

УДК 621.9: 658.5

И. А. Петряева, канд. техн. наук, доцент
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: irina_petryaeva@mail.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

В статье представлены результаты оптимизации режимов резания при комбинированной лезвийной и отделочно-упрочняющей обработке поверхностно-пластическим деформированием внутренних поверхностей вращения. Обоснована возможность повышения производительности при комбинированной обработке в сравнении с обработкой пластическим деформированием.

Ключевые слова: комбинированная обработка, шероховатость, оптимизация, производительность.

I. A. Petryaeva

PROVIDING OF BURST PRODUCTIVITY OF THE COMBINED PROCESSING OF THE INTERNAL SURFACES OF ROTATION

In present work the results of optimization of the cutting regimes at combined processing of turning and finish-strengthening by the surface plastic deformation are presented of the internal surfaces of rotation. It is grounded possibilities of the productivity increase at the combined processing by comparison to the plastic deformation.

Keywords: combined processing, roughness, optimization, productivity.

1. Введение

Одним из резервов повышения производительности механообработки является использование комбинированных методов, из которых наиболее распространена совместная лезвийная и отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. Для каждого из этих методов достаточно хорошо изучены закономерности формирования поверхностного слоя обрабатываемых деталей и условия их рационального применения [1, 2]. Однако сведения об особенностях комбинированной обработки весьма ограничены.

Выполненные в этом направлении исследования в основном рассматривают закономерности формирования параметров поверхностного слоя и определение оптимальных по производительности режимов комбинированной обработки наружных поверхностей вращения [3, 4, 5]. Для внутренних поверхностей вращения такая информация практически отсутствует, что требует проведения исследований в этом направлении.

Представляет интерес дальнейшее изучение взаимосвязей параметров шероховатости поверхностного слоя с параметрами комбинированной обработки внутренних поверхностей вращения, развитие методики определения оптимальных по производительности режимов совместного растачивания и раскатывания. Весьма актуальной является так же оценка эффективности комбинированной обработки на основании существующих критериев повышения производительности [4] применительно к внутренним поверхностям вращения.

Цель работы – оценка возможностей обеспечения максимальной производительности при комбинированной обработке внутренних поверхностей вращения растачиванием и раскатыванием на основе изучения закономерностей формирования поверхностного слоя и оптимизации ее параметров.

2. Основное содержание и результаты работы

Максимальная производительность обработки достигается на основе оптимизации основных параметров – подачи и скорости с учетом действующих технических ограничений. При чистовой обработке наиболее актуально ограничение по шероховатости поверхности. В основу определения параметров шероховатости поверхности при комбинированной обработке R_{ZK} заложены известные теоретические зависимости для отдельных видов обработки - растачивания R_{ZPT} и раскатывания R_{ZPK} [1].

При комбинированной обработке параметр шероховатости поверхностного слоя R_{ZK} определяется из условия, что параметры растачивания R_{ZPT} являются исходными для последующего раскатывания R_{ZPK} . Кроме того, следует учесть, что при использовании многороликовых раскаток (z – количество роликов) подача на отдельный ролик определяется, исходя из подачи на оборот $S_z = S/z$. Параметр шероховатости при совместном растачивании и раскатывании R_{ZK} определяется следующим образом:

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

где R_u – параметр шероховатости поверхностей инструментов; R – радиус деформирующего элемента; r – радиус при вершине лезвийного инструмента; γ – передний угол; b_c – величина пластического оттеснения; 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;

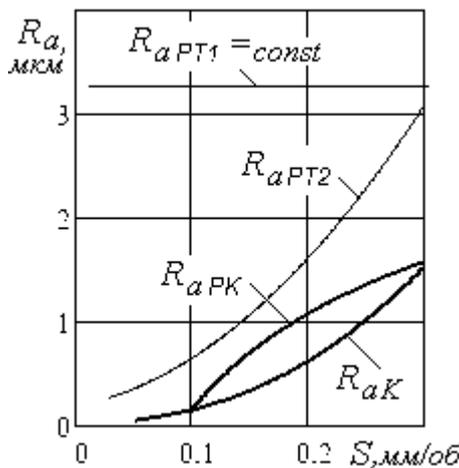


Рисунок 1. Графики зависимости параметра шероховатости R_a от подачи S при раскатывании R_{aPK} и при комбинированной обработке R_{aK}

