

УДК 621.048

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ  
ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ППД**

*Чернышев Е. Н., Шведова А. С.,  
Тищенко Э. Э.*

Донской государственной технической  
университет, Ростов-на-Дону, Российская  
Федерация

[erwinschwarz@mail.ru](mailto:erwinschwarz@mail.ru)

[kazimirovas@mail.ru](mailto:kazimirovas@mail.ru)

[lina\\_tishenko@mail.ru](mailto:lina_tishenko@mail.ru)

Представлены результаты исследований технологических процессов обработки деталей машин динамическими методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Получен комплекс теоретических моделей для аналитического определения глубины упрочнённого слоя, степени деформации и времени обработки для динамических методов обработки ППД. Разработана методика проектирования технологических процессов, позволяющая повысить их эффективность.

**Ключевые слова:** обработка деталей динамическими методами ППД, качество поверхности, глубина упрочнённого слоя, степень деформации, время обработки, повышение эффективности технологического процесса.

**Введение.** В современном машиностроении постоянно повышаются требования к качеству и эксплуатационным свойствам деталей. Важную роль в обеспечении их высоких эксплуатационных свойств играют финишные методы обработки, которые в основном обеспечивают необходимые параметры качества поверхностного слоя деталей. Большое распространение получили динамические методы обработки ППД — вибрационная отделочно-упрочняющая обработка (ВиОУО), центробежно-ротационная отделочно-упрочняющая обработка (ЦРОУО), шарико-стержневое упрочнение (ШСУ), дробеструйная обработка и т.п., которые имеют следующие преимущества по сравнению с другими финишными методами обработки:

- в процессе обработки сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура в поверхностном слое;
- отсутствие шаржирования обрабатываемых поверхностей частицами абразивного материала (в случае, если обработка осуществляется в среде абразива);
- отсутствие термических дефектов;
- стабильное качество поверхности;

UDC 621.048

**PRODUCTION PROCESSES EFFICIENCY  
IMPROVEMENT OF PARTS PROCESS BY  
DYNAMIC METHODS OF SURFACE  
PLASTIC DEFORMATION**

*Chernyshev E. N., Shvedova A. S.,  
Tishchenko E. E.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

[erwinschwarz@mail.ru](mailto:erwinschwarz@mail.ru)

[kazimirovas@mail.ru](mailto:kazimirovas@mail.ru)

[lina\\_tishenko@mail.ru](mailto:lina_tishenko@mail.ru)

The paper presents the results of researches of production processes of processing of parts of machines by dynamic methods of surface plastic deformation. The authors have received the complex of theoretical models for analytical determination of the depth of the hardened layer, the degree of deformation and processing time for dynamic methods of processing of surface plastic deformation. The technique of design of production processes allowing to increase their efficiency is developed.

**Keywords:** processing of parts by dynamic methods of surface plastic deformation, surface quality, depth of the hardened layer, degree of deformation, processing time, improving the efficiency of production process.

— при обработке достигаются минимальные высотные параметры шероховатости поверхности как на термически необработанных сталях, цветных сплавах, так и на высокопрочных материалах;

— образуется благоприятная форма микронеровностей с большой долей опорной площади на уровне вершин неровностей;

— образуются благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое;

— повышается микротвердость поверхности;

— не требуется применения сложного оборудования и оснастки;

— обработке могут подлежать детали разнообразных форм и размеров, изготовленные из различных материалов [1].

Теоретические и экспериментальные исследования этих методов обработки позволяют установить общие закономерности процессов, происходящих при обработке, что, в свою очередь, может лечь в основу усовершенствованной методики проектирования технологических процессов, позволяющей значительно повысить их эффективность. Цель данной работы — разработка такой методики теоретических и экспериментальных исследований для повышения эффективности процесса обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования.

**Основная часть.** Несмотря на широкое распространение динамических методов ППД и большое количество проведенных теоретических и экспериментальных исследований в этой области сложным остается вопрос создания теоретических моделей процесса единичного взаимодействия тела рабочей среды (индентора) с поверхностью обрабатываемой детали. Моделирование теоретических зависимостей для описания размеров и формы следов взаимодействия рабочих тел с обрабатываемой поверхностью даёт предпосылки к разработке моделей формирования основных параметров динамических методов ППД (производительности процессов и качества обработанной поверхности), учитывающих режимы технологических процессов и физико-механические свойства обрабатываемых материалов.

При проектировании технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки основной задачей является аналитический расчет ожидаемой степени деформации, глубины упрочненного слоя и шероховатости поверхности.

Аналитическое определение глубины упрочненного слоя и степени деформации в зависимости от параметров процесса обработки и физико-механических свойств материала детали является сложной задачей. Для ее решения необходимо изучить опыт, накопленный в ходе исследований статических методов ППД. Наиболее значимыми в этом плане являются научные труды М. С. Дрозда, Ю. И. Сидякина, М. М. Матлина, И. В. Кудрявцева, В. М. Смелянского и др.

