

- [6] Сорокин В.М., Тудакова Н.М. Анализ причин отказов деталей мехпнических систем самолётов и пути обеспечения их долговечности./Наука производству. Современные задачи управления, экономики, технологии и экологии в машино и приборостроении: Матер. Всерос. Науч.-техн. конф. Арзамас: АфНГТУ. 1998-с63-65.
- [7] Сорокин В.М., Танчук С.С., Зотова В.А., Михеев А.В. Влияние финишной обработки отверстий на триботехнические характеристики соединений. журналРВМ. 2011, №6-с. 29-34

**В.М. Сорокин, А.В. Михеев, В.В. Берглезов**  
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Основной задачей технологии металлообрабатывающего производства является изготовление деталей с наименьшими затратами, наибольшими производительностью и качеством поверхности и поверхностного слоя. При этом качество должно удовлетворять условиям эксплуатации [1, 2]. Детали машин, как правило, с заданными чертежом размерами и необходимыми характеристиками качества поверхности: шероховатости ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $t_p$  и др.) твердости (HV,  $\sigma_b$ ) получают резанием, поверхностным пластическим деформированием (ППД). Однако, для обеспечения требуемых характеристик микрорельефа, физико-механических свойств, а также снижения трудозатрат, повышения производительности целесообразно применять способы совмещенной комбинированной обработки (СКО) с использованием операций резания, ППД, нанесения антифрикционных и износостойких покрытий и др., когда элементарные технологические воздействия на объект обработки совмещаются во времени и (или) пространстве.

С этой целью нами разработан, апробирован и запатентован новый процесс СКО и комбинированный инструмент (КИ) (пат. 122055, бюл. 32, [1]), в основу которых положены принципы механо-физико-химического воздействия на обрабатываемую поверхность заготовки. В результате, по сравнению с ранее известными КИ, например, по а.с. 1252146, бюл. 31, обработка предлагаемым КИ позволяет значительно повысить качество обрабатываемой поверхности, ее триботехнологические характеристики, стойкость режущего и деформирующего элементов, производительность обработки. Это достигается за счет одновременной подачи в зоны обработки резцом и деформирующим элементом (вибрирующим шариком) под давлением напорных струй технологических жидкостей (СОЖ и РАС – раствора антифрикционной смеси).

Описание конструкции и принципы работы данного КИ приведены в работах [1, 2]. Здесь рассматриваются результаты теоретико-экспериментального исследования, касающиеся процесса СКО резанием (Р), поверхностным пластическим деформированием (ПД) и воздействием напорных струй технологических жидкостей (НСТЖ) – СОЖ и РАС на зоны контактов резца и шарика с поверхностью заготовки (СПКО-Р-ПД-НСТЖ). При такой совмещенной обработке обеспечиваются более благоприятные условия для процессов резания металла и пластического деформирования за счет подачи под заданным давлением НСТЖ, в частности снижение усилий резания и ПД.

По результатам исследования разработана обобщенная физико-математическая модель процесса обработки, включающая ниже следующие математические зависимости, которые позволяют рассчитать параметры и режимы СПКО-Р-ПД-НСТЖ.

$$q_{\Sigma p} = q_{1p} + q_{2 \text{ СОЖ}}, \quad q_{\Sigma ш} = q_{1ш} + q_{2 \text{ РАС}} \quad (1)$$

$$q_{2\text{СОЖ(РАС)}} = K_1 \rho_{\text{ж}} C_{\text{ж}} v_{\Sigma\text{ТЖ}}, \quad v_{\Sigma\text{ТЖ}} = \frac{0,85 K_T \sigma_{\text{в}}}{\rho_{\text{ж}} C_{\text{ж}} \sin \alpha} \quad (2)$$

$$q_{\Sigma\text{р}} = q_{1\text{р}} + q_{2\text{СОЖ}} \geq 0,85 K_{T_1} \sigma_{\text{в}}, \quad q_{\Sigma\text{ш}} = q_{1\text{ш}} + q_{2\text{РАС}} \geq 0,85 K_{T_2} \sigma_{\text{в}} \quad (3)$$

$$v_{\Sigma\text{ТЖ}} = \sqrt{(C_{\ell} v_{\text{ж}} \sin \alpha)^2 + v_{\text{д}}^2 + v_{\text{с}}^2}, \quad (4)$$

$$n = \frac{120 K_{\text{н}} K_{\text{с}} d_{\text{дл}} v_{\text{н}}}{v_{\text{с}} C_{\text{ж}}} \sqrt{1 - \frac{v_{\text{н}}^2}{C_{\text{ж}}^2}}, \quad d_{\text{дл}} = K_{\text{с}} d_{\text{с}} \frac{v_{\text{н}}}{C_{\text{ж}}} \sqrt{1 - \frac{v_{\text{н}}^2}{C_{\text{ж}}^2}}, \quad (5)$$

