

УДК 621.787: 621.91

М.С. Махалов

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН УПРОЧНЕННЫХ РАЗМЕРНЫМ СОВМЕЩЕННЫМ ОБКАТЫВАНИЕМ

Известно, что упрочняющая обработка методами поверхностного пластического деформирования (ППД) обеспечивает высокое качество поверхностного слоя (ПС) и усталостную долговечность упрочненных деталей.

Способ размерного совмещенного обкатывания (РСО), особенностью которого является оригинальная схема взаимодействия режущего и деформирующего инструментов, представляет собой развитие совмещенных способов ППД. Исследования показали, что РСО позволяет в широком диапазоне регулировать такие параметры качества, как шероховатость поверхности R_a от 0,04 до 0,8 мкм, глубину упрочнения h в пределах от 0,9 до 10 мм, степень упрочнения δ от 17 до 50% и др., при создании благоприятных эпзор сжимающих остаточных напряжений [1].

При исследовании возможностей РСО по обеспечению циклической долговечности упрочненных деталей был использован аппарат механики технологического наследования состояния поверхностного слоя, позволяющий описать в единых терминах и категориях физическую природу поведения металла на стадиях жизненного цикла и привести результаты исследований к форме, удобной для инженерного пользования. В качестве накопленных параметров, наряду с традиционными параметрами качества ПС, используются степень деформации сдвига Λ , степень исчерпания запаса пластичности (СИЗП) Ψ , компоненты тензора остаточных напряжений $[T\sigma_{osc}]$ и др. [1].

Разработанная в рамках выбранного аппарата расчетно-аналитическая модель механического состояния поверхностного слоя упрочненной детали на стадии циклического нагружения после обработки размерным совмещенным обкатыванием позволила оценить закономерности накопления деформаций, исчерпания запаса пластичности и релаксации тензора остаточных напряжений в процессе усталостного нагружения до момента зарождения усталостной трещины [2].

Экспериментальные исследования определения влияния режимов обработки и накопленных при РСО свойств поверхностного слоя на циклическую долговечность проводились по разработанной и представленной в данной работе методике.

В качестве основы при разработке были приняты методики А.В. Журавлева, В.Ю. Блюменштейна и А.А. Кречетова, которые использовались

авторами для проведения усталостных испытаний образцов, обработанных традиционным ППД, а также резанием и ППД в наследственной постановке [1,3-4].

Однако технологические особенности РСО, иная динамика накопления деформации, исчерпания запаса пластичности и релаксации остаточных напряжений при последующем эксплуатационном нагружении ПС, упрочненного РСО, не позволяют использовать методики, представленные в работах [1,3-4].

Схема экспериментальных образцов, изготовленных из *стали 45 (160..180 HV)* ГОСТ 1050-88 одной партии в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502-79, показана на рис. 1. С целью локализации максимальных напряжений и, как следствие, положения точки зарождения усталостной трещины по оси образца, рабочая поверхность выполнялась в виде сочетания цилиндрической части (4) и галтели (3).

Диаметр цилиндрической части выбирался исходя из возможности создания в ней требуемых эксплуатационных напряжений, лежащих в диапазоне многоцикловой усталости ($\sigma_3 = 0,7..0,8\sigma_T$); их величина составила *280 МПа (28 кгс/мм²)* (σ_T - предел текучести стали 45 при растяжении) [5-7].

Образцы изготавливались на токарном станке с ЧПУ мод. 1В340Ф30, а затем на станке ЗМ152В подвергались шлифованию с уменьшающимся припуском для обеспечения требуемых размеров в пределах заданных полей допусков, а также для устранения эффекта упрочнения и шероховатости ПС после токарной обработки.

Рабочая часть усталостных образцов (цилиндрическая поверхность 4, точка сопряжения с галтелью и прилегающая к цилиндрической поверхности часть галтели 3) подвергалась обработке РСО с различными режимами на станке 16К20Ф3, оснащенном современной системой ЧПУ NC-201. На стадии предварительных экспериментальных исследований было установлено, что механическая обработка обеспечивала циклическую долговечность материала в рабочей части большую, чем долговечность необработанного материала захватной части при меньших напряжениях, то есть происходило разрушение образца в захватной части (поверхность 2). В связи с этим захватная часть усталостных образцов (2) и прилегающая к ней часть галтели (3) дополнительно упрочнялись ППД роликовым инструментом при следующих значениях параметров режима: $S = 0,1 \text{ мм/об}$; $n = 125 \text{ об/мин}$; $D_p = 65 \text{ мм}$; $R_{np} = 5 \text{ мм}$; $P = 3000 \text{ Н}$.

