

УДК 621.9: 658.5

В.И. Бутенко, д-р техн. наук, профессор,
Д.С. Дуров, д-р техн. наук, профессор,
Р.Г. Шаповалов, канд. техн. наук, доцент
 ИТА ЮФУ, г. Таганрог, Россия
 E mail: mkk@egf.tsure.ru

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В работе приведены функциональные зависимости для определения усилий и подач для отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей, на основе которых определена функция критериев оптимизации, позволяющая реализовать алгоритм выбора рациональных условий обработки деталей с наноструктурированным материалом поверхностного слоя.

Ключевые слова: деталь, инструмент, поверхностный слой, усилие обработки, скорости, подача, целевой функции.

Комплекс выполненных исследований процессов наноструктурирования материала поверхностного слоя деталей при отделочно-упрочняющей обработке (ОУО) [1, 2] позволил разработать алгоритм программы для выбора рациональных условий поверхностного пластического деформирования (ППД). Основным параметром режима ОУО ППД, с помощью которого формируется наноструктурированный слой на поверхности детали, принято рабочее усилие упрочняющего инструмента P , оказывающее влияние как на физико-механические, так и на геометрические характеристики и качество поверхностного слоя деталей машин. На основании результатов исследования фрикционно-силового нагружения материала поверхностного слоя ОУО были получены следующие зависимости для расчёта усилия обработки P при различных видах ОУО поверхностей деталей машин [2 – 5]:

- отделочная обработка (например, дорнование)

$$0,6\pi i_{\text{кск}} \cdot R_{\text{нр}} \cdot \sigma_m < P \leq 2\pi i_{\text{кск}} \cdot R_{\text{нр}} \cdot \sigma_m; \quad (1)$$

- ОУО (например, алмазное выглаживание)

$$2\pi i_{\text{кск}} \cdot R_{\text{нр}} \cdot \sigma_m < P \leq 6\pi i_{\text{кск}} \cdot R_{\text{нр}} \cdot \sigma_m; \quad (2)$$

- упрочняющая обработка (обкатка, раскатка)

$$6\pi i_{\text{кск}} \cdot R_{\text{нр}} \cdot \sigma_m < P \leq 11,5\pi i_{\text{кск}} \cdot R_{\text{нр}} \cdot \sigma_m; \quad (3)$$

- перенаклёп

$$P > 11,5\pi i_{\text{кск}} \cdot R_{\text{нр}} \cdot \sigma_m, \quad (4)$$

где $i_{\text{кск}}$ – контактное сближение при скольжении или качении, определяемое по формуле

$$i_{\text{кск}} = i_k \left(2\sqrt{1 + f^2} - 1 \right), \quad (5)$$

здесь i_k – контактная деформация материалов в статике; f – коэффициент трения скольжения или качения; $R_{\text{нр}}$ – приведённый радиус в зоне контакта рабочего профиля инструмента с обрабатываемой поверхностью детали; σ_m – предел текучести обрабатываемого материала.

Величина контактной деформации материалов i_k при ОУО цилиндрических поверхностей деталей может быть определена по формуле

$$i_k = i_{нлк} + i_{уник}, \quad (6)$$

где $i_{нлк}$ – пластические деформации материала в статике при контакте рабочего профиля инструмента с шероховатой поверхностью детали;

$$i_{нлк} = Ra \left(\frac{2P}{K_{VV} C_R \sigma_m} \right)^{0,5}; \quad (7)$$

$i_{уник}$ – упругие деформации в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью детали;

$$i_{уник} = 20 \frac{1-\mu^2}{E} C_R \sigma_m i_{нлк}^{0,5}; \quad (8)$$

здесь C_R – коэффициент, зависящий от параметра шероховатости рабочей части инструмента $(Ra)_{ин}$; при $(Ra)_{ин} \leq 0,5$ мкм $C_R = 0,8$; при $0,5$ мкм $< (Ra)_{ин} \leq 0,8$ мкм $C_R = 1,0$; при $(Ra)_{ин} > 0,8$ мкм $C_R = 1,2$; ? – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала обрабатываемой детали.

