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 Ra 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 эпюр 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 $\left[T\sigma_{ост}\right]$ 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 ($\sigma_Э$ = ***0,7..0,8***σ_T); их величина составила ***280 МПа*** (***28 кгс/мм***^{2}) (σ_T - предел текучести стали 45 при растяжении) [5-7].

Образцы изготавливались на токарном станке с ЧПУ мод. 1В340Ф30, а затем на станке 3М152В 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 зажимной части при меньших напряжениях, то есть происходило разрушение образца в зажимной части (поверхность 2). В связи с этим зажимная часть усталостных образцов (2) и прилегающая к ней часть галтели (3) дополнительно упрочнялись ППД роликовым инструментом при следующих значениях параметров режима: ***S = 0,1 мм/об; n = 125 об/мин; $D_р$ = 65 мм; $R_{пр}$ = 5 мм; P = 3000 Н***.

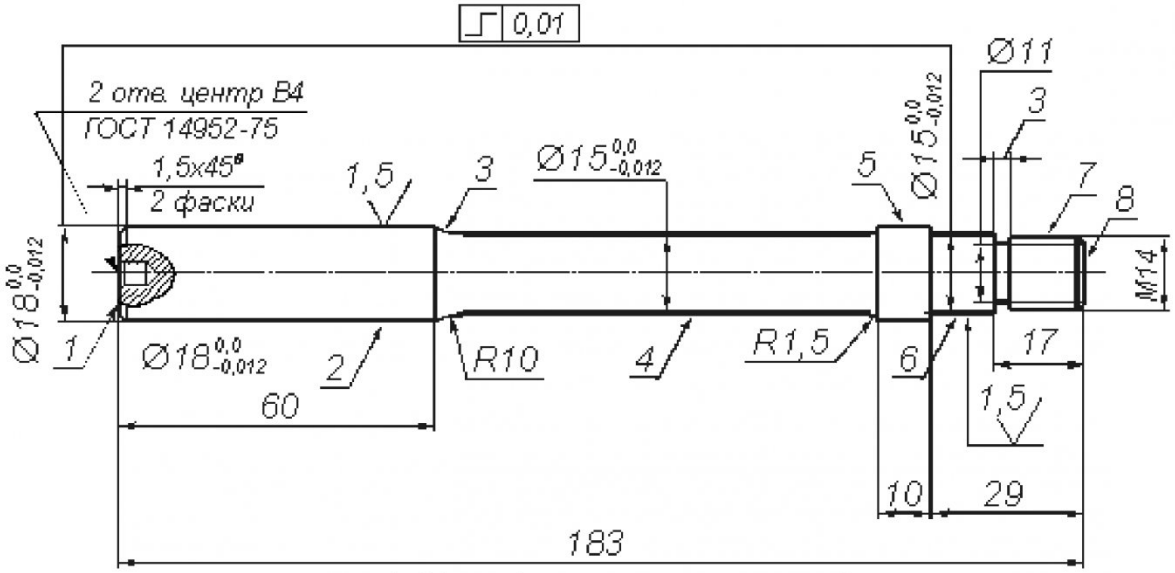


Рис. 1. Образец для усталостных испытаний

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 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 цанговые 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:

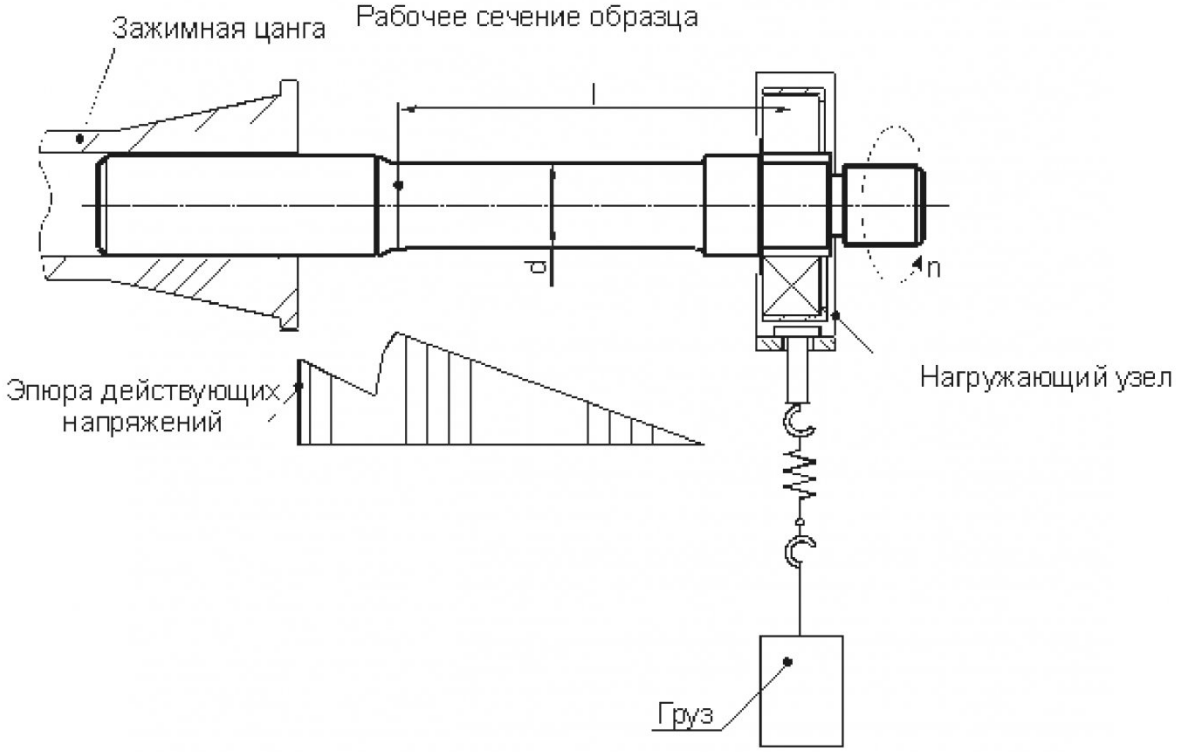


Рис. 2. Схема нагружения экспериментальных образцов

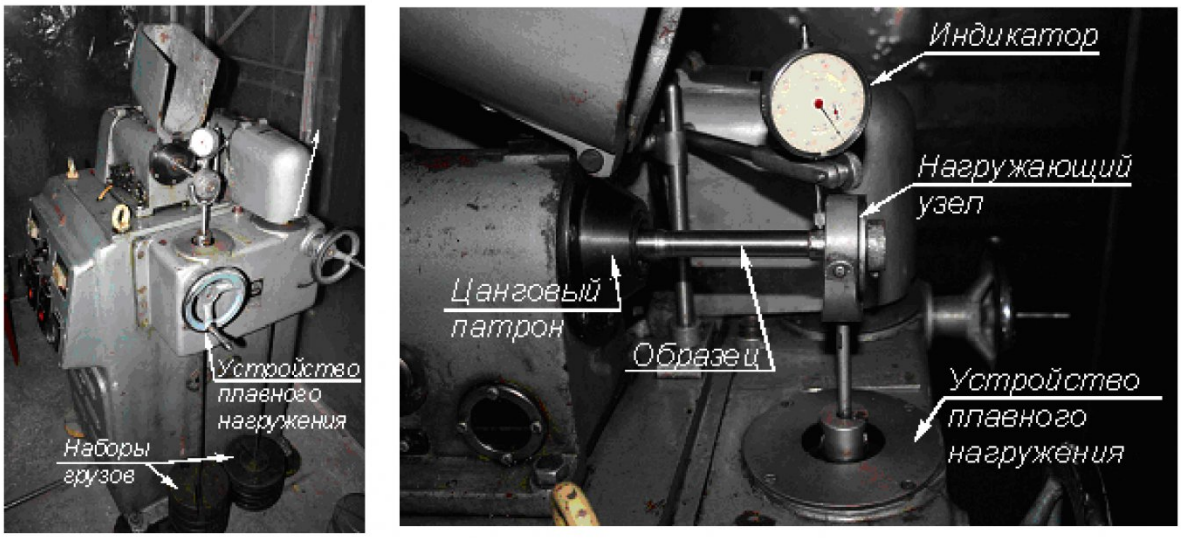


Рис. 3. Внешний вид машины для усталостных испытаний УКИ-10М

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

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

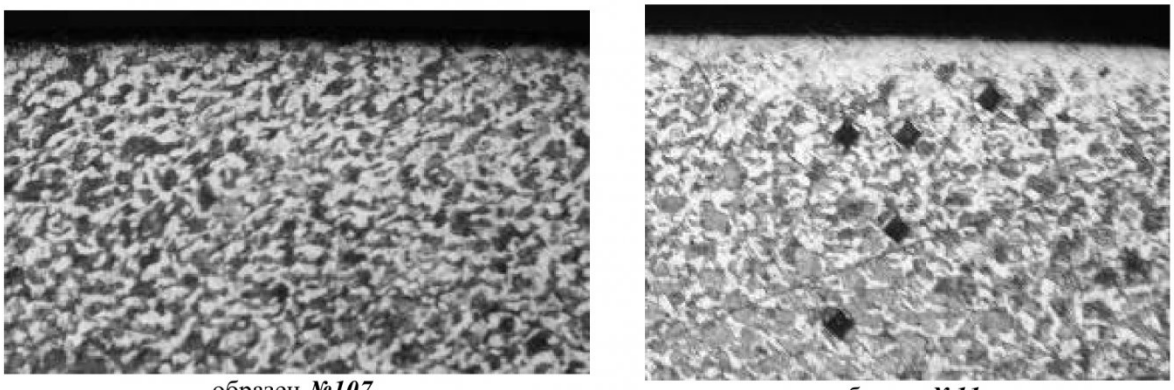
Режимы механической обработки выбирались таким образом, чтобы исключить возможность пластического изгиба усталостных образцов и выхода геометрических параметров за пределы технических требований (рис. 1).

Для каждой серии экспериментальных образцов изготавливался 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 биения 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 упрочнённых 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 ***№107₁*** образец ***№11***

*Рис. 4. Микроструктура образцов после усталостного нагружения (увеличение **x450**)*

После усталостного нагружения до заданного числа циклов каждый образец разрезался в опасном 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).