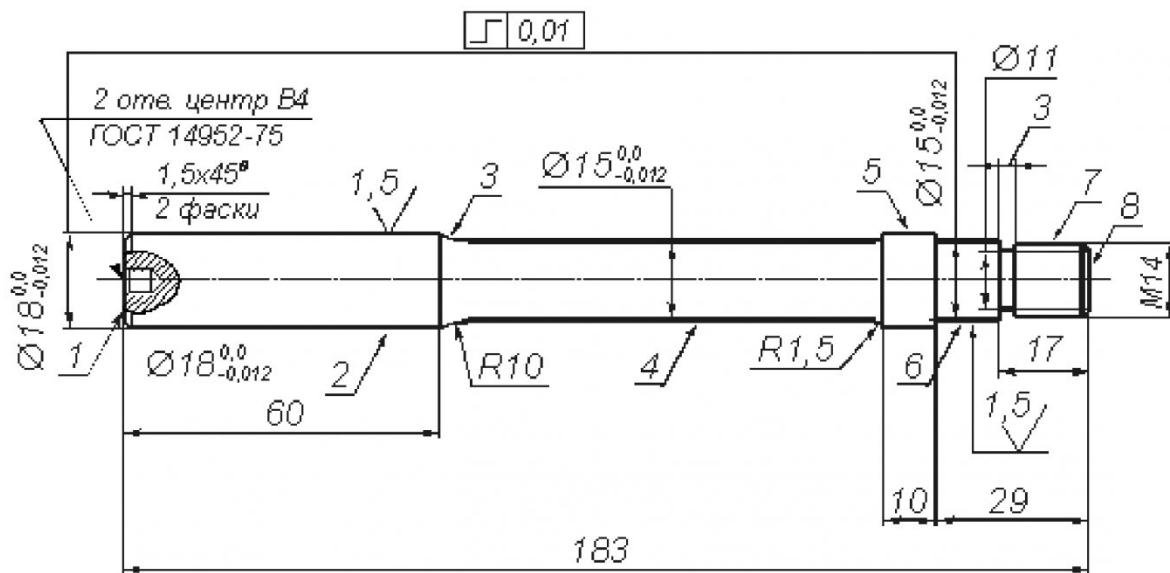


Рис. 1. Образец для усталостных испытаний

Схема нагружения экспериментальных образцов консольным изгибом с вращением приведена на рис. 2. Экспериментальные исследования проводились с постоянными амплитудными значениями напряжений и синусоидальной форме симметричного цикла, при котором максимальное и минимальное напряжения равны по абсолютному значению, но противоположны по знаку («мягкая» схема нагружения). Коэффициент асимметрии цикла составил $R_\sigma = -1$.

Исследования проводились на модернизированной машине для усталостных испытаний **УКИ-10М**, которая позволяла одновременное испытание 2-х экспериментальных образцов с частотой

той вращения **3000** или **6000 об/мин** (рис. 3). Для дальнейшего сопоставления полученных результатов с результатами других исследователей использовалась частота вращения образцов **3000 об/мин**.

Установка образцов осуществлялась в цанго- вые патроны, допускаемое биение нагружающего узла при этом не превышало **0,01-0,015 мм**. Плавное нагружение до требуемых напряжений в рабочем сечении обеспечивалось с помощью нагружающего узла и набора грузов.

Амплитудные значения действующих напряжений в сечении образца определялись как:

