ВЧ-40 ГОСТ 7293–85) рекомендовано содержание марганца в пределах 0,2–0,5 % вес., а для более прочных чугунов (ВЧ-50, ВЧ-60, ВЧ-80) содержание марганца не должно превышать 0,4–0,7 % вес. Содержание других примесей в чугуне, например кремния, находится в пределах 0,8–3,8 % вес.

Нами установлено, что графитовые глобулы служат концентраторами напряжений в металле и являются первопричиной его разрушения. Усталостное разрушение во всех случаях сопровождается формированием напряжений вокруг включений графита, возникновением микротрещин с последующим разрушением и выкрашиванием матричной основы.

При выбранном передаточном отношении угловых скоростей (ω_0^* и ω_0) оси тормоза к полуоси заднего моста $i = \omega_0^*/\omega_0 = 6,9$ обеспечивается торможение снаряженного трактора с полной массой 7,3 т в течение 4 с до полной остановки [5]. При этом, как показали испытания на инерционном тормозном стенде испытательного цеха ПО «МТЗ», при торможении на оси вала тормоза возникает крутящий момент, равный 175 кг·м, или 1750 Н·м, тогда момент сил, действующий на каждый диск, составит в среднем 292 Н·м. Следовательно, при торможении упоры корпуса испытывают весьма значительные силовые нагрузки, приводящие к ускоренному изнашиванию металла.

С целью анализа влияния ударно-силовых нагрузок на упоры корпусных деталей нами проведены исследования поверхности чугунных образцов из ВЧ-50, полученных методом скола при ударных нагрузках. Изучение структуры поверхности скола осуществлялось металлографическим методом анализа с использованием оптической микроскопии. Был использован универсальный прибор марки Neophot 21 (Германия). Как показал анализ микроструктуры поверхностей, разрушение чу-

гуна при ударных и скалывающих нагрузках резко отличается от поверхностей разрушения при статических нагрузках [6, 7].

Структура поверхности и характерные признаки разрушения указывают на то, что разрушение происходит по наиболее ослабленному участку раздела в основном в местах наиболее плотного скопления графитовых включений. С целью оценки влияния контактно-силовых нагрузок на металл нами разработана методика оценки необходимых прочностных и износостойких свойств упрочненного металла.

Крутящий момент $M_{\text{дис}}$, возникающий на тормозном диске, определяется по формуле

$$M_{\text{дис}} = \frac{M_{\text{торм}}}{n}, \quad (2)$$

где $M_{\text{торм}}$ – общий тормозной момент на валу; n – количество упорных тормозных дисков.

Усилие прижима буртика тормозного диска к упору корпуса (рис. 3) определим по формуле

$$M_{\text{торм}} = FL, \quad (3)$$

где F – сила прижима диска к упору; L – плечо приложения силы F .

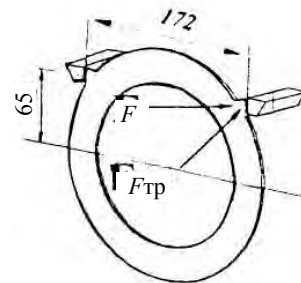


Рис. 3. Силы, действующие на промежуточный диск и упоры при торможении

Тогда усилие, действующее на упор, будет определяться следующим образом:

$$F = \frac{M_{\text{торм}}}{nL}. \quad (4)$$

Сила трения буртика диска по упору корпуса

$$F_{\text{тр}} = Ff, \quad (5)$$

где f – коэффициент трения, $f = 0,15–0,20$ (сталь по чугуну) в условиях сухого трения.

Учитывая большие удельные давления и значительно меньшую фактическую площадь

контакта, можно считать, что будет наблюдаться режим полусухого трения. Тогда в расчетах коэффициент трения принимаем $f = 0,15$.

Определяем контактные напряжения смятия (рис. 4) материала упора тормоза

$$\sigma_{см} = \frac{F}{A}, \quad (6)$$

где $\sigma_{см}$ – напряжение смятия под действием нормальной силы F ; A – площадь смятия.

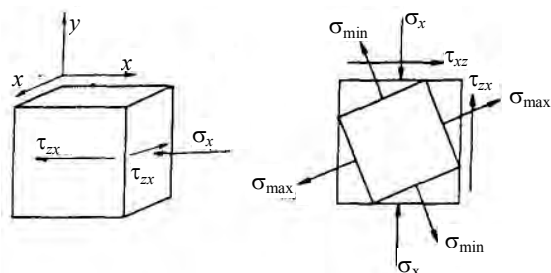


Рис. 4. Схема: а – касательных; б – упругих напряжений, возникающих в металле под действием силовых нагрузок

Тогда касательные напряжения можно найти по формуле

$$\tau = \frac{F_{тр}}{A}. \quad (7)$$

Главные возникающие напряжения будут определяться по выражению

$$\sigma = \frac{\max \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2}. \quad (8)$$

В результате проведенных численных расчетов были получены следующие значения контактно-силовых нагрузок: тормозной момент, действующий на один диск, – 292 Н·м; усилие на упоре промежуточного диска – $4,5 \cdot 10^2$ Н; контактное напряжение в материале упора – 150 МПа; касательная сила трения – 67,5 Н; касательное напряжение – 22,5 МПа; касательные и упругие напряжения по осям x, y – $\sigma_x = -150$ МПа; $\sigma_y = 0$; максимальные и минимальные значения касательных напряжений – $\sigma_{max} = 3,3$ МПа; $\sigma_{min} = -153$ МПа.