$$f_{\text{с}} = \frac{Q}{K_{\text{р}} \sqrt{\frac{2 \Delta p q}{\rho_{\text{ж}}}}}, \quad \Delta p = \frac{0,1 \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}}^2}{g}, \quad (6)$$

$$P_{\text{рез}} = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}, \quad P_y = P_z \operatorname{tg}(\eta + \varphi), \quad P_z = \sigma_{\text{е}} S t (K_{\text{е}} + 1) \quad (7)$$

$$M = C_M \times P_x \times P_z = C_M \times S^{0,7} \times t \quad (8)$$

$$q_{1\text{р}} = \sigma_{\text{е}} (K_{\text{е}} + 1) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\eta + \varphi)}, \quad q_{2\text{ш}} = \pi R_{\text{ш}}^2 \text{HV} \varepsilon C_{\text{к}} \frac{1}{S_0}, \quad \varepsilon = \frac{h}{R_{\text{ш}}} \quad (9)$$

$$q_0 = 4,65 \left( \frac{3\sigma_{\text{е}}}{1 - 2\mu} \right)^3 \frac{(R_m \beta_0)^2}{S_{\phi}}, \quad \beta_0 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (10)$$

где  $q_{\Sigma\text{р}}$  – удельное суммарное давление от действия сил резания и струи ТЖ (СОЖ), МПа;

$q_{\Sigma\text{ш}}$  – удельное суммарное давление от действия сил вибронакатывания и струи ТЖ (РАС), МПа;

$q_{1\text{р}}$  и  $q_{1\text{ш}}$  – удельные давления, создаваемые в зонах обработки резцом и шариком, соответственно, МПа;

$q_{2\text{СОЖ}}$  и  $q_{2\text{РАС}}$  – удельные давления, (нагрузка), создаваемые в зонах обработки от действия напорных струй СОЖ и РАС, соответственно, МПа;

$K_1$  – коэффициент, учитывающий свойства ТЖ (СОЖ или РАС);

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность ТЖ, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{ж}}$  – скорость звука в ТЖ, м/с;  $v_{\Sigma\text{ТЖ}}$  – суммарная скорость воздействия струй ТЖ на обрабатываемую поверхность, м/с;

$K_T$  – коэффициент, учитывающий изменения условий обработки и свойства ТЖ;

$\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности обрабатываемого материала, МПа;

$\alpha$  – угол наклона струи ТЖ.

$K_{T(2)}$  – коэффициенты, учитывающие изменение термодинамического состояния поверхности в результате обработки соответствующей струей ТЖ вращающейся детали с учетом условий поперечного растекания, а также свойств ТЖ;

- $C_\ell$  – коэффициент потерь скорости ТЖ, учитывающий расстояние от сопла до поверхности обрабатываемой детали ( $C_\ell = 0,7-0,9$ );
- $v_{ж}$  – скорость ТЖ на выходе из сопла, м/с;  $v_d$  – скорость вращения детали, м/с;
- $v_s$  – скорость подачи комбинированного инструмента, м/с.
- $n$  – Частота действия струй ТЖ;
- $K_n$  – коэффициент перекрытия зон обработки;
- $K_c$  – эмпирический коэффициент, учитывающий отличие размера контактной зоны обработки от условного диаметра струи ТЖ ( $K_c = 1,2-3$ );
- $v_n$  – скорость с учетом наклона струи  $v_n = v_{ж} \sin \alpha$ , м/с;
- $d_{дд}$  – диаметр действия давлений от ТЖ;
- $d_c$  – диаметр сжатой струи можно принять равным условному диаметру сечения сопла  $d_y$ .
- $Q$  – расход ТЖ через отверстие  $d_y$ ;
- $\Delta p$  – перепад давления, кгс/м<sup>2</sup>;
- $g$  – ускорение силы тяжести, м/сек<sup>2</sup>;
- $K_p$  – коэффициент расхода ТЖ ( $K_p = 0,62-0,625$ ), г/л.
- $P_y, P_z, P_x$  – составляющие силы резания, Н;
- $K_e$  и  $C_M$  – коэффициенты пропорциональности;
- $M$  – момент от сил резания, Н·м ;
- $R_{ш}$  – диаметр шарика, мм;  $S_0, S_\phi$  – площадь отпечатка шарика номинальная и фактическая, мм<sup>2</sup>;
- $h$  – глубина вдавливания шарика при вибронакатывании, мм;
- $C_k$  – коэффициент учитывающий вибрацию шарика ( $C = 0,6 - 0,8$ )
- $E_1, E_2$  – модули упругости первого рода заготовки и шарика;
- $q_0$  – удельное давление при минимальной нагрузке на шарик, МПа;
- $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты Пуассона заготовки и шарика.

