

УДК 621.9: 658.5

Т. Г. Ивченко, канд. техн. наук, доцент, **И. В. Кисиленко**
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

ОБОСНОВАНИЕ ОБЛАСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Представлены результаты оптимизации режимов резания при комбинированной лезвийной и отделочно-упрочняющей обработке ППД. Обоснована возможность повышения производительности и снижения себестоимости, а так же повышения износостойкости деталей машин при комбинированной обработке в сравнении с обработкой ППД.

Ключевые слова: *производительность, себестоимость, износостойкость, пластическое деформирование, точение.*

T. G. Ivchenko, I. V. Kisilenko

GROUND OF RATIONAL APPLICATION OF THE COMBINED TREATMENT OF THE TURNING AND SURFACE PLASTIC DEFORMATION

The results of optimization of the cutting regimes at combined treatment of turning and finish-strengthening by surface plastic deformation are presented. It is grounded possibilities of the productivity increase and prime price decline and similarly of machines details wearproofness increase at the combined treatment by comparison to plastic deformation.

Keywords: *productivity, prime price, wearproofness, plastic deformation, turning.*

1. Введение

Одним из наиболее эффективных направлений развития современного машиностроительного производства является применение комбинированных методов обработки, обеспечивающих снижение трудоемкости за счет совмещения операций, повышение качества обработанной поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин.

В настоящее время наиболее распространенным является комбинирование лезвийной и отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Для каждого из этих методов достаточно хорошо изучены закономерности формирования поверхностного слоя обрабатываемых деталей и условия рационального применения [1, 2]. Однако сведения об особенностях комбинированной обработки практически отсутствуют.

Комбинированная лезвийная и отделочно-упрочняющая обработка ППД выполняется с использованием специальных инструментов, сочетающих в себе режущие и деформирующие элементы [3]. Особенностью такой обработки является зависимость параметров окончательной обработки ППД от параметров, формируемых при предшествующей лезвийной обработке и одновременное влияние режимов обработки на параметры поверхностного слоя при каждой из них. Выполненные в этом направлении исследования в основном рассматривают закономерности формирования параметров поверхностного слоя при комбинированной обработке и определение оптимальных по производительности режимов обработки [4].

Представляет интерес дальнейшее развитие методики оценки эффективности комбинированной обработки на основании существующих критериев повышения производительности и снижения себестоимости [5], а также с разработкой критериев повышения эксплуатационных свойств обработанных деталей.

Цель представляемой работы – оценка эффективности использования комбинированной лезвийной и отделочно-упрочняющей обработки ППД в сравнении с обработкой только ППД на основании критериев производительности и себестоимости с учетом эксплуатационных свойств.

2. Основное содержание и результаты работы

Оценки эффективности комбинированной обработки осуществляется на основе оптимизации основных параметров – подачи и скорости по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости.

В представляемой работе рассматривается комбинированная лезвийная обработка точением и обработка ППД обкатыванием шариками или роликами.

Основными техническими ограничениями при оптимизации являются ограничения по режущим возможностям лезвийного инструмента и шероховатости поверхности, обработанной совместным точением и ППД. Сведения о взаимосвязи стойкости режущего инструмента и режимами резания широко представлены в справочно-нормативной литературе. Информация о взаимосвязи параметров шероховатости поверхности с параметрами комбинированной обработки практически отсутствует, что требует проведения исследований в этом направлении.

В основу определения параметров шероховатости поверхностного слоя при комбинированной обработке R_{zK} заложены известные теоретические зависимости для отдельных видов обработки – обкатывания R_{zO} и точения [1] при условии, что параметры точения R_{zu} являются исходными для последующего обкатывания:

$$R_{zO} = \frac{S^2}{8R} + R_{zu} - R_{Pu} \left\{ \frac{150P(1+f^2)^{0.5}}{\pi R t_{mu} H_{\mu} \left[\frac{180 - \arccos(S - a_n)/a_n (h_k - h_y) - 2h_y}{180} \right]} \right\}^{0.5} + R_u, \quad (1)$$

$$R_{zK} = \frac{S^2}{8R} + \frac{r}{\cos \gamma} - \frac{\sqrt{4r^2 - S^2}}{2 \cos \gamma} + \frac{0.5 \rho (1 - 2\tau_0/\sigma_T) (2S + 0.5 \rho (1 - 2\tau_0/\sigma_T))}{32r} - R_{Pu} \left\{ \frac{150P(1+f^2)^{0.5}}{\pi R t_{mu} H_{\mu} \left[\frac{180 - \arccos(S - a_n)/a_n (h_k - h_y) - 2h_y}{180} \right]} \right\}^{0.5} + R_u, \quad (2)$$

