
ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

УДК 778.55-192

М. А. РЯБИНИН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КИНОАППАРАТУРЫ

Предложен комбинированный метод выглаживания поверхностного слоя деталей индентором с наложением ультразвуковых колебаний и последующим нанесением регулярного микрорельефа вибронакатыванием. Приводятся результаты сравнительных испытаний данного метода и ранее предложенных технологий упрочнения деталей.

Ключевые слова: регулярный микрорельеф, равновесная шероховатость, поверхностно-пластическое деформирование, выглаживание, вибронакатывание.

Качество изделий кинотехники, их эксплуатационные свойства и надежность работы в значительной степени зависят от технологии чистовой отделочной обработки, в процессе которой формируется поверхностный слой деталей. Среди множества отделочных операций, формирующих на поверхности деталей микрорельеф с заданными параметрами оптимальной „равновесной“ шероховатости [1, 2], а также позволяющих существенно снизить время приработки, повысив при этом износостойкость деталей [3], широкое распространение получила обработка поверхностного слоя посредством холодного пластического деформирования [4]. Кроме того, разработаны и внедрены новые способы, позволяющие повысить прочность и срок службы деталей путем нанесения на их поверхность регулярного микрорельефа (РМР) [5].

В настоящей статье предложен комбинированный метод выглаживания поверхностного слоя индентором с наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) и последующим нанесением РМР вибронакатыванием. Приведены результаты экспериментального исследования качества поверхностного слоя, полученного с использованием предложенного метода, а также результаты сравнительных испытаний данного метода и ранее предложенных технологий упрочнения деталей с наложением УЗК.

Опыты проводились на образцах из стали 45, которые в первом случае были отожжены, а во втором — упрочнены закалкой до HRC 45—50.

Таким образом, были проведены четыре серии экспериментов по двум технологиям поверхностно-пластического деформирования (ППД).

1. Пластическое деформирование незакаленной поверхности, обработанной чистовым точением резцом из сплава ВК8 в режимах резания, обеспечивающих приближение к показателям „равновесной“ шероховатости по шагу и высоте [6]. Выглаживание поверхностного слоя проводилось индентором радиусом $R=2$ мм с наложением УЗК амплитудой $A_k=15$ мкм и частотой $f=18,5$ кГц.

2. Пластическое деформирование незакаленной поверхности по технологии, предложенной в п. 1, с последующим формированием РМР типа IV [4] в целях создания дополнительных масляных карманов.

3. Пластическое деформирование закаленной поверхности, полученной в результате чистового точения микрорезцами из Эльбора-Р в режимах резания, обеспечивающих приближение по шагу и высоте микронеровности поверхности к показателям „равновесной“ шероховатости, с последующим выглаживанием поверхностного слоя индентором ($R=2$ мм) с наложением УЗК ($A_k=15$ мкм, $f=18,5$ кГц).

4. Пластическое деформирование закаленной поверхности, обработанной по технологии, приведенной в п. 3, с последующим формированием РМР типа IV.

Для обработки поверхностей деталей киноаппаратуры путем поверхностно-пластического деформирования использовалась установка, состоящая из генератора УЗГ-4 с магнестрикционным преобразователем типа ПМС-15 и специального устройства для создания регулярного микрорельефа (рис. 1, здесь $n_{дв.х}$ — число двойных ходов инструмента, $мин^{-1}$; n_3 — число оборотов заготовки, $мин^{-1}$; λ — осевой шаг неровностей, мм).

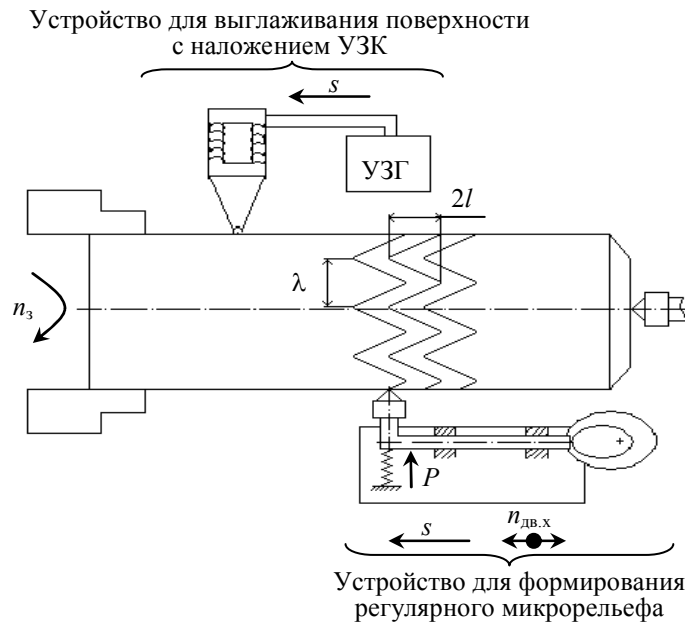


Рис. 1

В качестве усилителя амплитуды использовался концентратор экспоненциальной формы (с коэффициентом усиления $N=3,25$), на конце которого впаян твердосплавный сферический индентор радиусом 2 мм. Общий вид установки приведен на рис. 2, где