На основании представленной зависимости (1) по известным параметрам обработки теоретически рассчитан параметр шероховатости $R_{aK} = 250R_{ZK}$. Графики зависимости параметра шероховатости R_a от подачи S при раскатывании R_{aPK} (исходная шероховатость $R_{aPT1} = const$) и комбинированной обработке R_{aK} (исходная шероховатость R_{aPT2} переменна) представлены на рис. 1.

Условия обработки: материал детали - сталь 35; резец Т15К6; скорость $V = 2$ м/с; глубина $t = 1$ мм; радиус $r = 1$ мм; передний угол $\gamma = 5^\circ$; диаметр ролика 10 мм; сила $P = 500$ Н.

В связи с тем, что при совместной обработке исходная шероховатость R_{aPT2} переменна и уменьшается с уменьшением подачи, параметр шероховатости R_{aK} формируемый в результате совместной обработки меньше, чем при раскатывании. Следовательно, при комбинированной

обработке для одних и тех же подач может быть достигнута меньшая (до 2-х раз) шероховатость поверхности, чем при раздельном растачивании и раскатывании.

Для практического применения целесообразно аппроксимировать теоретические зависимости (1) регрессионными зависимостями вида (табл. 1):

$$R_{aKP}(S, R) = C_R S^{y_R} R^{x_R}, \tag{2}$$

где C_R - коэффициент; y_R, x_R - показатели степени влияния подачи и радиуса ролика на параметр шероховатости поверхностного слоя.

Таблица 1. - Регрессионные зависимости для расчета параметров шероховатости при совместном растачивании и раскатывании

Вид обработки	Регрессионные зависимости параметра шероховатости R_a от подачи S и радиуса ролика R для усилий раскатывания P, H	
	300	500
Совместное растачивание и раскатывание однорезной раскаткой ($Z = 1$)	$R_{aKP1} = 14,7S^{1,57}R^{0,18}$	$R_{aKP1} = 10,8S^{1,65}R^{0,33}$
Совместное растачивание и раскатывание многороликовой раскаткой ($Z = 6$)	$R_{aKP} = 5,28S^{1,58}R^{0,58}$	$R_{aKP} = 2,14S^{1,8}R^{1,1}$

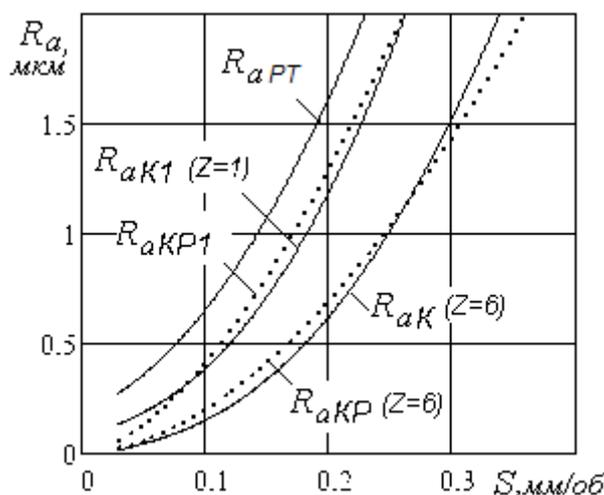


Рисунок 2. Графики теоретических R_{aK} и регрессионных R_{aKP} зависимостей параметра шероховатости от подачи S при совместном растачивании и раскатывании

С увеличением подачи и радиуса шарика параметр шероховатости поверхности R_{aK} при совместном растачивании и раскатывании увеличивается и раскатывании увеличивается; с увеличением усилия обкатывания – уменьшается, причем степень влияния радиуса ролика при этом существенно возрастает. Шероховатость поверхности существенно снижается с увеличением количества роликов в многороликовых раскатках.