Из полученных численных данных видно, что работа тормозных механизмов протекает в условиях значительных контактно-силовых нагрузок.

Для анализа значений необходимой твердости металла при заданных максимальных зна-

чениях глубины изнашиваемой поверхности оценим величину необходимой средней твердости упрочненного слоя. Определим усредненную твердость материала на глубину износа по формуле

$$T_{cp} = \frac{A_1 T_1 + A_2 T_2 + A_3 T_3 + A_4 T_4}{\sum A_i}, \quad (9)$$

где A_1, A_2, A_3 и т. д. – площади поперечного сечения зоны упрочнения ($мм^2$) с соответствующими значениями твердости T_1, T_2, T_3, T_4 и т. д.

Площади A_i определим графически с использованием разработанной компьютерной программы Solid Works. Тогда для A_i получим:

$$A_1 = 0,26 \text{ мм}^2; A_2 = 0,92 \text{ мм}^2; A_3 = 1,01 \text{ мм}^2; \\ A_4 = 0,21 \text{ мм}^2; \sum A_i = 2,4 \text{ мм}^2.$$

Соответственно для значений микротвердости получим:

$$T_1 = 1200 \text{ МПа}; T_2 = 9800 \text{ МПа}; \\ T_3 = 5700 \text{ МПа}; T_4 = 2400 \text{ МПа}.$$

Подставив полученные значения в формулу (9), вычислим среднюю твердость металла зоны лазерного термоупрочнения.

При заданных максимальных значениях глубины изнашивания поверхности в пределах $h = 2$ мм необходимая средняя твердость металла должна составлять

$$T_{cp} = \frac{0,26 \cdot 1200 + 0,92 \cdot 9800 + 1,01 \cdot 5700 + 0,21 \cdot 2400}{2,4} = \\ = 7665,4 \text{ МПа}. \quad (10)$$

Следовательно, при данных значениях твердости должны обеспечиваться максимальная долговечность и износостойкость упрочненного металла.

Нами было использовано лазерное термоупрочнение с проплавлением поверхностного слоя CO_2 -лазером непрерывного излучения «Комета-2» выходной мощностью 1,5 кВт с длиной волны излучения 10,2 мкм.

Лазерное термоупрочнение чугунов прежде всего связано с получением структур, соответствующих «отбеленному» чугуну. Формирование износостойких структур происходит в условиях проплавления поверхности металла при

достаточно высоких (не менее 10^2 °C/с) скоростях нагрева и охлаждения (до 10^3 °C/с), способствующих фазовым и структурным превращениям в металле [8].

В условиях высокоскоростного и высокотемпературного нагрева и охлаждения основными образующими структуры являются мартенсит и аустенит, характеризующиеся высокой степенью метастабильности. Присутствие в чугунах метастабильного аустенита позволяет получать высокую эксплуатационную стойкость деталей машин вследствие превращения метастабильного аустенита в мартенсит [9, 10].

Исследования структуры металла осуществлялись с использованием металлографического анализа шлифов на микроскопах Mef-3 фирмы Reichert (Австрия). Измерение микротвердости зон упрочнения проводились с помощью микротвердомеров ПМТ-3, а также Micromet-II при нагрузке 200 г и времени экспозиции 10 с по ГОСТ 9450–76. Измерение линейных размеров зон упрочнения осуществлялось на бинокулярном микроскопе МБС-9, снабженном микрометрической оптической линейкой с ценой деления 0,01 мм. Анализ зон термоупрочнения, полученных закалкой из жидкой фазы путем оплавления металла, показывает, что в данном случае формируются две зоны (рис. 5) в виде зоны оплавления (1) и зоны закалки из твердой фазы (2), т. е. зоны термического влияния [10]. Причем сформировавшиеся зоны не имеют четко выраженных границ, что характерно для большинства термоупрочненных лазером чугунов [11, 12].



Рис. 5. Микроструктура зон термоупрочнения после лазерной закалки чугуна ВЧ-50, $\times 75$: А – зона лазерного оплавления; Б – то же термического влияния; В – структура исходного металла

Особенностью микроструктуры является наличие сферического графита в матричной ме-

таллической основе, который во многом определяет структурные и прочностные свойства металла в результате лазерного термоупрочнения [13, 14]. В связи с этим микротвердость, например, аустенитных и аустенитно-мартенситных структур составляет 6400–6770 МПа, а цементитная и ледебуритная фазы – 10000–12000 МПа.

