УДК 620.178.3

[1]Ф.И. Пантелеенко, [2]И.Н. Степанкин

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

[1]Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь
[2]Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О.Сухого»
г. Гомель, Беларусь

Обсуждены подходы к исследованию контактной усталости материалов. Предложена методика для построения кривых контактного износа. Спроектировано и изготовлено оборудование для проведения исследований. Показана эффективность результатов исследований для оценки эксплуатационных характеристик штамповых сталей.

Discussed approaches to the study of contact fatigue of materials. A method for constructing a contact wear curves. Designed and manufactured equipment for research. The effectiveness of the results of research to evaluate the performance of die steels.

Введение

Современные подходы к исследованию процесса контактного изнашивания опосредованы ресурсным проектированием режимов упрочнения деталей с прецизионными рабочими поверхностями. К ним можно отнести подшипники качения, зубчатые передачи, элементы топливной аппаратуры современных дизельных двигателей и др. Методика оценки предела контактной выносливости основана на пульсирующем нагружении испытуемой поверхности за счет качения по ней тел вращения [1–3]. Испытания проводятся до возникновения повреждений в виде питтингов суммарная доля которых, в момент остановки испытаний, как правило, должна достигнуть 50% от площади контакта [4]. Перечисленные детали в процессе эксплуатации нуждаются в сохранении точного профиля своей рабочей поверхности. В противном случае, изменение условий сопряжения деталей ответственных узлов приведет к существенным изменениям параметров всей машины.

Для повышения предела контактной выносливости широко используются методы поверхностного упрочнения контактной поверхности за счет её химико-термической обработки [5, 6]. При этом, задекларированные выше подходы к оценке предельного ресурса наработки детали не изменяются, несмотря на то, что по сечению детали создается градиент свойств. В тоже время механизм накопления структурных изменений в упрочненном слое, а также характер его

взаимодействия с более пластичной сердцевиной, по мере износа поверхности, представляет определенный интерес для деталей, эксплуатация которых в течение срока службы, подвергается контролируемому изнашиванию. Такие условия работы характерны для инструментальной оснастки, применяемой при холодной штамповке [7]. Испытание материалов с градиентом свойств по сечению традиционными методами [1–3] не позволит выявить период контролируемого износа материала, в течение которого низкая интенсивность изнашивания будет обеспечивать удовлетворительную работоспособность штампа. Для построения зависимостей отражающих кинетику контактного износа поверхностных слоев материалов разработана оригинальная методика и оборудование для её реализации [8].

Объекты и методики исследований

В работе изложены результаты экспериментального исследования контактного изнашивания на установке, обеспечивающей перемещение образца с вращающейся планшайбой. Закрепление образца обеспечивает радиальное расположение его продольной оси во вращающемся узле. Ширина дискового контртела, оттесняемого образцом в процессе кругового движения, позволяет точно рассчитать площадь поверхности контакта с плоской рабочей частью образца, а схема нагружения реализует пульсирующее нагружение по полоске. Сила, которую образец прикладывает к контртелу для его упругого смещения, регулируется пружиной. Её упругая реакция приводит к возникновению на контактной поверхности с размерами $S \times B$ заданного напряжения (рис. 1). Для оценки распределения напряжений по сечению рабочей поверхности образца использовали метод конечных элементов. Исследование структуры поверхностных слоев испытуемых образцов проводили с помощью оптического микроскопа Метам РВ22.

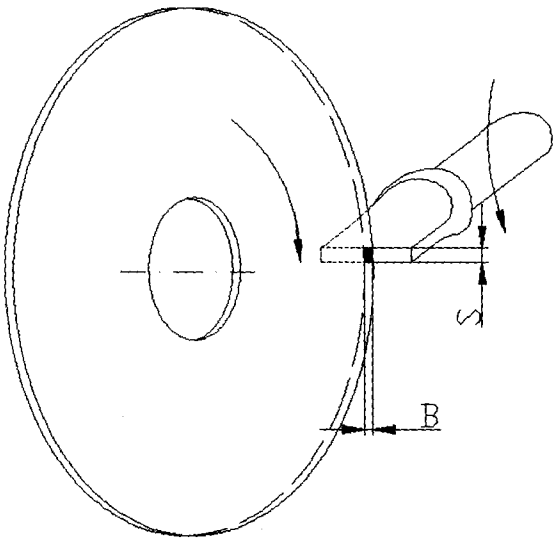

Рис. 1. Схема контактного взаимодействия экспериментального образца с дисковым контртелом