На рис. 2 представлены графики зависимостей шероховатости обработанной поверхности от подачи, рассчитанных теоретически (сплошные линии) по формуле (1) и по регрессионным (штриховые линии) зависимостям (2) (погрешность не превышает 5%).

Для обеспечения максимальной производительности комбинированной обработки совместным растачиванием и раскатыванием в качестве целевой функции принимается переменная часть производительности, зависящая от режимов обработки, максимум которой достигается при максимуме произведения скорости резания V и подачи S : $P(V, S) = VS \rightarrow \max$ [3].

При комбинированной обработке совместным растачиванием и раскатыванием

внутренних поверхностей вращения наиболее существенными являются следующие ограничения:

1) по возможностям режущего инструмента, обусловленным скоростью резания V , соответствующей его стойкости T :

$$V \leq C_V K_V K_{VP} / T^m t^{x_v} S^{y_v}, \quad (3)$$

где C_V, K_V – коэффициенты и x_v, y_v, m – показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и стойкости на скорость резания; K_{VP} – коэффициент, учитывающий особенности растачивания: $K_{VP} = 0,9$.

2) по шероховатости обработанной поверхности, ограниченной допустимым уровнем R_a :

$$C_R K_R S^{y_r} R^{x_r} \leq R_a, \quad (4)$$

где C_R, K_R – коэффициенты и y_r, x_r – показатели степени, учитывающие влияние подачи S и радиуса индентора R на шероховатость поверхности.

3) по жесткости обрабатываемой детали, ограниченной допустимой стрелой прогиба f_δ :

$$1.1 C_P K_P K_{PK} t^{x_p} S^{y_p} L^3 \mu / (\pi D n / 1000)^{n_p} 0,05 D^4 K_3 E \leq f_\delta, \quad (5)$$

где C_P, K_P – коэффициенты и x_p, y_p, n_p – показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и скорости на силу резания P_z ; K_{PK} – коэффициент, учитывающий дополнительное влияние на силу резания силы при раскатывании; D, L – диаметр и длина детали; μ – динамический коэффициент; K_3 – коэффициент, зависящий от способа закрепления детали; E – модуль упругости обрабатываемого материала, МПа; f_δ – допустимая стрела прогиба детали: для чистовой обработки $f_\delta = 0,05 \dots 0,03$ мм.

4) по температуре в зоне обработки, ограниченной предельно допустимой температурой Θ :

$$C_\Theta K_\Theta K_{\Theta K} t^{x_t} S^{y_t} (\pi D n / 1000)^{n_t} \leq \Theta; \quad (6)$$

где C_Θ, K_Θ – коэффициенты и ; x_t, y_t, n_t – показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и скорости на температуру резания Θ_p ; $K_{\Theta K}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное влияние на температуру резания лезвийным инструментом температуры при раскатывании.

5) кинематические ограничения, соответствующие возможностям выбранного оборудования по предельно допустимым диапазонам частот вращения и подачи: $n_{min} \leq n \leq n_{max}$; $S_{min} \leq S \leq S_{max}$.

В результате линеаризации целевой функции и ограничений путем логарифмирования с введением новых обозначений: $X1 = \ln n$; $X2 = \ln s$ определена следующая математическая модель процесса комбинированной обработки совместным растачиванием и раскатыванием:

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1, \\ n_r X1 + y_r X2 \leq b_2, \\ n_P X1 + y_P X2 \leq b_3, \\ n_t X1 + y_t X2 \leq b_4, \\ X1 \geq b_5, \quad X1 \leq b_6, \\ X2 \geq b_7, \quad X2 \leq b_8, \\ (X1 + X2) \rightarrow \max, \end{cases} \quad \begin{cases} b_1 = \ln(1000 C_V K_V K_{VK} / \pi D T^m t^{x_v}); \\ b_2 = \ln(R_a (\pi D / 1000)^{n_r} / C_R K_R K_{RK}); \\ b_3 = \ln\left(\frac{1000^{n_P} 0,05 D^4 K_3 E f_\partial}{1.1 C_P K_P K_{PK} (\pi D)^{n_P} t^{x_P} L^3 \mu}\right); \\ b_4 = \ln(1000^{n_t} \Theta / C_\Theta K_\Theta K_{\Theta K} (\pi D)^{n_t}); \\ b_5 = \ln n_{min}; \quad b_6 = \ln n_{max}; \\ b_7 = \ln S_{min}; \quad b_8 = \ln S_{max}. \end{cases} \quad (7)$$

Схема определения оптимальных режимов резания графическим методом (для обработки стали 45 твердосплавным резцом Т15К6 и роликовой раскаткой при допустимой шероховатости $R_a = 0,32\text{мкм}$) представлена на рис. 3.

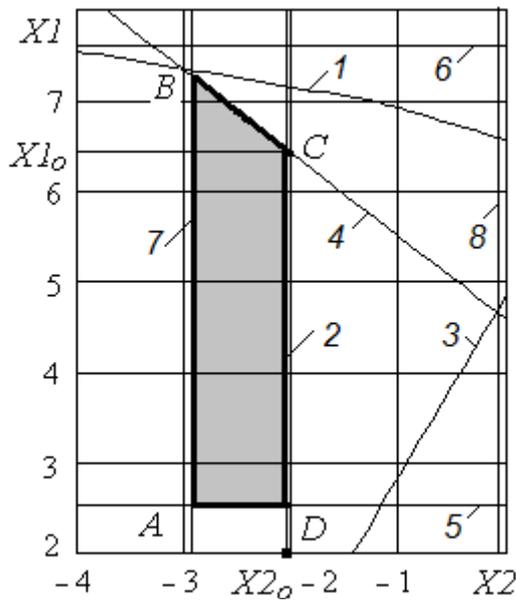


Рисунок 3. Схема определения оптимальных режимов совместного растачивания и раскатывания

Точка C в многоугольнике $ABCD$, представляющем собой область возможных решений и в которой целевая функция принимает максимальное значение, является точкой пересечения ограничений и по шероховатости обработанной поверхности (2) и предельно допустимой температуры (4). Координаты точки $C(X1_o, X2_o)$ являются искомыми оптимальными значениями параметров.

Ограничения по жесткости (3) и по возможностям режущего инструмента (1) не влияют на выбор оптимальных режимов обработки.

Для заданных условий механообработки определены следующие оптимальные режимы: $X2_o = -2,048$; $X1_o = 6,456$; $n_o = e^{X1_o} = 636\text{об/мин}$; $S_o = e^{X2_o} = 0,13\text{мм/об}$; $V_o = \pi D n / 100 = 160\text{м/мин}$.

Аналитические зависимости для расчета оптимальных подач S_o и скоростей V_o :

$$S_o = (R_a / C_R K_R R^{z_r})^{1/y_r}; \quad V_o = \begin{cases} (\Theta / C_\Theta K_\Theta K_{\Theta K} t^{x_t} S_o^{y_t})^{1/n_t}, & \text{при } \Theta < \Theta_0; \\ C_V K_V K_{VP} / T^m t^{x_v} S_o^{y_v}, & \text{при } \Theta \geq \Theta_0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\Theta_0 = C_\Theta K_\Theta K_{\Theta K} (C_V K_V K_{VP} / T^m)^{n_t} (R_a / C_R K_R R^{z_r})^{(y_v n_t - y_t) / y_r} t^{x_t - x_v n_t}$$

где Θ_0 – граничное значение температуры, свидетельствующее о необходимости учета температурного ограничения.

Установленные аналитические зависимости (8) позволяют рассчитывать оптимальные режимы совместного растачивания и раскатывания для любых условий обработки.