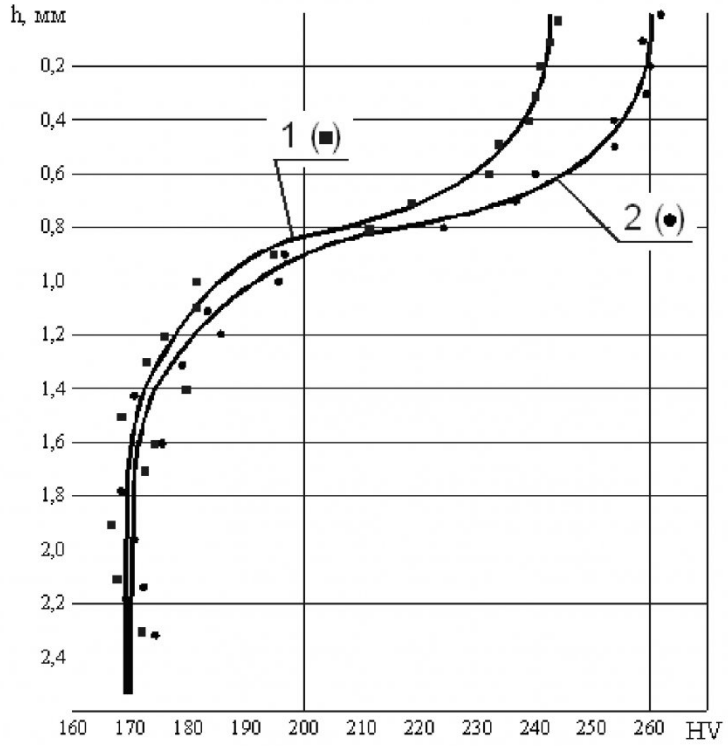


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя (образец ***№107$_1$****): 1) после обработки РСО; 2) после* ***N = 1,25 млн. циклов*** *нагружения*

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:

1. Установить взаимосвязь микротвердости поверхностного слоя с количеством циклов усталостного нагружения и определить циклическую долговечность образцов $N_{ЦД}$, подвергнутых упрочняющей обработке РСО с различными режимами.

2. Рассчитать глубину зарождения усталостной трещины $h_{тр}$.

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 взаимосвязи 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

1. *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.

2. *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. *Трощенко В. Т.* Циклические деформации и усталость металлов. В 2 т. Т.1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов / В.Т. Трощенко [и др.]; под. ред. В.Т. Трощенко. - 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. тех. 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