Для определения величины продольной подачи инструмента (детали) при ОУО S_{np} можно воспользоваться следующей формулой [3]:

$$S_{np} = \sqrt{8 \frac{D_p}{2} (Ra - (Ra)_{нач} \left[1 - 12 \frac{1200P(1+f^2)^{0,5}}{\pi R_p (HV)_{нач} (h_{внд} - h_{вос})} \right]^{0,5}} - (Ra)_{ин}}, \quad (9)$$

где $h_{внд}$ – глубина внедрения инструмента (индентора) в обрабатываемую поверхность детали;

$$h_{внд} = \left\{ R_p \left[\frac{\pi D_p (\pi P (HV)_{нач})^{0,5}}{2} - \frac{2P(1+f^2)^{0,5}}{\pi D_p (HV)_{нач}} \right] \right\}^{1/3}; \quad (10)$$

$h_{вос}$ – упругое восстановление материала поверхностного слоя детали после контакта с инструментом;

$$h_{вос} = \frac{11[\pi (HV)_{нач}]^{0,5}}{32E}. \quad (11)$$

Определены диапазоны номинальных давлений инструмента p_u на обрабатываемую поверхность детали при различных видах обработки методами ППД:

- отделочная обработка дорнованием $0,3\sigma_m < p_u \leq 0,5\sigma_m$;
- ОУО алмазным выглаживанием $0,5\sigma_m < p_u \leq 0,8\sigma_m$;
- упрочняющая обработка обкаткой или раскаткой $0,8\sigma_m < p_u \leq 1,2\sigma_m$;
- перенаклёп $p_u > 1,2\sigma_m$.

Установлены величины остаточных деформаций материалов Z_{min} и Z_{max} для различных видов обработки поверхностей цилиндрических деталей методами ППД, которые лежат в следующих диапазонах [4]:

- отделочная обработка (дорнование)

$$Z_{min} > \left[Ra \left(\frac{0,7}{C_R} \right)^{0,5} + 20 \frac{1-\mu^2}{E} C_R \sigma_m \left(Ra \left(\frac{0,7}{C_R} \right)^{0,5} \right)^{0,5} \right] (2\sqrt{1+f^2} - 1), \quad (12)$$

$$Z_{max} \leq \left[Ra \left(\frac{1,9}{C_R} \right)^{0,5} + 20 \frac{1-\mu^2}{E} C_R \sigma_m \left(Ra \left(\frac{1,9}{C_R} \right)^{0,5} \right)^{0,5} \right] (2\sqrt{1+f^2} - 1), \quad (13)$$

- ОУО (алмазное выглаживание)

$$Z_{\min} > \left[Ra\left(\frac{1,9}{C_R}\right)^{0,5} + 20 \frac{1-\mu^2}{E} C_R \sigma_m \left(Ra\left(\frac{1,9}{C_R}\right)^{0,5} \right)^{0,5} \right] \left(2\sqrt{1+f^2} - 1 \right), \quad (14)$$

$$Z_{\max} \leq \left[Ra\left(\frac{5,6}{C_R}\right)^{0,5} + 20 \frac{1-\mu^2}{E} C_R \sigma_m \left(Ra\left(\frac{5,6}{C_R}\right)^{0,5} \right)^{0,5} \right] \left(2\sqrt{1+f^2} - 1 \right), \quad (15)$$

- упрочняющая обработка (обкатка, раскатка)

$$Z_{\min} > \left[Ra\left(\frac{5,6}{C_R}\right)^{0,5} + 20 \frac{1-\mu^2}{E} C_R \sigma_m \left(Ra\left(\frac{5,6}{C_R}\right)^{0,5} \right)^{0,5} \right] \left(2\sqrt{1+f^2} - 1 \right), \quad (16)$$

$$Z_{\max} \leq \left[Ra\left(\frac{11,4}{C_R}\right)^{0,5} + 20 \frac{1-\mu^2}{E} C_R \sigma_m \left(Ra\left(\frac{11,4}{C_R}\right)^{0,5} \right)^{0,5} \right] \left(2\sqrt{1+f^2} - 1 \right), \quad (17)$$

- перенаклёп

$$Z_{\max} > \left[Ra\left(\frac{11,4}{C_R}\right)^{0,5} + 20 \frac{1-\mu^2}{E} C_R \sigma_m \left(Ra\left(\frac{11,4}{C_R}\right)^{0,5} \right)^{0,5} \right] \left(2\sqrt{1+f^2} - 1 \right), \quad (18)$$