Графики зависимости оптимальных значений подач S_o и оптимальных скоростей резания V_o от шероховатости обработанной поверхности R_a представлены на рис. 4, 5.

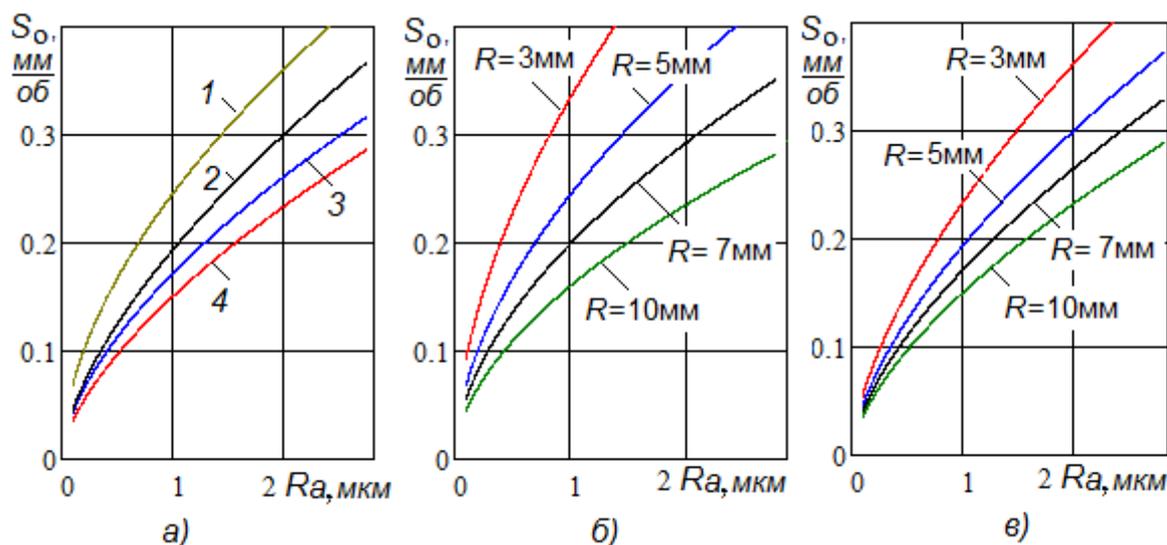


Рисунок 4. Графики зависимости оптимальной подачи S_o от шероховатости обработанной поверхности R_a для различных условий обработки

На рис. 4 а представлены графики зависимости оптимальных значений подачи S_o от шероховатости поверхности R_a для шестироликовой раскатки (1, 2) в сравнении с однороликовой (3, 4), для которой оптимальная подача S_o значительно ниже. Оптимальная подача S_o возрастает с ростом усилия раскатывания: кривые (1, 3) соответствуют усилию $P_1 = 500H$; кривые (2, 3) - $P_2 = 3500H$

Большее значение оптимальные подачи S_o имеют для меньших радиусов деформирующих роликов R (рис. 4 б, 4 в) и больших усилий при раскатывании P : $P_1 = 500H$ (рис. 4 б); $P_2 = 3500H$ (рис. 4 в).