где R - радиус деформирующего элемента; r - радиус при вершине лезвийного инструмента; γ - передний угол; ρ - радиус округления режущей кромки лезвия; τ_0 - удельная сдвиговая прочность; σ_T - предел текучести обрабатываемого материала; P - сила при обкатывании; f - коэффициент трения; H_{μ} - поверхностная микротвердость; R_{zu} , R_{Pu} , t_{mu} - параметры исходной шероховатости; a_n - радиус пластического отпечатка; h_k - глубина внедрения инструмента в обрабатываемую поверхность; h_y - величина упругого восстановления; R_u - параметр шероховатости поверхностей инструментов.

На основании проведенных в соответствии с формулой (1) теоретических расчетов установлен степенной характер зависимости параметра шероховатости поверхности при обкатывании R_{aO} и при комбинированной обработке R_{aK} от подачи S и радиуса деформирующего элемента R и получены упрощенные формулы:

$$R_{aO}(S, R) = C_{RO} S^{y_{rO}} R^{x_{rO}} ; R_{aK}(S, R) = C_{RK} S^{y_{rK}} R^{x_{rK}} , \quad (3)$$

где $C_{RO}, C_{RK}, y_{rO}, x_{rO}, y_{rK}, x_{rK}$ – коэффициенты и показатели степени влияния подачи S и радиуса деформирующего элемента R на параметр шероховатости поверхности R_a при обкатывании и комбинированной обработке.

Условия обработки незакаленной стали 45: чистовое точение резцами Т15К6; передний угол $\gamma = -5^\circ$; радиус при вершине $r = 1\text{мм}$; глубина резания $t = 1\text{мм}$; при обкатывании - диаметр шарика $d_o = 10\text{мм}$, усилие $P_o = 500\text{Н}$, скорость $V = 2\text{м/с}$.

В результате множественного регрессионного анализа установлены коэффициенты C_R , и показатели степени y_r, x_r для различных условий обработки, представленные в табл. 1.

Таблица 1. – Результаты расчетов параметров регрессионных зависимостей шероховатости поверхности от параметров обработки.

Вид обработки	Регрессионные зависимости шероховатости поверхности R_a от подачи S и радиуса шарика R для различных усилий обкатывания P, H		
	300	500	700
Обкатывание $R_{au} = 2,5 \text{ мкм}$	$R_{aO} = 3,0S^{0,23}R^{0,12}$	$R_{aO} = 2,3S^{0,28}R^{0,23}$	$R_{aO} = 1,8S^{0,33}R^{0,35}$
Обкатывание $R_{au} = 3,25 \text{ мкм}$	$R_{aO} = 3,4S^{0,19}R^{0,14}$	$R_{aO} = 2,60S^{0,23}R^{0,25}$	$R_{aO} = 2,1S^{0,28}R^{0,37}$
Комбинированная обработка	$R_{aK} = 20,0S^{1,6}R^{0,15}$	$R_{aK} = 15,6S^{1,6}R^{0,27}$	$R_{aK} = 12,2S^{1,7}R^{0,35}$

С увеличением подачи и радиуса шарика параметр шероховатости поверхности R_a при комбинированной обработке увеличивается; с увеличением усилия обкатывания – уменьшается, причем степень влияния радиуса шарика при этом существенно возрастает.

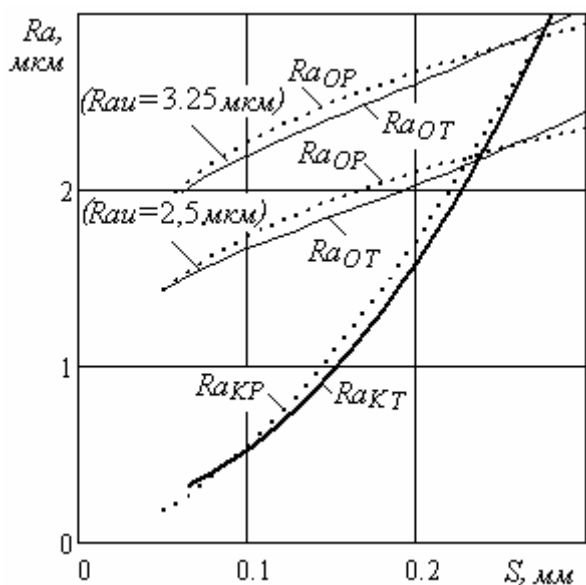


Рисунок. 1. Графики теоретических R_{aT} и регрессионных R_{aP} зависимостей параметра шероховатости от подачи при обкатывании R_{aO} и комбинированной обработке совместным точением и обкатыванием R_{aK}

На рис. 1 представлены графики зависимостей шероховатости обработанной поверхности от подачи, рассчитанных теоретически (штриховые линии) по формулам (1), (2) и по регрессионным (сплошные линии) зависимостям (3).