Для получения обобщённого критерия выбора рациональных режимов ОУО деталей методом свёртки величины минимальных приведённых затрат $(C_{nz})_{\min}$ и штучного времени на обработку t_{um} приведены к безразмерному виду [5], в результате чего была получена следующая целевая функция для некоторых заранее известных значений скорости обработки V_δ и подачи S :

$$F(V_\delta, S_{np}) = \left[\frac{l\pi D}{10^3 V_\delta S_{np}} \left(1 + \frac{T_{cm} p S_{np} V_\delta^2}{7 \cdot 10^6 P} \right) \right] \frac{C_\tau}{(t_{um})_{cp}} + \frac{l\pi D}{10^3 V_\delta S_{np}} \left(C_p \left(1 + \frac{T_{cm} p S_{np} V_\delta^2 HV}{7 \cdot 10^6 P} \right) + \frac{Ip S_{np} V_\delta^2 HV}{7 \cdot 10^6 P} \right) \frac{C_\sigma}{(C_{nz})_{cp}} \rightarrow \min, \quad (19)$$

где C_σ и C_τ – частные критерии для весовых коэффициентов.

Проведённый обзор существующих методов оптимизации для реализации алгоритма выбора рациональных условий ОУО деталей с наноструктурированием материала поверхностного слоя позволил принять за основу метод штрафных функций, позволяющий выполнить преобразование условной задачи оптимизации в безусловную, что дало возможность использовать для последующей оптимизации более простые методы и получить новую целевую функцию следующего вида:

$$F(V_\delta, S_{np}) = \left[\frac{l\pi D}{10^3 V_\delta S_{np}} \left(1 + \frac{T_{cm} p S_{np} V_\delta^2}{7 \cdot 10^6 P} \right) \right] \frac{C_\tau}{(t_{um})_{cp}} + \frac{l\pi D}{10^3 V_\delta S_{np}} \left(C_p \left(1 + \frac{T_{cm} p S_{np} V_\delta^2 HV}{7 \cdot 10^6 P} \right) + \frac{Ip S_{np} V_\delta^2 HV}{7 \cdot 10^6 P} \right) \frac{C_\sigma}{(C_{nz})_{cp}} + K_{HV} \frac{(HV)_{yn}}{HV} \left(\frac{V_\delta - 2}{2} \right)^2 + K_{HV} \left(\frac{2S_{np} - 1}{2} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (20)$$

где K_{HV} – коэффициент упрочнения материала поверхностного слоя детали после ОУО, определяемый отношением твёрдости упрочнённого материала $(HV)_{уп}$ к твёрдости основного материала детали HV .

В общем случае целевая функция (20) может быть минимизирована методом градиентного спуска при различных значениях коэффициента упрочнения K_{HV} . Основная цель этого метода состоит в преобразовании задачи нелинейного программирования с ограничениями по скорости $V_{\partial} < 2$ м/с и подаче $S_{np} < 0,2$ мм/об последовательность задач безусловной минимизации. При этом качественное применение разработанной математической модели и её достоверность зависит от технических ограничений, накладываемых на выбранный процесс обработки и обусловленных технологическими, конструкторскими и организационно-производственными условиями, что отражается на особенностях построения принятой модели для ОУО деталей с наноструктурированием материала поверхностного слоя [6].

При построении конкретной математической модели выбора рациональных условий при наноструктурирующей ОУО поверхностей деталей было введено ограничение, которое устанавливает допустимое значение радиального усилия обработки P , учитывая жёсткость обрабатываемой заготовки, и были наложены ограничения на максимальные и минимальные значения скорости вращения детали V_{∂} в диапазоне 0,2 – 2 м/с и подачи S_{np} для раскатывания и обкатывания 0,05 – 0,2 мм/об, для алмазного выглаживания – 0,02 – 0,1 мм/об.

Таблица 1.