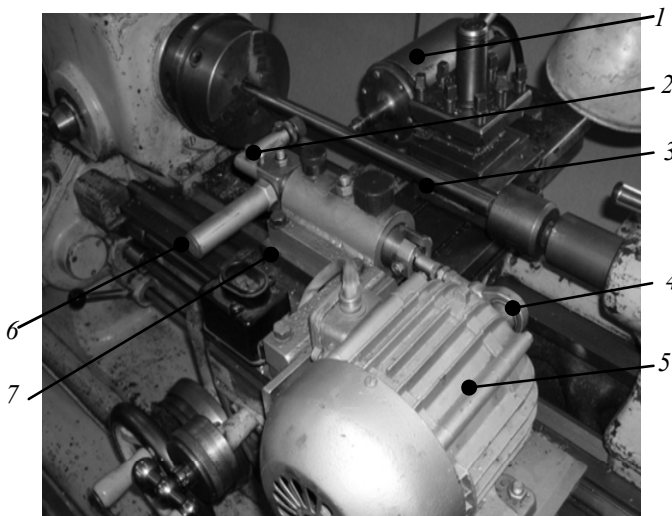


Рис. 2

1 — УЗ-головка для выглаживания поверхностного слоя; 2 — индентор для формирования РМР; 3 — обрабатываемая деталь; 4 — эксцентрик; 5 — электродвигатель; 6 — пружина для создания силы нормального давления; 7 — направляющая.

На первом этапе по методике, изложенной в работе [6], оценивалась топология микротвердости HV незакаленной и закаленной поверхностей, обработанных по традиционной и комбинированной УЗ-технологиям. По

результатам статистической обработки значений HV не были выявлены изменения микротвердости поверхности при нанесении РМР, однако испытания на износостойкость показали,

что поверхности с нанесенным РМР изнашивались медленнее. Это подтверждается представленными на рис. 3 и 4 графиками, демонстрирующими изменение износа поверхности детали (I_h) в зависимости от времени ее работы (t): на рис. 3, 4 показаны результаты соответственно для незакаленной и закаленной (HRC 40—50) стали, где *a* соответствует обработке поверхности чистовым точением с наложением УЗК, *б* — обработке комбинированным способом с наложением УЗК и нанесением регулярного микрорельефа.