Достаточно хорошее совпадение полученных регрессионных и теоретических зависимостей, с погрешностью, не превышающей 5%, свидетельствует о возможности использования полученных регрессионных зависимостей на практике.

Установленные коэффициенты C_R и показатели степени y_r, x_r позволяют при заданных параметрах шероховатости R_a рассчитывать оптимальные подачи S_o и скорости резания V_o .

При оптимизации режимов комбинированной обработки получены следующие зависимости оптимальных подач S_o и скоростей V_o от параметров

обработки, обеспечивающих максимальную производительность V_{oP} и минимальную себестоимость V_{oC} [5]:

$$S_o = \left(R_{aK} / C_{RK} R^{x_{rK}} \right)^{1/y_{rK}} ; V_{oP} = C_V K_V / T^m S_o^{y_v} t^{x_v} ; V_{oC} = K_{VC} C_V K_V / T^m S_o^{y_v} t^{x_v} , \quad (4)$$

где C_V, K_V, x_v, y_v, m – коэффициенты и показатели степени влияния глубины резания t , подачи S и стойкости T на скорость резания V при точении; K_{VC} – коэффициент, учитывающий различие оптимальных по различным критериям (производительности и себестоимости) скоростей резания: $K_{VC} = [m/(1-m)(t_c + A_w/A)]^m$; t_c – время смены инструмента; A_w/A – соотношение стоимостей 1 минуты работы инструмента и станка.

Графики, представленные на рис. 1, свидетельствуют о том, что комбинированная обработка совместным точением и обкатыванием позволяет существенно снизить шероховатость поверхности в сравнении с обработкой только обкатыванием.

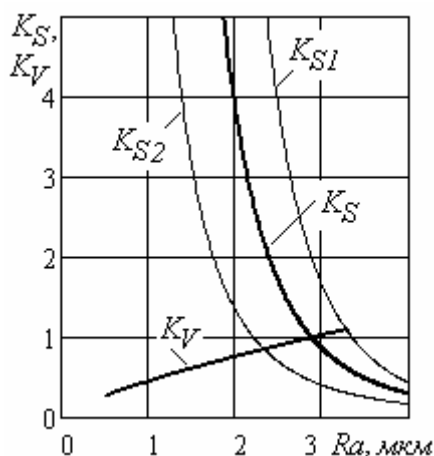


Рисунок 2. Графики зависимости коэффициентов повышения подач K_S и снижения скорости K_V от параметра шероховатости при различных условиях комбинированной обработки.

Следовательно, комбинированная обработка для обеспечения заданной шероховатости поверхности позволяет повысить уровень подач S_{oK} в сравнении с подачами при обкатывании S_{oO} . Скорость в связи с увеличением подачи при комбинированной обработке уменьшается. Коэффициенты повышения подач при совместном точении и обкатывании $K_S = S_{oO}/S_{oK}$ и уменьшения скорости $K_V = (K_S)^{-y_v}$ в зависимости от параметра шероховатости в сравнении с отдельным обкатыванием представлены на рис. 2 для условий обработки: усилие обкатывания $P_o = 500\text{Н}$, исходная шероховатость при обкатывании $R_{au} = 3,25$ мкм.

С уменьшением усилия обкатывания до $P_o = 300\text{Н}$ коэффициент повышения подач при совместном точении и обкатывании K_{S1} возрастает; с уменьшением исходной шероховатости при обкатывании до $R_{au} = 2,5$ мкм коэффициент K_{S2} снижается в сравнении с K_S .

Производительность комбинированной обработки в сравнении с обкаткой повышается, несмотря на уменьшение скорости за счет более существенного роста подачи. Себестоимость комбинированной обработки соответственно снижается. Коэффициенты повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C :

$$K_P = K_S^{1-y_v} , K_C = K_S^{y_v-1} . \quad (5)$$

Графики, представленные на рис. 4, позволяют оценивать возможности повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C в зависимости от параметра шероховатости R_a для различных условий комбинированной обработки.