Анализ формул обобщенной физико-математической модели показывает, что эффективность и качество процесса СКО с воздействием напорных струй ТЖ зависят от конструктивно-технологических параметров процесса, условий обработки, геометрических параметров КИ и физико-механических характеристик контактирующих тел. Для оценки влияния ТЖ необходимо проводить эксперименты по определению зависимости интенсивности воздействия напорных струй на процесс перехода металла из упругого состояния в упругопластическое. Эксперимент позволяет определить влияние на процессы резания и упрочения инструментом воздействия напорных струй ТЖ, а так же без них.

Использование предложенных математических зависимостей для заданных технологических условий обработки Р-ПД-НСТЖ позволяет определить основные конструктивно-технологические параметры процесса и комбинированного инструмента ( $R_{ш}, V_\Sigma, d_{gg}, f_c$  и др.). Например, задаваясь  $\varepsilon = h/R_{ш} \approx 0,0001-0,0003$ , параметрами канавки РМР глубиной 2–5 мкм, шириной 0,2–0,3 мм определяются величины  $R_{ш} = 2-$

3 мм;  $P_{ш} = 50 - 150$  Н,  $\Delta p = (15-25) \cdot 10^5$  Па;  $V_n = 130 - 160$  м/мин;  $V_{\Sigma} = 600-900$  м/мин.

**Список литературы:**

- [1] Сорокин В.М., Тудакова Н.М., Михеев А.В. и др. Многофункциональное устройство для режуще-деформирующей обработки с нанесением антифрикционных покрытий. / Вопросы вибрационной технологии. Межвуз. сб. науч. статей. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2012.-с. 116–119.  
[2] Сорокин В.М., Иванов В.В., Колпаков А.В., и др. Устройство для комплексной обработки трущихся поверхностей валов. / Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения. Сб. науч. трудов. Орск: Изд. ОГТИ (филиал) ОГУ. 2012.- с. 117–120.

*В.М. Сорокин, А.В. Михеев, В.В. Берглезов, Н.М. Тудакова*  
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Для оценки эффективности комбинированной обработки поверхностей деталей проводили комплекс исследований на цилиндрических образцах–валах с наружным диаметром 30–60 мм; 80–100 мм, длиной 600–700 мм из сталей 45, 40, 30ХГСА, получивших распространение при изготовлении штоков различных пневмо- и гидроагрегатов. Обработку проводили на металлорежущем станке мод. 1А616 при следующих условиях и режимах, полученных расчетно-экспериментальным путем, исходная точность заготовки – 10–11 квалитет, чашечный резец  $\varnothing 60$  мм с режущим элементом из материала Т15К6, деформирующий элемент – шарик диаметром 5–6 мм (ШХ15, HRC 60), скорость вращения заготовки 130–160 м/мин, осевая подача инструмента 0,08–0,15 мм/об, усилие деформирования 50–150 Н, амплитуда колебаний шарика 1–1,5 мм, глубина резания 1,5–2 мм, фаска на торце заготовки, выполненная предварительно высотой 4 мм, статический натяг деформирования 1,5–2 мм, площадь сечения сопла 1–1,5 мм<sup>2</sup>;  $V_{\Sigma} = 10-20$  м/с, СОЖ – эмульсия под давлением  $(15-20) \cdot 10^5$  Па, раствор антифрикционной смеси – состав масс %: медь хлорная – 10, олово двуххлористое – 3–4, стеариновая кислота – 0,5, уксусная кислота – 8–10, мочевины (карбамид) – 1, дисульфид молибдена – 4, вода – 10, глицерин (динамитный) – остальное, давление подачи РАС –  $20-25 \cdot 10^5$  Па.

В результате исследований, после такого комплексного воздействия на заготовку, выявлено, что при совмещенной обработке Р–ПД–НСТЖ на указанных выше режимах обеспечивается устойчивое резание и упрочнение вибронакатыванием металла, сплошное равномерное покрытие пленкой толщиной до 1,5 мкм на микровыступах неровностей обработанной поверхности с шероховатостью после обработки резцом  $0,6 < R_a < 5$  мкм. В зависимости от режима обработки и исходной шероховатости происходит изменение (улучшение) в сравнении с обработкой без РАС параметров качества поверхностного слоя: по критериям  $R_a$  с 0,63–0,45 до 0,3–0,16 мкм;  $S_m$  с 0,3–0,6 до 1 мм;  $t_{p=50\%}$  с 38–40% до 32%; радиуса скругления вершин  $r_1$  и впадин  $r_2$  микронеровностей соответственно  $r_1$  с 0,8–1,2 до 2 мм и  $r_2$  с 1,4–1,7 до 2,5–3 мм. Таким образом, на поверхности формируется более пологий микрорельеф с особой вытянутой текстурой покрытия и тончайшего слоя металла основы толщиной до 1,5 мкм. Это происходит за счет благоприятного действия РАС, обеспечивающей смазку при пла-