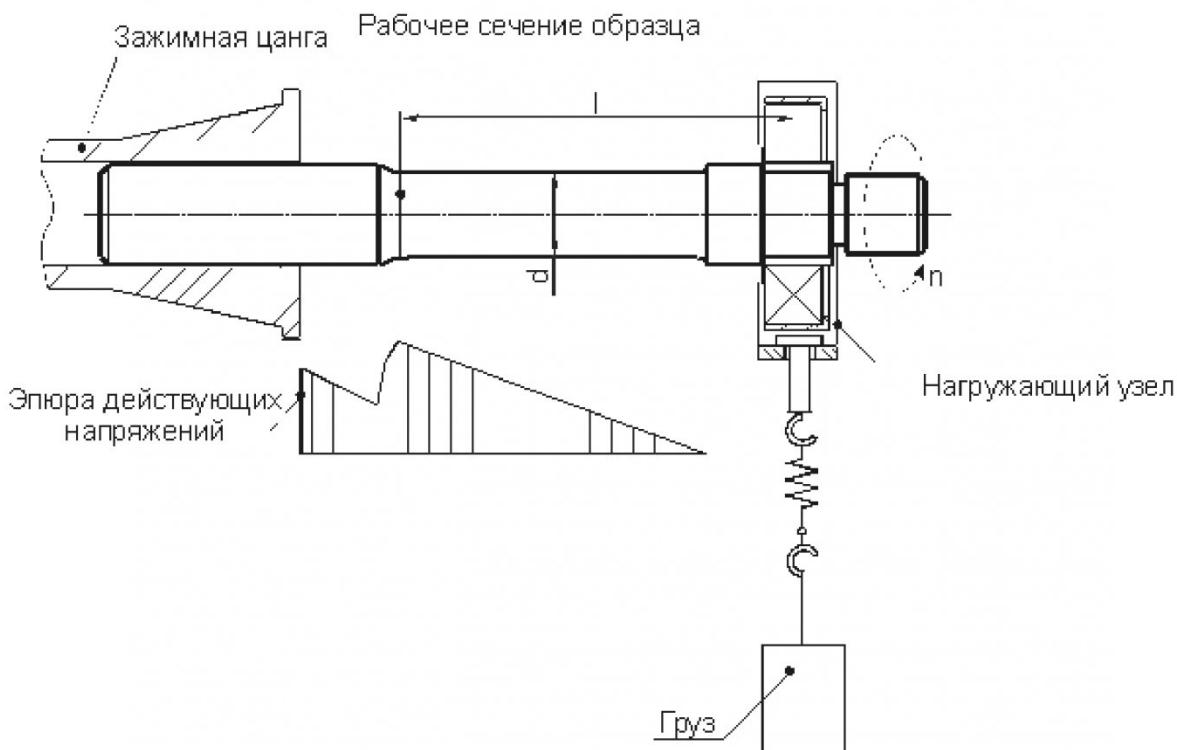


Рис. 2. Схема нагружения экспериментальных образцов

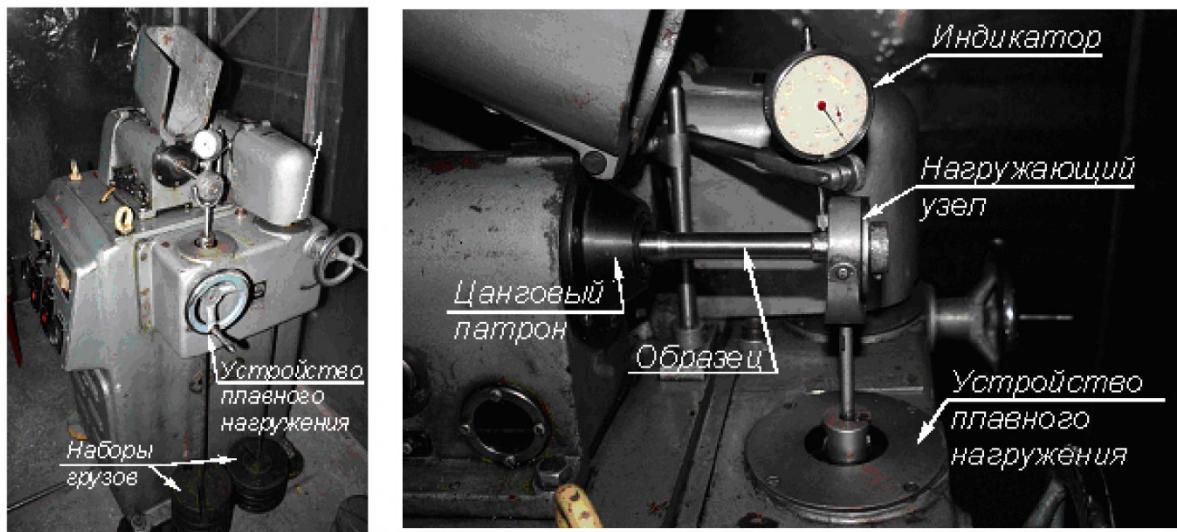


Рис. 3. Внешний вид машины для усталостных испытаний УКИ-10М

$$\sigma_a = \frac{32Pl}{\pi d^3}, \quad (1)$$

где P – сила, приложенная к образцу; l – расстояние между рассматриваемым сечением и точкой приложения силы; d – диаметр рассматриваемого сечения (рис. 2).