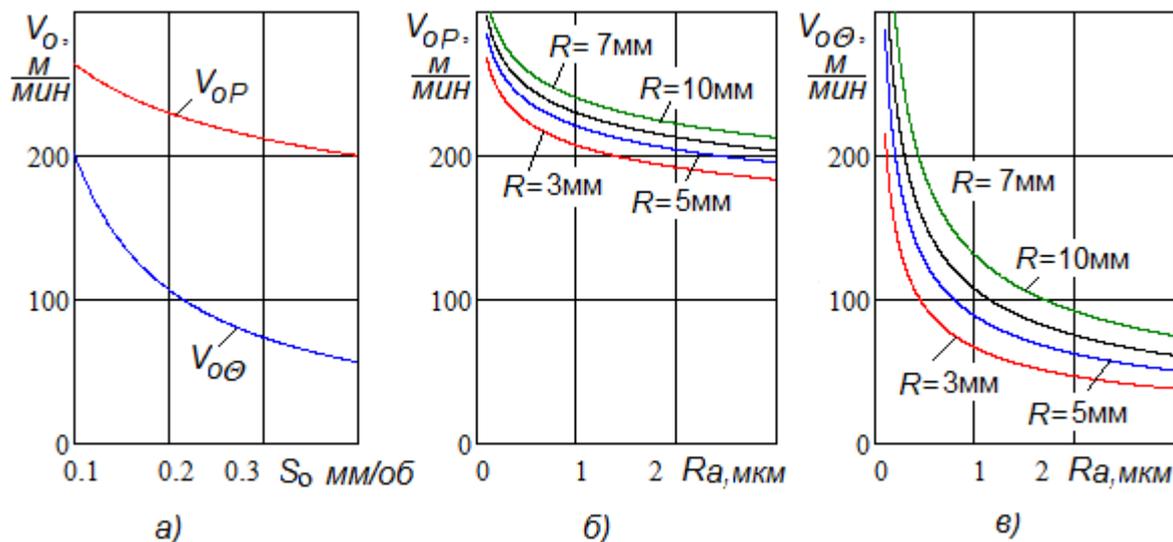


Рисунок 5. Графики зависимости оптимальной скорости резания V_o от оптимальной подачи S_o – а) и шероховатости поверхности – б), в) для различных условий обра-

Графики, представленные на рис. 5 а, иллюстрируют различие в оптимальных скоростях резания V_o , рассчитанных с учетом температурных ограничений $V_{o\theta}$ и по критерию максимальной производительности V_{oP} , причем $V_{o\theta}$ значительно ниже V_{oP} .

Оптимальные скорости резания V_{oP} (рис. 5 б) и $V_{o\theta}$ (рис. 5 в) уменьшаются с увеличением шероховатости R_a и радиуса деформирующего ролика R .

Таким образом, установленные аналитические зависимости (8) позволяют рассчитывать оптимальные по производительности режимы совместного растачивания и раскатывания в зависимости от шероховатости обработанной поверхности для различных усилий обкатывания, радиусов деформирующего ролика, количества роликов в раскатке с учетом температурных ограничений и других условий обработки.

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

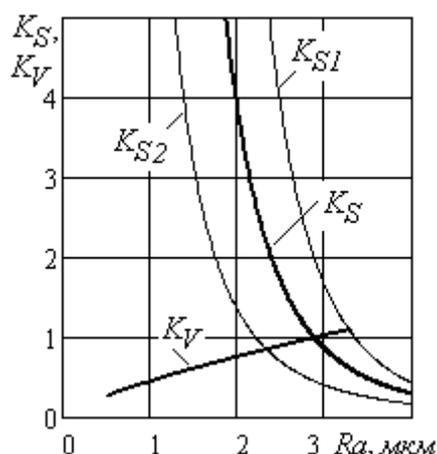


Рисунок 6. Графики зависимости коэффициентов повышения подач K_S и снижения скорости K_V от параметра шероховатости R_a

Следовательно, комбинированная обработка для обеспечения заданной шероховатости поверхности позволяет повысить уровень подач S_{oK} в сравнении с подачами при раскатывании S_{oO} . Скорость в связи с увеличением подачи при комбинированной обработке уменьшается. Коэффициенты повышения подач при совместном растачивании и раскатывании $K_S = S_{oO}/S_{oK}$ и уменьшения скорости $K_V = (K_S)^{-\gamma v}$ в зависимости от параметра шероховатости в сравнении с отдельным раскатыванием представлены на рис. 6 для условий обработки: усилие раскатывания $P_o = 500\text{Н}$, исходная шероховатость при раскатывании $R_{au} = 3,25\text{ мкм}$.