На режимах, близких к оптимальным [15], при скорости пятна нагрева от 250 до 450 мм/мин, средних значениях мощности 1,0–1,1 кВт и пятне нагрева $d \approx 3$ мм нами были получены значения микротвердости для зоны оплавления в пределах 9500–10000 МПа. Микротвердость металла в области термического влияния, полученной закалкой из твердой фазы, составляла 5700–5800 МПа, а в области исходного металла – 2400–2450 МПа. Глубина упрочненного слоя для зоны оплавления находилась в пределах 0,8–1,2 мм, а зона термического влияния – 0,4–0,5 мм.

Стендовые испытания корпусных деталей в испытательном цехе РУП ПО «МТЗ» после 2000 циклов испытаний показали полное отсутствие признаков износа упоров корпуса тормозной системы.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальными и расчетными методами установлено, что работа тормозных механизмов осуществляется в условиях значительных контактно-силовых нагрузок, приводящих к повышенному изнашиванию упоров корпусных деталей.

2. Использование лазерной технологии термоупрочнения позволяет многократно увеличить прочностные, износостойкие свойства металла, повысить надежность и ресурс работы тормозных механизмов трактора «Беларус».

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов. – Минск: Вышэйш. шк., 1988. – 155 с.
2. Тепловой расчет многодискового маслоохлаждаемого тормоза / В. А. Балакин [и др.] // Трение и износ. – 2004. – № 6. – С. 585–592.
3. Фрикционные композиты на основе полимеров // А. К. Погосян [и др.]. – Минск: Информтрибо, 1992. – С. 39–53.

4. Красовский, А. Я. Прочность и трещиностойкость чугунов с шаровидным графитом / А. Я. Красовский, В. В. Клайда. – Киев: Наукова думка, 1989. – 136 с.

5. Балакин, В. А. Сравнительный анализ тормозов трактора «Беларус-1222» / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко, В. П. Чаус // Трение и износ. – 2006. – № 6. – С. 643–648.

6. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов: в 3 т. / С. И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1960. – Т. 2. – 416 с.

7. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 240.

8. Райнке, Ф. Х. Структура и свойства чугуна после отбеливания поверхностным переплавом / Ф. Х. Райнке // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 5.

9. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов // Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

10. Григорьянц, А. Г. Лазерная техника и технология / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – С. 92–96.

11. Кобяков, О. С. Технологические особенности лазерного термоупрочнения внутренних плоских поверхностей деталей машин лучом лазера / О. С. Кобяков,

Н. В. Спиридонов, А. М. Каленик // Теория и практика машиностроения. – Минск: УП «Технопринт», 2005. – № 2. – С. 10–13.

12. Крапошин, В. С. Влияние лазерного нагрева на количество остаточного аустенита в сталях и чугунах / В. С. Крапошин, К. П. Шахлевич, М. Г. Вяземский // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 10. – С. 21–23.

13. Андриахин, В. М. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью технологических CO₂-лазеров непрерывного действия / В. М. Андриахин, В. С. Майоров, В. П. Якунин // Поверхность. Физика. Химия. Механика. – 1982. – № 6.

14. Корнеев, В. В. О некоторых зависимостях термообработки лазером / В. В. Корнеев, Ф. К. Косырев, С. Ф. Морящев // Физика и химия обработки материалов. – 1980. – № 36. – С. 32–33.

15. Оптимизация режимов лазерного термоупрочнения железоуглеродистых сплавов на примере закалки высокопрочного чугуна ВЧ-50 / Н. В. Спиридонов [и др.] // Теория и практика машиностроения. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – № 2. – С. 59–63.

Поступила 21.11.2007

УДК 621.793

ПОЛУЧЕНИЕ СЛОИСТЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА АЛМАЗНЫХ ПОРОШКАХ В ПЛАНАРНОМ МАГНЕТРОНЕ

*Докт. техн. наук, проф. КОВАЛЕВСКИЙ В. Н., ФОМИХИНА И. В.,
КОВАЛЕВСКАЯ А. В., ГРИГОРЬЕВ С. В., ЖУК А. Е.*

Белорусский национальный технический университет

Получение композита пропиткой кристаллов алмаза жидким кремнием обеспечивает создание сверхтвердого материала с высокими свойствами [1, 2]. Однако его использование для изготовления формующего инструмента невозможно из-за недостаточной вязкости разрушения. Предлагается решение проблемы путем создания наноструктурной переходной зоны между компонентами композита. С этой целью осуществляли покрытие алмазных частиц с послойным его наноструктурированием путем магнетронного распыления катодов кремний – графит, алюминий и чередованием процессов нанесения слоев с обработкой их плазмой

тлеющего разряда [3]. Использование комбинированной технологии, сочетающей нанесение тонкопленочных слоистых покрытий на частицы алмаза и формирование из них пористого полуфабриката с пропиткой жидким кремнием, приводит к образованию структуры композита «алмаз – карбид кремния» с наноструктурным слоем в зоне перехода алмаза в SiC, что обеспечивает условия повышения вязкости разрушения материала. Отсутствие достаточного количества экспериментальных данных по распылению комбинированных катодов и условий послойного формирования наноструктуры в покрытии и его роли в структурообразовании