Режимы механической обработки выбирались таким образом, чтобы исключить возможность пластического изгиба усталостных образцов и выхода геометрических параметров за пределы технических требований (рис. 1).

Для каждой серии экспериментальных образцов изготавливались образец-свидетель, на котором осуществлялась фиксация очага деформации и измерение исходного распределения твердости по глубине ПС и шероховатости поверхности. По полученным очагам деформации производился расчет действительных параметров режима обработки, а также параметров механического состояния поверхностного слоя [8].

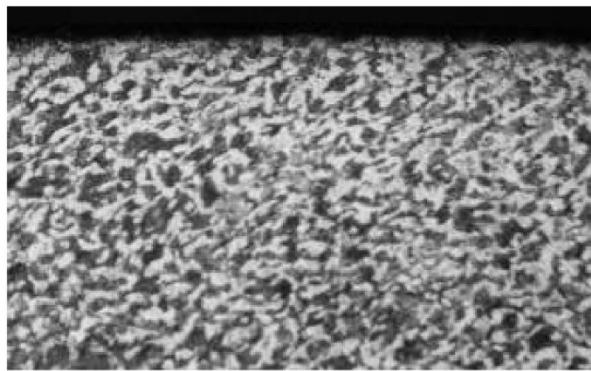
Циклическая долговечность образцов определялась расчетно-экспериментальным путем на

основе изменения микротвердости образцов в процессе циклического нагружения. Образцы каждой серии были разделены на 3 группы. Выделенные группы образцов испытывались на усталостной машине следующим образом: 1-ая группа – до числа циклов $N = 0,5$ млн. циклов; 2-ая группа – до $N = 1,25$ млн. циклов; 3-я группа – до $N = 2,0$ млн. циклов.

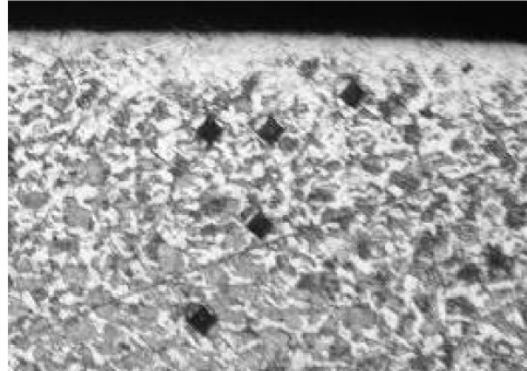
Контроль прогиба и бieniaия образцов осуществлялся с помощью индикатора часового типа

Tesa Instruments 355B с ценой деления 0,002 мм. Индикатор устанавливался в индикаторной стойке машины УКИ-10М, а измерение проводилось на каждом образце до и после его нагружения (рис. 3).

Предварительными экспериментами было зафиксировано также изменение микроструктуры упрочненных образцов: деформированные зерна поверхностного слоя несколько вытянуты в направлении движения индентора при упрочняющей обработке и имеют меньший размер малой оси по сравнению с зернами недеформированной сердцевины (рис. 4).



образец №107



образец №11

Рис. 4. Микроструктура образцов после усталостного нагружения (увеличение $\times 450$)

После усталостного нагружения до заданного числа циклов каждый образец разрезался в опас-

1. Установить взаимосвязь микротвердости поверхностного слоя с количеством циклов уста-

