

УДК 621.941.01

**ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
ПОД ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ***д-р техн. наук, доц. И.А. КАШТАЛЬЯН**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассматривается метод формирования рельефа наружных и внутренних поверхностей деталей машин под газотермическое напыление на токарных станках с числовым программным управлением путем линейного и модулированного изменения подачи в функции пути. Представлены математические модели регулирования подачи. Приведены зависимости, устанавливающие взаимосвязь параметров управляющего воздействия с параметрами шероховатости и волнистости обработанных поверхностей.

Введение. Работоспособность деталей с покрытиями в значительной степени определяется прочностью сцепления нанесенного слоя с основой. При этом важной характеристикой основы является площадь поверхности, по которой осуществляется контакт с покрытием (с ее увеличением увеличивается и прочность сцепления). Следовательно, предварительная обработка поверхности основы с заданными характеристиками рельефа становится важным фактором прочного сцепления покрытия с деталью. Среди всего многообразия существующих способов подготовки поверхности под покрытия выделяют механические (точение, шлифование, галтовка и др.) [1; 2]. Отличительной особенностью этих способов является простота и возможность использования универсального технологического оборудования. Вместе с тем следует полагать, что для каждой системы «основа – покрытие» существуют некоторые оптимальные параметры рельефа поверхности, обеспечение которых позволяет добиться требуемой прочности сцепления. Часто это является сложной технологической задачей (особенно при подготовке под покрытие поверхностей вращения фасонного профиля). Для таких поверхностей характерным является неравномерный износ при их эксплуатации, причинами которого, например, являются различные величины удельного давления, силы трения и скорости скольжения на различных участках сопрягаемых поверхностей. Чтобы обеспечить равномерный износ на всех участках поверхности, прочность сцепления покрытия с основой на них может быть переменной. Следовательно, площадь, по которой осуществляется контакт основы с покрытием для участков поверхности одинаковой величины, расположенных в различных ее местах, должна быть также переменной. Фактически имеет место задача обеспечения нерегулярного рельефа поверхности при ее обработке под покрытие.

Основная часть. Анализ способов подготовки поверхностей деталей под нанесение покрытий показал, что переменный рельеф поверхностей вращения может быть получен на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) путем регулирования подачи. Причем целесообразно реализовать те изменения подачи, которые являются универсальными, т.е. могут быть использованы как типовые решения. К ним следует отнести линейное и модулированное изменение подачи в функции пути [3].

Программные модули, реализующие указанные изменения подачи, были включены в технологическое программное обеспечение микропроцессорного устройства ЧПУ КМ 65. При их разработке реализован способ управления, при котором параметр, используемый в качестве управляющего воздействия (подача), изменяется приращениями в функции пути, а уровень сигнала управления между приращениями остается постоянным и определяется частотой управляющих импульсов (формируется в функции времени).

Линейное изменение минутной подачи осуществляется приращениями величиной ΔS по мере обработки участка траектории длиной Δl (рис. 1). Управляющее устройство при этом реализует зависимость:

$$S_k = S_n \pm l \Delta S / \Delta l ,$$

где S_n и S_k – начальная и конечная скорости подачи соответственно, мм/мин; l – длина обработки, на которой подача изменяется от S_n до S_k , мм.

Значение ΔS выбирают из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин; значение Δl задают со знаком «плюс» или «минус» и принимают кратным единице дискретности перемещения (длине перемещения исполнительного органа станка при подаче от устройства ЧПУ одного импульса). При этом знак «плюс» указывает на увеличение подачи (разгон), а знак «минус» – на ее уменьшение (замедление). Текущее значение подачи после каждого приращения находится на прямой, начало которой в координатах «минутная подача – длина перемещения» определяется начальной скоростью подачи S_n , а угол наклона – отношением $\Delta S / \Delta l$. Параметры переменной подачи S_n , ΔS , Δl и направление изменения (знак приращения при Δl) задаются в кадре управляющей программы совместно с геометрической и технологической информацией.