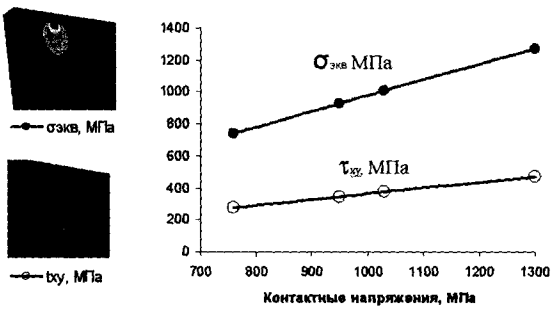

Рис. 2. Влияние величины контактных напряжений на уровень эквивалентных (●), касательных (○) напряжений и характер их распределения по сечению образца

Результаты испытаний и их обсуждение

В качестве исследуемых материалов возможно использование легированных сталей и специальных сплавов, в том числе с поверхностно модифицированными слоями. Численная оценка напряженного состояния в области полоски контакта показала, что в начальный период нагружения локальные зоны концентрации эквивалентных напряжений сосредоточены на боковых ребрах рабочей части образца. Зона концентрации максимальных эквивалентных напряжений распространяется на глубину близкую половине толщины рабочей части образца (рис. 2). В данном эксперименте она составляла 2 мм. Величина максимального эквивалентного напряжения соизмерима с уровнем контактного напряжения создаваемого

контртелом на рабочей поверхности образца. При увеличении контактной нагрузки оно возрастает. Повышаются и касательные напряжения, которые наряду с эквивалентными, учитываются при оценке несущей способности материалов [5, 6]. Зоны локализации максимальных по величине касательных напряжений, располагаются в окрестности границ полоски контакта в подповерхностном слое. Как следует из работ [5, 6, 9], возникновение максимальных касательных напряжений на некоторой глубине от поверхности инициирует микропластические деформации, приводящие к зарождению и распространению трещин контактной усталости. Особенность рассматриваемой схемы нагружения заключается в равномерном распределении внешнего напряжения по полоске контакта. При этом зона концентрации касательных напряжений располагается в окрестности границы полоски контакта. Это отражает качественную картину взаимодействия материала заготовки и рабочей поверхности инструмента на границе их соприкосновения. Эта специфика отличает применяемую схему нагружения от известных устройств, при использовании которых реализуется перекатывание круглых контртел по неподвижной плоской поверхности испытуемого образца [5]. В них максимальные касательные напряжения возникают под центральной зоной полоски контакта, вследствие параболического закона распределения внешней нагрузки по пятну контакта [10]. Подобный подход в меньшей степени моделирует эксплуатацию гравюры штампового инструмента, ориентируя исследователей на узлы качения.

После начального периода испытаний контактная поверхность испытуемых образцов приобретает незначительную кривизну, которая возникает в результате приработки поверхности контртела и полоски контакта. Это изменение практически не влияет на распределение эквивалентных и касательных напряжений по сечению поверхностного слоя материала (рис. 3 *а, б*).

По мере увеличения глубины лунки износа меняется концентрация напряжений в её окрестности. Сохранение величины и распределения напряжений на начальном уровне наблюдается в случае глубины лунки износа до 0,2 мм. Последующее увеличение данного параме-