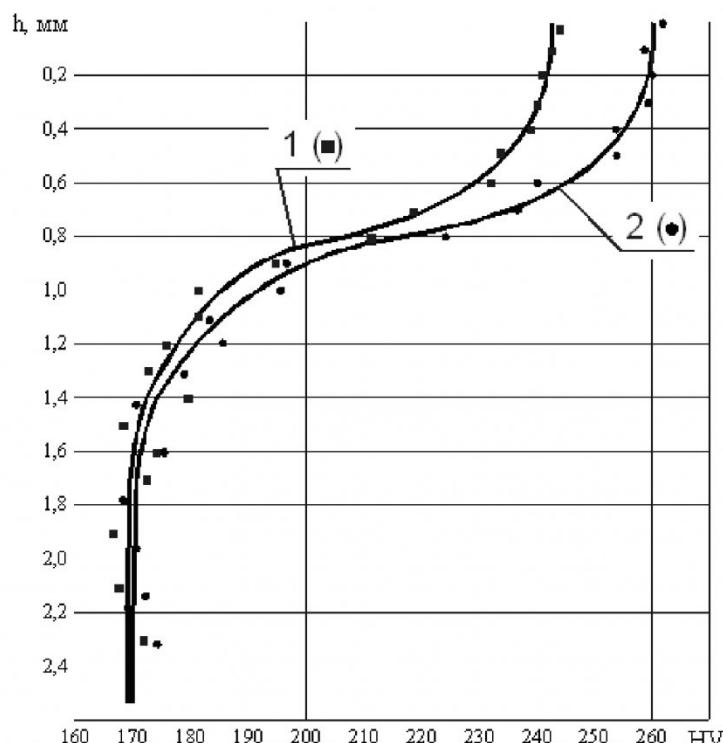


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя (образец №1071): 1) после обработки РСО; 2) после $N = 1,25$ млн. циклов нагружения

ном сечении, а образцы-свидетели дополнительно разрезались в рабочей части ближе к подшипниковому узлу. Полученные срезы позволили изготовить металлографические шлифы, на которых с помощью микротвердомера ПМТ-3 осуществлялось измерение микротвердости по глубине поверхностного слоя с шагом **0,02 мм** и нагрузкой **100 г**, дважды по каждому шлифу - по зернам феррита и перлита. На образцах-свидетелях осуществлялось также измерение исходного распределения микротвердости до усталостного нагружения. По результатам измерений строились графики распределения микротвердости по глубине ПС (рис. 5).

Использование разработанной расчетно-аналитической модели механического состояния поверхностного слоя упрочненной РСО детали на стадии циклического нагружения и результатов экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с вышеизложенной методикой, позволило:

усталостного нагружения и определить циклическую долговечность образцов $N_{ЦД}$, подвергнутых упрочняющей обработке РСО с различными режимами.

2. Рассчитать глубину зарождения усталостной трещины h_{mp} .

3. Оценить продолжающееся на стадии циклического нагружения накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности по распределению микротвердости упрочненного поверхностного слоя детали и рассчитать накопленную на стадии циклической долговечности степень деформации сдвига $\Delta\Lambda_{ЦД}$.

4. Установить взаимосвязь циклической долговечности $N_{ЦД}$ с параметрами режима и значениями Λ и Ψ , накопленными при обработке РСО.

Работа выполнена под руководством д.т.н. проф. Блюменштейна В.Ю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.: ил.
- Блюменштейн В. Ю. Расчетно-аналитическая модель механического состояния поверхностного слоя упрочненной детали на стадии циклического нагружения после обработки размерным совмещен-

ным обкатыванием / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 3. – С. 33-39.

3. Смелянский В. М. К вопросу прогнозирования долговечности деталей машин, упрочненных ППД / В. М. Смелянский, А. В. Журавлев, В. Ю. Блюменштейн // Проблемы повышения качества, надежности и долговечности деталей машин и инструментов : сб. научн. тр. - Брянск, 1991. - С. 70-76.

4. Кречетов А. А. Обеспечение долговечности деталей машин на основе правил технологического наследования /А. А. Кречетов // Материалы всероссийской конф. молодых ученых (5-8 дек. 2000 г.): Сборник / ТНЦ СО РАН. – Томск, 2000. – с. 142-143.

5. Троценко В. Т. Циклические деформации и усталость металлов. В 2 т. Т.1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов / В.Т. Троценко [и др.]; под. ред. В.Т. Троценко. - Киев: Наук. думка, 1985. - 216 с.

6. ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования.

7. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний : справочник / Л. М. Школьник. - М.: Металлургия, 1978. - 304 с.

8. Блюменштейн В. Ю. Очаг деформации при размерном совмещенном обкатывании как основа физических представлений и решения задач механики технологического наследования / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов // Вестн. Кузбасского гос. техн. унив., 2004, № 4. - С. 83-89.

Автор статьи

Махалов
Максим Сергеевич
- канд.техн.наук, доц. каф.
«Технология машиностроения» КузГТУ
Тел. 8-903-907-45-02