В процессе внедрения рабочего тела (шарика) в поверхностный слой обрабатываемой заготовки в зоне контакта остается вмятина (пластический отпечаток) глубиной  $h_n$  с отличными от сердцевины свойствами, являющаяся результатом пластической деформации.

Моделирование взаимодействия сферического индентора с плоской поверхностью отражено в работе [2]. В результате получена зависимость:

$$h_n = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T} - 0,5 \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $P$  – контактная нагрузка,

$\sigma_T$  – предел текучести материала детали,

$d$  – контактной площадки индентора с деталью.

Однако зачастую площадь контакта индентора со сферической заточкой с плоскостью является эллипсной, для прогнозирования результатов обработки пригодна уточненная зависимость:

$$h_n = K \cdot \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T} - 1,42 \cdot a \cdot b}, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние размера пятна контакта;  
 $a$  и  $b$  – полуоси эллипса контакта:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}, \quad (3)$$

$$a = \frac{\pi}{2} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha - f) \cdot \sqrt{h_{\max} + b}, \quad (4)$$

где  $h_{\max}$  – максимальная глубина внедрения индентора;  
 $R$  – радиус индентора;  
 $\alpha$  – угол встречи индентора с обрабатываемой поверхностью;  
 $f$  – коэффициент трения скольжения индентора по поверхности обрабатываемой детали [3].

Автор [3] приводит также зависимость для определения коэффициента  $K$ :

$$K = 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4. \quad (5)$$

Величину глубины внедрения индентора  $h_{\max}$  можно рассчитать, используя зависимость М. А Тамаркина:

$$h_{\max} = 2 \cdot V_{\text{эф}} \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{и}}}{3 \cdot k_s \cdot c \cdot \sigma_T}}, \quad (6)$$

где  $V_{\text{эф}}$  – эффективная скорость обработки;  
 $k_s$  – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости детали;  
 $\rho_{\text{и}}$  – плотность материала, из которого изготовлен индентор;  
 $c$  – коэффициент несущей способности контактной поверхности [4].

Далее будет использована эффективная скорость шарика, зависящая от особенностей процесса обработки:

— для ВиОУО:

$$V_{\text{эф}} = k_{\text{эф}} \cdot A \cdot \gamma, \quad (7)$$

— для ЦРОУО:

$$V_{\text{эф}} = k_{\text{эф}} \cdot \omega \cdot R_{\text{эф}}, \quad (8)$$

где  $k_{\text{эф}}$  – обобщающий коэффициент эффективной скорости;  
 $A$  – амплитуда колебаний рабочей камеры;  
 $\gamma$  – частота колебаний рабочей камеры;  
 $\omega$  – частота вращения дна рабочей камеры (ротора);  
 $R_{\text{эф}}$  – эффективный радиус вращающегося ротора.

Отметим, что применение зависимостей (1), (2) затруднительно в некоторых случаях, в частности, при использовании динамических методов ППД, так как требуется знание величины контактной нагрузки  $P$ . Поэтому определение величины  $h_n$  следует производить через параметры, которые могут быть легко вычислены или определены из опытов.

Тогда выражение (2) преобразуется к виду:

$$h_n = 2,5 \cdot K \cdot \sqrt{D_{ин} \cdot h_{\max}}, \quad (9)$$

где  $D_{ин}$  – диаметр шарика [2].

На основании (5), (6), (7), (8), (9) получены уточненные зависимости, которые позволяют на этапе технологического проектирования определить глубину упрочненного слоя при различных динамических методах ППД.

Глубина упрочненного слоя для ВиОУО:

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot A \cdot \gamma \cdot \sin \alpha} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ин}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}}. \quad (10)$$

Глубина упрочненного слоя для ЦРОУО:

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot \omega \cdot R_{эф} \cdot \sin \alpha} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ин}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}}. \quad (11)$$

Глубина упрочненного слоя  $h_n$  при обработке ШСУ получена с учетом того, что на формирование параметров качества поверхностного слоя при этом виде обработки оказывают влияние такие факторы, как число стержней в насадке  $N$ , диаметр заточки стержня  $D_{ин}$ , энергия единичного удара пневмомолотка  $E_y$ , потери энергии при ударе, учитываемые КПД  $\eta$  и физико-механические характеристики материала детали:

$$h_n = 1,68 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_y \cdot \eta \cdot D_{ин}}{N \cdot HB^{1,12} \cdot 10^6}}, \quad (12)$$

где  $HB$  – твердость материала по Бринеллю.

Степень деформации  $\varepsilon$  можно рассчитать по формуле, представленной в работе [5]:

$$\varepsilon = \frac{d}{D}, \quad (13)$$

где  $d$  – диаметр, остающийся от вдавливания лунки;

$D$  – диаметр вдавливаемой сферы.