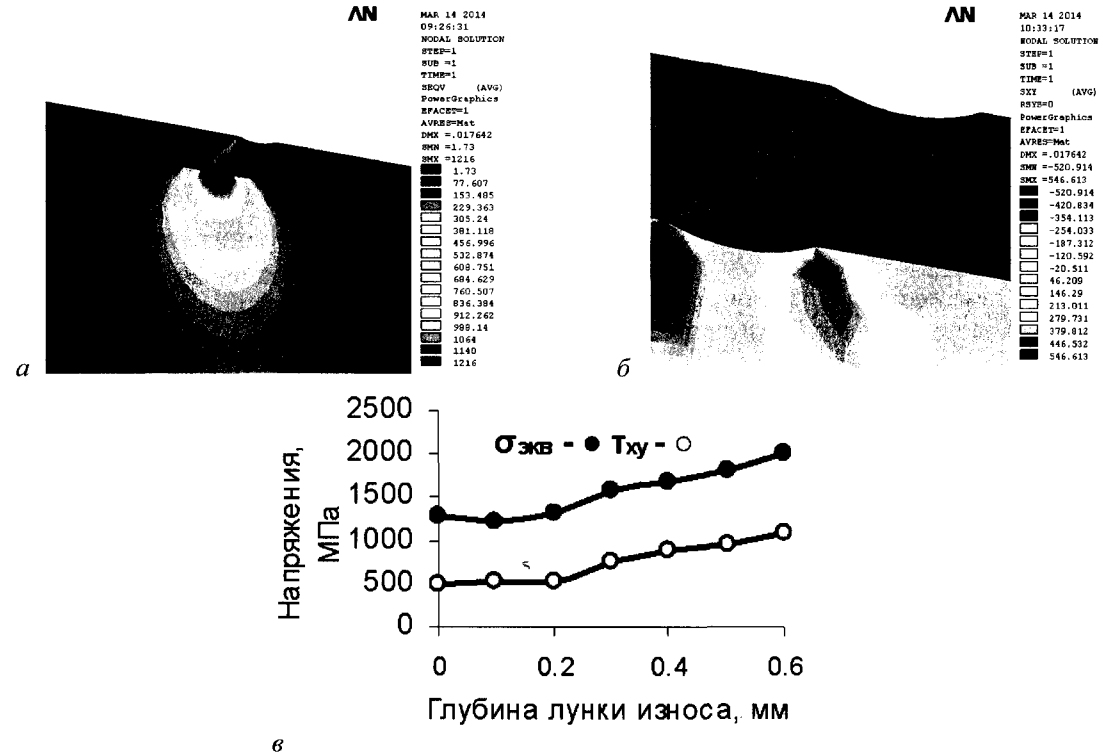

Рис. 3. Распределение эквивалентных (*а*) и касательных (*б*) напряжений после приработки поверхности контртела, а также влияние глубины лунки износа на величину максимальных напряжений в материале поверхностного слоя образца (*в*)

тра сопровождается повышением концентрации напряжений в её окрестности. Эти изменения отражают процесс изнашивания штамповой оснастки в условиях локальной концентрации напряжений на гравюре штампа. Регистрация глубины лунки износа может проводиться, как прямым измерением универсальными глубиномерами, так и с помощью инструментального микроскопа. При этом размещение на одной и той же планшайбе 8-ми или 16-ти образцов, участвующих в испытаниях при одинаковых граничных условиях, позволяет получить достаточный объем экспериментальных данных для его статистической обработки.

Пример результатов исследований приведен на рис. 4. Одновременно с графическими зависимостями, отражающими интенсивность износа стали Х12М при амплитуде контактного напряжения 1280 МПа, боковые поверхности образцов обеспечивают возможность мониторинга структурных изменений в области полоски контакта. В частности можно сравнить износоустойчивость указанного сплава подвергнутого термообработке по различным режимам. Первая партия образцов была закалена с 1140 °С, вторая — 1040°С. Температура отпуска составила 550 °С (трехкратно) и 200 °С (однократно) соответственно, что обеспечило получение твердости 60–61 HRC и 65–66 HRC. Обе партии образцов подвергались криогенной обработке в жидком азоте непосредственно после закалки.