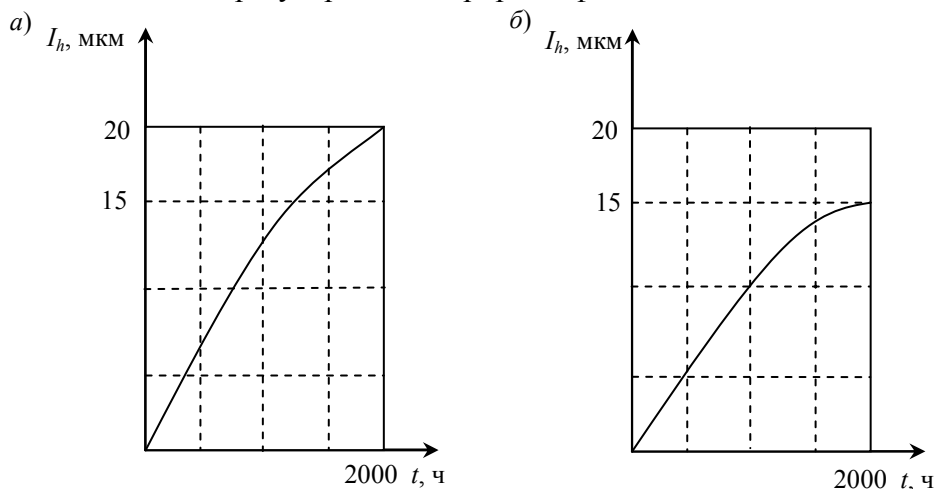


Рис. 3

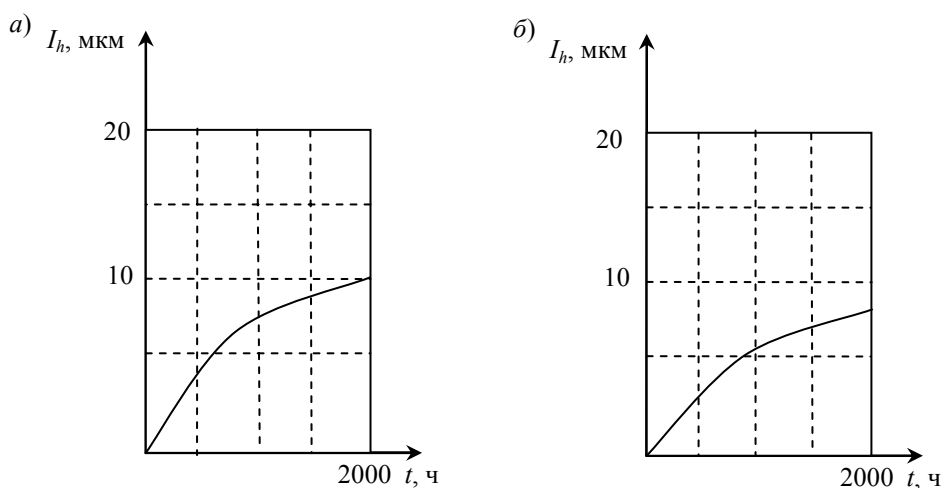


Рис. 4

Ресурсные испытания деталей проводились по изложенной в работе [7] методике ускоренных испытаний при следующих параметрах вибронакатывания:

- подача (линейное перемещение инструмента за один оборот детали) $s=0,078$ мм/об;
- амплитуда осцилляции деформирующего элемента $2l=2,5$ мм;
- количество волн канавки, образуемых за один оборот заготовки, $i=62,25$;
- усилие прижима $P=590$ Н.

Как показали результаты испытаний, при нанесении регулярного микрорельефа на упрочненную ультразвуковыми колебаниями поверхность износостойкость деталей повышается в среднем на 20—30 %.

Особый интерес представляет формирование сравнительных математических моделей рассмотренных процессов поверхностного упрочнения с использованием методик, предложенных в работах [8, 9]. При этом, учитывая оптимальные значения технологических параметров обработки, можно выявить и оценить количественно преимущества одной технологии по сравнению с другой.

Например, задавшись для экспериментов 3 и 4 (см. выше) значениями, близкими к параметрам оптимальной шероховатости, получим два аналитических выражения в виде квадратичной функции:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{m=1}^k b_m x_m + \sum_{m < n} b_{mn} x_m x_n + \sum_{m=1}^k b_{mm} x_m^2,$$

где \hat{y} — значение параметра оптимизации y ; b_0 , b_m , b_{mn} , b_{mm} — выборочные коэффициенты регрессии; x_m , x_n — независимые переменные, которые можно варьировать при постановке эксперимента.

Обозначим исследуемые факторы: количество волн канавки i , образуемых за один оборот заготовки, как x_1 ; усилие прижима P как x_2 ; подачу s как x_3 ; для параметра оптимизации — высоту микронеровностей R_a как y_1 ; радиус закругления выступов и впадин $r \cdot 10^{-3}$ как y_2 ; угол наклона образующих микронеровности у их основания β как y_3 ; относительную опорную поверхность (часть площади поверхности, не занятой канавкой) $F_{\text{оп}}$ как y_4 ; микротвердость поверхностного слоя HV как y_5 . На основе ротатбельного планирования эксперимента выразим зависимости этих параметров в виде математических моделей:

— УЗ-упрочнение закаленной поверхности без нанесения РМР:

$$y_1 = 2,9 - 0,19x_1 - 0,35x_2 + 0,36x_3 + 0,6x_1^2 + 0,54x_2^2 + 0,03x_3^2,$$

$$y_2 = 9,1 + 0,9x_1 + 0,54x_2 - 0,74x_3 - 0,98x_1^2 - 1,05x_2^2 + 0,01x_3^2,$$

$$y_3 = 1,6 - 0,02x_1 + 0,33x_2 + 0,19x_3 + 0,1x_1x_2 - 0,2x_2x_3 + 0,24x_1^2 + 0,42x_2^2 - 0,02x_3^2,$$

$$y_4 = 49,5 + 2,4x_1 + 3,6x_2 - 4,1x_3 - 0,5x_1x_2 - 0,15x_1x_3 - 0,25x_2x_3 - 3,6x_1^2 - 5,9x_2^2 - 0,16x_3^2,$$

$$y_5 = 312 + 17,2x_1 + 24,2x_2 + 14,7x_3 + 2,11x_1x_3 + 2,1x_2x_3 - 26,8x_1^2 - 8,4x_2^2 - 10,1x_3^2;$$