Коэффициенты повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C при совместном точении и обкатывании определяются в большей степени подачей, поэтому характер их изменения в зависимости от параметра шероховатости идентичен изменению коэффициентов повышения подач K_S (рис. 3). Соответственно условия об-

работки для определения коэффициентов K_P и K_C : усилие обкатывания $P_o = 500\text{Н}$, исходная шероховатость при обкатывании $R_{au} = 3,25\text{ мкм}$. С уменьшением усилия обкаты

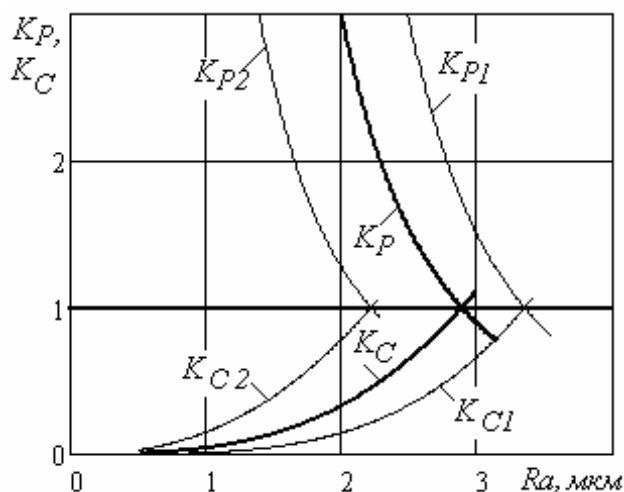


Рисунок 4. Графики зависимости коэффициентов повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C от параметра шероховатости при различных условиях комбинированной обработки.

вания до $P_o = 300\text{Н}$ коэффициент повышения производительности K_{P1} увеличивается, K_{C1} – уменьшается. С уменьшением исходной шероховатости при обкатывании до $R_{au} = 2,5\text{ мкм}$ коэффициент повышения производительности K_{P2} уменьшается, K_{C2} – увеличивается в сравнении с K_P и K_C .

Однако необходимо учитывать, что применение комбинированной обработки эффективно в сравнении с обработкой только ППД в определенном диапазоне изменения шероховатости поверхности, свыше которого ее применение становится неэффективным.

Комбинированная обработка эффективна лишь в том случае, когда коэффициент повышения производительности выше единицы $K_P > 1$, а коэффициент снижения себестоимости не превышает единицу $K_C < 1$. Это условие выполняется при равенстве подач при комбинированной обработке и отдельном обкатывании $S_{oO} = S_{oK}$, когда $K_S = 1$. Поэтому условием эффективного применения комбинированной обработки может служить граничное значение параметра шероховатости поверхности R_{ao} , для которого это условие выполняется:

$$R_{ao} = \left[\frac{C_{RK}^{y_{rO}}}{C_{RO}^{y_{rK}}} R^{(x_{rK} y_{rO} - x_{rO} y_{rK})} \right]^{1/(y_{rO} - y_{rK})} \tag{6}$$

В результате расчетов для рассмотренных условий обработки получены следующие граничные значения параметра шероховатости поверхности R_{ao} :

$R_{ao} = 2,94\text{ мкм}$ при усилии обкатывания $P_o = 500\text{Н}$, исходной шероховатости при обкатывании $R_{au} = 3,25\text{ мкм}$;

$R_{ao1} = 3,37\text{ мкм}$ при усилии обкатывания $P_o = 300\text{Н}$, исходной шероховатости при обкатывании $R_{au} = 3,25\text{ мкм}$;

$R_{ao2} = 2,25\text{ мкм}$ при усилии обкатывания $P_o = 500\text{Н}$, исходной шероховатости при обкатывании $R_{au} = 2,5\text{ мкм}$.

Таким образом, на основании установленных зависимостей (4) и (5), выполнена оценка возможностей повышения производительности и снижения себестоимости при комбинированной обработке точением и обкатыванием в сравнении с обработкой обкатыванием, а также определены граничные значения параметра шероховатости поверхности, выше которых ее применение становится неэффективным.

Эффективность применения комбинированной обработки наряду с повышением производительности и снижением себестоимости может быть обоснована так же на основании анализа возможности повышения важнейшего эксплуатационного свойства обработанных деталей – износостойкости.

В настоящей работе в качестве показателя износостойкости использован коэффициент относительного изменения износостойкости K_u при постоянных условиях работы и физико-механических свойствах материала, имеющий следующий вид [1]:

$$K_u = (R_{ia} W_{iz} H_{i \max})^{1/6} / \lambda_o t_{im}^{3/2} S_{im}^{1/2} (H_{i \mu})^{2/3}; \quad (7)$$

где $R_{oa} = R_a/R_a \delta$; $W_{oz} = W_z/W_z \delta$; $H_{o \max} = H_{\max}/H_{\max} \delta$; $\lambda_o = \lambda/\lambda \delta$; $t_{om} = t_m/t_m \delta$; $S_{om} = S_m/S_m \delta$; $H_{o \mu} = H_{\mu}/H_{\mu} \delta$ - относительные показатели параметров поверхностного слоя, определенные в сравнении с базовыми; W_z - параметр волнистости; H_{\max} - макроотклонение; λ - коэффициент, учитывающий поверхностные остаточные напряжения; t_m - относительная опорная длина профиля; S_m - средний шаг неровностей; H_{μ} - поверхностная микротвердость.