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

Производительность комбинированной обработки в сравнении с раскаткой повышается, несмотря на уменьшение скорости за счет более существенного роста подачи. Коэффициент повышения производительности K_P :

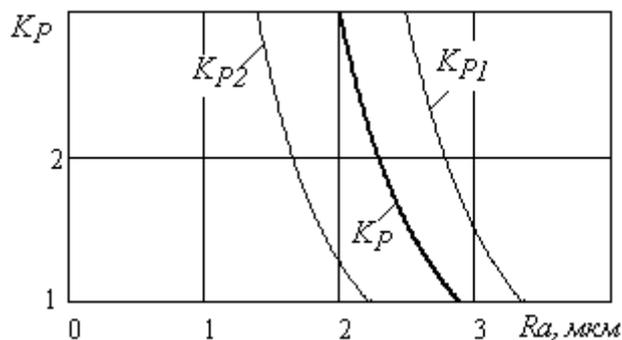


Рисунок 7. Графики зависимости коэффициентов повышения производительности K_P от параметра шероховатости R_a

K_P :

$$K_P = K_S^{1-\gamma v} \tag{9}$$

Графики, представленные на рис. 7, позволяют оценивать возможности повышения производительности K_P в зависимости от параметра шероховатости R_a для различных условий комбинированной обработки.

Коэффициенты повышения производительности K_P при совме-

стном растачивании и раскатывании определяются в большей степени подачей, поэтому характер их изменения в зависимости от параметра шероховатости идентичен изменению коэффициентов повышения подач K_S (рис.6). Соответственно условия обработки для определения коэффициента K_P усилие раскатывания $P_o = 500\text{Н}$, исходная шероховатость при раскатывании $R_{au} = 3,25$ мкм. С уменьшением усилия раскатывания до $P_o = 300\text{Н}$ коэффициент повышения производительности K_{P1} увеличивается. С уменьшением исходной шероховатости при раскатывании до $R_{au} = 2,5$ мкм коэффициент повышения производительности K_{P2} уменьшается в сравнении с K_P .

Таким образом, на основании установленной зависимости (9), выполнена оценка возможностей повышения производительности совместного растачивания и раскатывания в сравнении с отдельным раскатыванием.

3. Заключение

На основании проведенных исследований установлены теоретические и регрессионные зависимости параметров шероховатости поверхностного слоя от условий совместного растачивания и раскатывания внутренних поверхностей вращения с учетом количества деформирующих элементов в раскатках. Обоснована целесообразность использования совместного растачивания и раскатывания при обработке внутренних поверхностей вращения, что позволяет до 2 раз снизить шероховатость поверхности в сравнении с раскатыванием.

Установлены аналитические зависимости оптимальных подач и скоростей совместного растачивания и раскатывания внутренних поверхностей вращения от условий обработки, обеспечивающих максимальную производительность, а также коэффициенты изменения производительности комбинированной обработки растачиванием и раскатыванием в сравнении с обработкой раскатыванием.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Инженерия поверхности детали / А. Г. Суслов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2008. - 320 с.
2. Суслов, А. Г. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: В 2-х томах. Т.1 / Под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. - 480с.; Т.2 — 444с.
3. Ивченко, Т. Г. Обоснование области рационального применения комбинированной обработки точением и поверхностным пластическим деформированием / Т.Г. Ивченко, И.В. Кисиленко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ. - 2018. - №1 (60) – С.148-155.
4. Ивченко, Т.Г. Оценка эффективности применения комбинированной лезвийной и отделочно-упрочняющей обработки ППД / Т.Г. Ивченко, А.Н. Михайлов. Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. - С. 86-89.
5. Петряева, И.А. Исследование особенностей повышения качества поверхностного слоя и производительности обработки за счет применения комбинированной обработки точением и ППД / И. А. Петряева, Е. П. Мельникова, А. П. Рудыч // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2020. - № 2 (69). – С. 71-76.

Поступила в редколлегию 01.02.2022г.