— УЗ-упрочнение закаленной поверхности с нанесением РМР:

$$y_1 = 2,8 - 0,26x_1 - 0,78x_2 + 0,35x_3 + 0,58x_1^2 + 0,54x_2^2 + 0,001x_3^2,$$

$$y_2 = 8,5 + 0,9x_1 + 0,54x_2 - 0,75x_3 + 0,22x_1^2 + 0,86x_2^2,$$

$$y_3 = 1,4 - 0,19x_1 - 0,04x_2 + 0,15x_3 + 0,1x_1x_2 - 0,02x_1x_3 + 0,27x_1^2 + 0,14x_2^2 - 0,02x_3^2,$$

$$y_4 = 49,5 + 5,2x_1 + 3,1x_2 - 4,2x_3 - 1,0x_1x_2 - 0,6x_1x_3 - 0,25x_2x_3 - 3,3x_1^2 - 5,0x_2^2 - 0,3x_3^2,$$

$$y_5 = 314 + 5,1x_1 + 20,1x_2 - 9,7x_3 - 1,1x_1x_2 - 0,9x_2x_3 - 10,1x_1^2 - 2,3x_2^2 - 9,8x_3^2.$$

Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментально полученных данных представлены в таблице.

| Метод | | R_a , мкм | | $r \cdot 10^{-3}$, мкм | | β , ...° | | HV, Н/мм ² | | $F_{\text{оп}}$, % | |
|--|-------------------|-------------|-------|-------------------------|-------|----------------|-------|-----------------------|-------|---------------------|-------|
| | | Расч. | Эксп. | Расч. | Эксп. | Расч. | Эксп. | Расч. | Эксп. | Расч. | Эксп. |
| Ультразвуковое упрочнение закаленной поверхности | без нанесения РМР | 2,7 | 2,5 | 18,5 | 16 | 1,46 | 1,5 | 205 | 200 | 36 | 38 |
| | с нанесением РМР | 2,65 | 2,5 | 15,8 | 16 | 1,34 | 1,4 | 213 | 206 | 56 | 60 |

Результаты сравнительных испытаний предложенного в статье комбинированного метода обработки поверхностного слоя деталей киноаппаратуры с известными технологиями упрочнения позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработанные математические модели технологических процессов показали эффективность как обычных, так и комбинированных методов поверхностно-пластического деформирования с нанесением УЗ-колебаний (что подтверждается хорошим совпадением, в пределах доверительных интервалов, расчетных и экспериментально полученных результатов).

2. Детали, обрабатываемые по комбинированной схеме ППД, обладают более высокой износостойкостью: для закаленных образцов — на 20...30 %, для незакаленных — на 60...80 %.

3. Повышенная износостойкость деталей, полученных комбинированным методом, обусловлена существенным (почти в 2 раза) увеличением относительной опорной поверхности $F_{оп}$ (см. таблицу).

4. Очевидно, что комбинированный метод ППД позволяет „тонко“ регулировать значение $F_{оп}$, например, задавая, в соответствии с рекомендациями [5], различные виды регулярно-микрорельефа деталей и подбирая их оптимальные характеристики исходя из конкретных условий работы.

5. Полученные математические зависимости могут быть использованы для моделирования процессов износа деталей (что позволит исключить длительные ресурсные испытания), проводимого, например, по плану размерности Бокса — Бенкина [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974.
2. Крагельский И. В., Комбалов В. С., Добычин А. П. Основы расчетов на трение и износ. М.: Наука, 1972.
3. Кулаков А. К., Рябинин М. А. Оценка износа деталей КПА в процессе приработки // Сб. науч. тр. СПбГУ КиТ. 2004. № 13.
4. Одинцов Л. Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. М.: Машиностроение, 1985.
5. Шнейдер Ю. Г. Технология финишной обработки давлением: Справочник. СПб: Политехника, 1998.
6. Коломенский Н. Н., Кулаков А. К., Нестерова Е. И., Рябинин М. А. Топология микротвердости поверхности деталей КВА при отделочно-упрочняющей обработке // Сб. науч. тр. СПбГУ КиТ. 2006. № 19.
7. Коломенский Н. Н., Кулаков А. К., Рябинин М. А. Методы ускоренных испытаний на износ деталей и узлов киноаппаратуры // Там же. 2006. № 20.
8. Налимов В. В., Голикова Т. И. Логические основания планирования эксперимента. М.: Металлургия, 1980.
9. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980.
10. Box G. E. P., Behnken D. W. Some new three level designs for the study of quantitative variables // Technometrics. 1960. Vol. 2, N 4.

Сведения об авторе

Максим Александрович Рябинин — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения, кафедра прецизионных технологий и сертификации киноаппаратуры; E-mail: ryabinin_08@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прецизионных технологий и
сертификации киноаппаратуры

Поступила в редакцию
10.03.09 г.