Тогда с учетом результатов работы имеет место зависимость:

$$d = \left( \frac{D \cdot E_y}{0,1 \cdot HD} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (14)$$

где  $E_y$  – энергия единичного удара индентора;

$HD$  – динамическая твердость материала [5].

Энергия единичного удара при динамических методах ППД в среде металлических шариков:

$$E_y = \frac{m_{ин} \cdot V_{эф}^2}{2}, \quad (15)$$

где  $m_{ин}$  – масса шарика.

Осуществить перевод твердости по Бринеллю в динамическую твердость возможно по предложенной в работе [2] зависимости:

$$HB = 0,2 \cdot HD^{0,89}, \quad (16)$$

С учетом (7), (8), (15) и (16) после преобразований получены зависимости для определения степени деформации при обработке деталей динамическими методами ППД:

— для ВиОУО:

$$\varepsilon = 0,8 \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot A \cdot \gamma} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ин}}{HB^{1,12} \cdot 10^6}}, \quad (17)$$

— для ЦРОУО:

$$\varepsilon = 0,8 \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot \omega \cdot R_{эф}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ш}}{HB^{1,12} \cdot 10^6}}, \quad (18)$$

— для обработки ШСУ:

$$\varepsilon = 0,67 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_y \cdot \eta}{N \cdot HB^{1,12} \cdot R_{ш}^3 \cdot 10^6}}. \quad (19)$$

Важную роль в процессе формирования характеристик качества поверхностного слоя деталей, подлежащих обработке динамическими методами ППД, играет определение времени обработки деталей. Необходимо избегать такого явления, как перенаклёп, приводящего к снижению прочности, отслаиванию, шелушению поверхностного слоя металла и появлению трещин в нём. Образование перенаклёпа негативно влияет на эксплуатационные свойства деталей. Явление перенаклёпа является необратимым, даже при использовании термообработки невозможно восстановление поверхностного слоя металла.

Для наиболее точного прогнозирования и планирования технологического процесса необходимо знать и уметь определять расчётное время до появления перенаклёпа. На основании проведенных исследований получена зависимость, позволяющая определить время достижения заданных параметров качества поверхностного слоя:

$$t_F = \frac{4 \cdot h_{\max} \cdot F \cdot R^2}{V_S \cdot f_s}, \quad (20)$$

где  $F$  – количество повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности;

$V_S$  – объём деформируемого металла при единичном взаимодействии шарика с обрабатываемой поверхностью;

$f_s$  – частота циклов воздействия рабочей среды на поверхность детали.

Проведены экспериментальные исследования процесса обработки динамическими методами ППД. В ходе анализа результатов данных исследований было установлено, что расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 15%, что подтверждает адекватность полученных теоретических зависимостей.

**Заключение.** По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработана методика, позволяющая повысить эффективность процесса обработки динамическими методами поверхностного пластического деформирования.

Разработанная методика представлена алгоритмом оптимизации технологических процессов динамических методов ППД. В этом алгоритме целевая функция представлена минимальным временем обработки деталей. Ограничительными функциями являются заданная глубина упрочненного слоя и заданная степень деформации.

Исходными данными к расчету являются заданные значения глубины упрочнения и степени деформации, массивы характеристик рабочей среды и технологических режимов обработки, материал обрабатываемой детали и его твердость по Бринеллю.

При введении в программу указанных исходных данных по полученным зависимостям рассчитываются ожидаемые значения глубины упрочненного слоя и степени деформации для всех вариантов комбинаций исходных данных. Из полученных в процессе вычисления вариантов выбираются те значения, величина которых меньше заданного. Для этих значений рассчитывается время обработки. Из этих массивов выбирается минимальное время обработки и соответствующие ему технологические режимы обработки. Эта комбинация считается оптимальной и обеспечивает эффективность обработки.

Предложенная методика проектирования технологических процессов динамических методов поверхностного пластического деформирования позволяет в полной мере учесть влияние физико-механических свойств материала и условий обработки деталей на производительность и качество обработки.

#### **Библиографический список**

1. Тамаркин, М. А. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, В. Г. Лебеденко // Вестник ДГТУ. — 2009. — Т.9, №3(42). — С. 213–224.
2. Дрозд, М. С. Инженерные расчёты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. — Москва : Машиностроение, 1986. — 224 с.
3. Сидякин, Ю. И. Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / Ю. И. Сидякин. — Москва, 2002. — 34 с.
4. Тамаркин, М. А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами : дис. ... д-ра техн. наук / М. А. Тамаркин. — Ростов-на-Дону, 1995. — 310 с.
5. Кудрявцев, И. В. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклепом / И. В. Кудрявцев, Е. И. Минков, Е. Э. Дворникова. — Москва : НИИинформтяжмаш, 1970. — 144 с.