Возможность повышения подач для обеспечения одного и того же уровня шероховатости при комбинированной обработке в сравнении с обкатыванием благоприятно сказывается на формировании среднего шага неровностей $S_m \approx S_o$, что приводит к снижению интенсивности изнашивания и повышению износостойкости. Для количественной оценки изменения износостойкости в зависимости от параметра шероховатости, изменяющего подачу и средний шаг неровностей, предлагается коэффициент изменения интенсивности изнашивания при совместном точении и обкатывании в сравнении с обработкой обкатыванием $K_{IK} = K_u(S_{oO}/S_{oK})$, представленный на рис. 5:

$$K_{IK} = K_S^{-0,5}. \quad (8)$$

Графики (рис. 5) построены для указанных ранее условий комбинированной обработки.

Коэффициент изменения интенсивности изнашивания K_{IK} соответствует условиям: усилие обкатывания $P_o = 500\text{Н}$, исходная шероховатость при обкатывании $R_{au} = 3,25\text{мкм}$. С уменьшением усилия обкатывания до $P_o = 300\text{Н}$ коэффициент изменения интенсивности изнашивания K_{IK1} уменьшается, то есть износостойкость повышается. С уменьшением исходной шероховатости при обкатывании до $R_{au} = 2,5\text{мкм}$ коэффициент изменения интенсивности изнашивания K_{IK2} увеличивается, износостойкость снижается.

Таким образом, на основании представленных зависимостей (7) и (8), выполнена оценка возможностей снижения интенсивности изнашивания, то есть повышения износостойкости при комбинированной обработке точением и обкатыванием в сравнении с обработкой обкатыванием.

Эффективность комбинированной обработки в сравнении с обработкой ППД возрастает с увеличением параметров исходной шероховатости при обкатывании и усилия обкатывания.

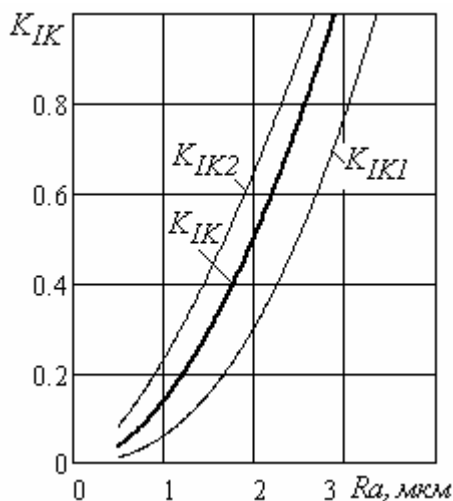


Рисунок 5. Графики зависимости коэффициентов изменения интенсивности изнашивания $K_{ИК}$ от шероховатости поверхности при различных условиях комбинированной обработки

3. Выводы

На основании установленных зависимостей параметров шероховатости поверхности от условий комбинированной обработки определены оптимальные значения подачи и скорости, обеспечивающих максимальную производительность и минимальную себестоимость. Установлены коэффициенты изменения подач и скоростей, а также коэффициенты изменения производительности и себестоимости комбинированной обработки точением и обкатыванием в сравнении с обработкой обкатыванием. Определены граничные значения параметра шероховатости поверхности, свыше которых применение комбинированной обработки становится неэффективным. Обоснована возможность повышения износостойкости деталей машин при комбинированной обработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. - М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
2. Инженерия поверхности детали / А. Г. Суслов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2008. - 320 с.
3. Чистосердов, П. С. Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П. С. Чистосердов. - Минск: Беларусь, 1977. – 69 с.
4. Кисиленко, И. В. Оценка возможностей повышения производительности при совместной обработке точением и обкатыванием / И. В. Кисиленко, Т. Г. Ивченко // Инженер. - Донецк: ДонНТУ, 2017. - № 1(23) - 2(24). - С. 50-52.
5. Ивченко, Т. Г. Анализ возможностей повышения эффективности чистового точения при использовании инструментов с покрытиями / Т. Г. Ивченко, И. А. Петряева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2017. - № 1(56). – С. 66-72.

Поступила в редколлегию 7.02.18 г.