D_p , мм	R_p , мм	Ra , мкм	P , Н	V_{∂} , м/с	S_{np} , мм/об
30	8	до 0,3	400	0,4	0,06
		0,3 – 0,5	500	0,4	0,08
		св. 0,5	600	0,4	0,10
	10	до 0,3	500	0,4	0,08
		0,3 – 0,5	600	0,5	0,10
		св. 0,5	650	0,5	0,12
40	10	до 0,3	550	0,5	0,08
		0,3 – 0,5	650	0,5	0,10
		св. 0,5	750	0,6	0,12
	12	до 0,3	600	0,6	0,10
		0,3 – 0,5	700	0,6	0,10
		св. 0,5	800	0,6	0,12
48	12	до 0,3	800	0,7	0,10
		0,3 – 0,5	900	0,7	0,10
		св. 0,5	1000	0,7	0,12
	16	до 0,3	900	0,7	0,10
		0,3 – 0,5	1000	0,7	0,10
		св. 0,5	1100	0,8	0,12

Составлена программа расчёта рациональных условий ОУО цилиндрических деталей из конструкционных легированных сталей, обеспечивающих наноструктурирование материала поверхностного слоя, которая реализована на ПЭВМ типа PC Pentium IV и с успехом работает на ряде машиностроительных предприятий, занимающихся обработкой прецизионных и высокоресурсных деталей [5]. В таблице

приведены рекомендуемые режимы ОУО цилиндрических деталей из конструкционных сталей с пределом текучести σ_m от 250 до 300 МПа, прошедшие предварительную обработку шлифованием и имеющие $(Ra)_{нач}$ в диапазоне от 0,8 мкм до 1,25 мкм и $(HV)_{нач} = 280 - 320$ без разделения на виды ОУО (число проходов инструмента принято $t = 2$). При этом диапазоны изменения диаметров упрочняющих роликов D_p из закалённой быстрорежущей стали Р6М5 и радиусов их рабочих профилей R_p были приняты для соответствующих диаметров обрабатываемых деталей D , исходя из следующих соотношений: для $D < 20$ мм $D_p = 24$ мм, $R_p = 6, 8$ мм; для 20 мм $< D \leq 36$ мм $D_p = 30$ мм, $R_p = 8, 10$ мм; для 36 мм $< D \leq 50$ мм $D_p = 40$ мм, $R_p = 10, 12$ мм; для $D > 50$ мм $D_p = 48$ мм, $R_p = 12, 16$ мм.

Список литературы:

1. Бутенко В.И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с.
2. Бутенко В.И. Управление нанотрибологическими характеристиками поверхностей тяжело нагруженных опор и подшипников скольжения. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 385 с.
3. Федонин О.Н., Степошина С.В. Научное обоснование выбора режимов обработки при поверхностном пластическом деформировании // Вестник БГТУ, №1(29). – Брянск: Изд-во БГТУ, 2011. – С. 4 – 8.
4. Федонин О.Н., Степошина С.В., Прокофьев А.Н., Голенко О.А. Определение параметров режима обработки при обкатывании наружных цилиндрических поверхностей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011, №6-3(290). – С. 66 – 73.
5. Степошина С.В. Разработка алгоритма для автоматизации выбора режима поверхностного пластического деформирования поверхностей стальных деталей // Вестник БГТУ, №3(35). – Брянск: Изд-во БГТУ, 2012. – С. 51 – 56.
6. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г. Математическое моделирование нелинейной динамики процессов упругого выглаживания поверхностей деталей // Вестник машиностроения. – 2008. – №12. – С. 61 – 65.

Надійшла до редакції 25.06.2014

V. Butenko, D. Durov, R. Shapovalov

CHOICE OF RATIONAL FINISHING - HARDENING PROCESSING MACHINE PARTS SURFACES

The functional dependences for definition of effort and submission are given at finishing-hardening processing of surfaces of details, on the basis of which the criterion function of optimization allowing to realize algorithm of a choice of rational conditions of processing of details with nanostructuring of a material of a superficial layer is made.

Key words: a detail, tool, superficial layer, effort of processing, speed, submission, criterion function.

В.І. Бутенко, Д.С. Дуров, Р.Г. Шаповалов

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ ОЗДОБЛЮВАЛЬНО-ЗМІЦНЮЮЧОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

У роботі наведені функціональні залежності для визначення зусиль і подач для Оброблювально - зміцнюючої обробки поверхонь деталей, на основі яких визначена функція критеріїв оптимізації, що дозволяє реалізувати алгоритм вибору раціональних умов обробки деталей з наноструктурованим матеріалом поверхневого шару.

Ключові слова: деталь, інструмент, поверхневий шар, зусилля обробки, швидкості, подача, цільова функція.