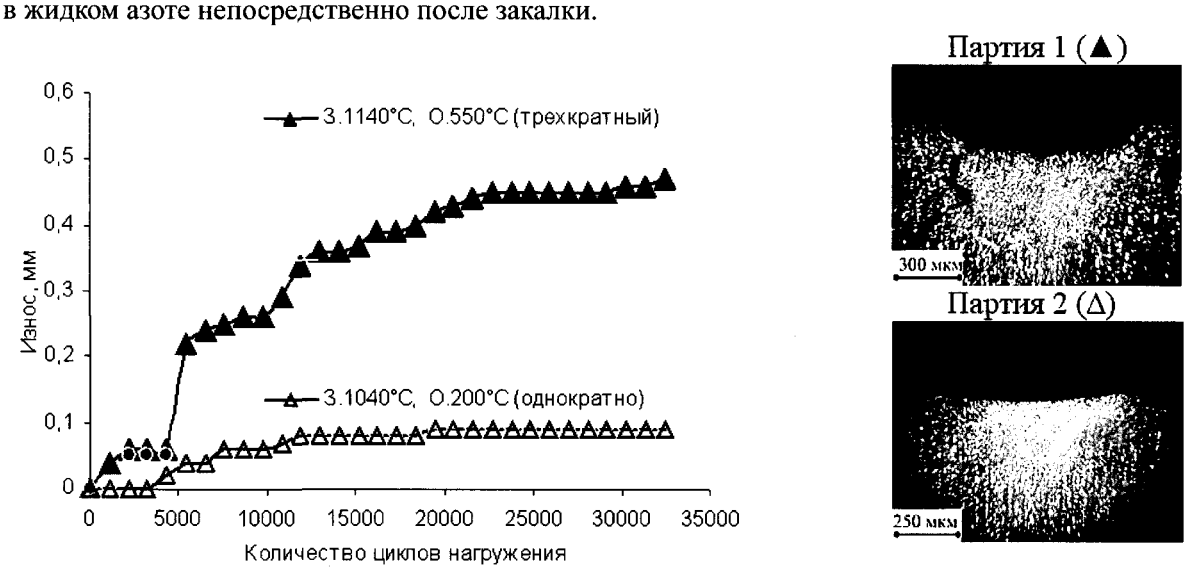

Рис. 4. Кривые износа стали Х12М, полученные в результате испытания при контактном напряжении 1280 МПа и структура поверхностного слоя образцов на этапе испытаний — 9720 циклов

Заключение

Разработанная методика и примененное экспериментальное оборудование позволяют оценивать механизм структурных изменений в поверхностных слоях деталей машин, изнашивание которых обусловлено воздействием пульсирующего контактного напряжения. Сравнительный анализ кривых износа, построенных для материалов, упрочненных различными способами, позволяет сделать вывод о предпочтении определенного режима упрочнения, а также спрогнозировать характер трансформации структуры поверхностного слоя материала.

Список использованных источников

1. Комбалов, В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов. Справочник / В.С. Комбалов; под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко, М.: Машиностроение, 2008. — 384 с.

2. Орлов, А.В. Испытания конструкционных материалов на контактную усталость / А.В.Орлов, О.Н.Черменский, В.М.Нестеров М.: Машиностроение, 1980. — 110 с.

3. Sheng, L. A fatigue model for contacts under mixed elastohydrodynamic lubrication condition / L. Sheng, A. Kahraman // International Journal of Fatigue, 2011. — V.33. — P.427-436.

4. Р 50-54-30-87 Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость.

5. Рыжов, Н.М. Технологическое обеспечение сопротивления контактной усталости цементуемых зубчатых колес из теплостойких сталей / Н.М.Рыжов // Металловедение и термическая обработка металлов, 2010. — №6. — С. 39-45.

6. Семенов, М.Ю. Анализ способов упрочнения зубчатых колес из теплостойких сталей на основе расчетного метода / М.Ю.Семенов, И.Н.Гаврилин, М.Ю.Рыжова // Металловедение и термическая обработка металлов, 2014. — №1. — С. 42-46.

7. Степанкин, И.Н. Стойкость холодновысадочной оснастки и методы её повешения / И.Н.Степанкин, В.М.Кенько. Гомель.: УО «ГГТУ им. П.О.Сухого», 2014. — 197 с.

8.Пат. Республ. Беларусь на полезную модель №8260 МПК (2009) G 01 N 3/00 Устройство испытания материалов на контактную усталость и износ / И.Н.Степанкин, Е.П.Поздняков, В.М.Кенько, И.А.Панкратов, Л.В.Степанкина; заявитель Гомельск. гос. техн. ун-т им.П.О.Сухого. — № u20110940, заявл. 23.11.2011. опубл. // Афіцыйны бюлетэнь / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці, 2012. — № 3. — С. 260.

9. Alfredsson, B. A Study on Contact Fatigue Mechanisms : Doctoral Thesis no. 44, 2000 / Alfredsson Bo. Department of Solid Mechanics Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000. 27 p.

10. Beheshti, Ali On the prediction of fatigue crack initiation in rolling/sliding contacts with provision for loading sequence effect / Ali Beheshti, M.M.Khonsari // Tribology International., 2011. vol. 44. — p. 1620–1628.

Статья поступила в редакцию 05.04.2016 г.