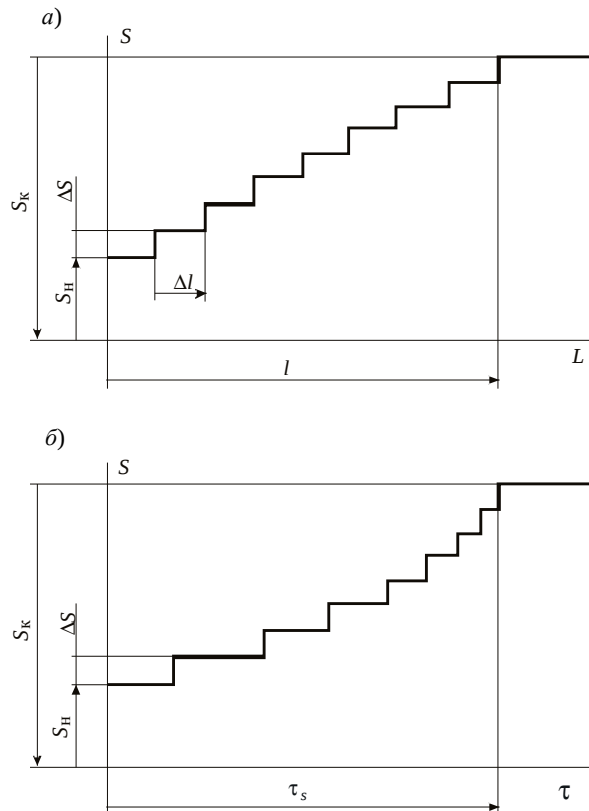


Рис. 1. Диаграммы изменения скорости подачи в функции пути (а) и в функции времени (б)

При реализации данного алгоритма время τ_s обработки участка поверхности заготовки длиной l равно сумме времен обработки участков длиной Δl на различной скорости подачи. В случае увеличения скорости подачи (разгона)

$$\tau_s = \sum_{k=1}^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H + (k-1)\Delta S},$$

где n_s – число приращений подачи на участке длиной l ($n_s = l/\Delta l$); k – переменная.

Приняв в качестве пределов интегрирования порядковые номера 1 и n_s членов ряда, между которыми необходимо определить сумму, получим

$$\tau_s = \int_1^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H + (k-1)\Delta S} dk.$$

После преобразования этого выражения

$$\tau_s = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln(S_H + n_s \Delta S - \Delta S) - \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln S_H,$$

откуда

$$n_s = \frac{e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H}{\Delta S}. \quad (1)$$

Расстояние Δl между приращениями подачи есть величина постоянная для каждого члена ряда, поэтому текущее значение координаты точки, в которой находится вершина резца в момент времени τ_s , может быть определено по формуле

$$l_{\tau_s} = n_s \Delta l. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) получим

$$l_{\tau_s} = \frac{\Delta l}{\Delta S} \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H \right). \quad (3)$$

Если предположить, что время одного оборота заготовки $\tau_o = \tau_s - \tau'_s$, то разность пути l_{τ_s} , пройденного за время τ_s , и пути $l_{\tau'_s}$, пройденного за время τ'_s , является подачей на оборот S_o :

$$S_o = l_{\tau_s} - l_{\tau'_s}. \quad (4)$$

Используя зависимость (3), выражение (4) можно представить в следующем виде

$$S_o = \frac{\Delta l}{\Delta S} \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H \right) - \frac{\Delta l}{\Delta S} \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau'_s} S_H + \Delta S - S_H \right). \quad (5)$$

После замены в зависимости (5) τ'_s на разность $\tau_s - \tau_o$ и преобразований получим

$$S_o = \frac{S_H \Delta l}{\Delta S} \left(1 - 1/e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_o} \right) e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s}. \quad (6)$$

Экспериментальная проверка влияния параметров переменной подачи на шероховатость поверхности проводилась с использованием токарного станка с ЧПУ мод.1734ФЗ (дискретный привод подачи с

шаговым двигателем) и станка мод.1А734Ф3 (следящий привод подачи с высокомоментным двигателем постоянного тока). Обработывались образцы из стали 40ХН. Обработка велась подрезно-проходным резцом с механическим креплением трехгранной режущей пластины из твердого сплава Т15К6. Геометрические параметры режущей части: $\varphi = 95^\circ$; $\varphi_1 = 5^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 12^\circ$; $\lambda = 8^\circ$; $r_e = 0,8$ мм. Запись микронеровностей по всей длине поверхности, обработанной с переменной подачей, проводилась на профилометре-профилографе мод.201. Шероховатость поверхности оценивалась по значениям Rz и Ra . Графики строились по средним значениям, полученным в результате обработки тридцати профилограмм.

Влияние подачи на шероховатость поверхности при её плавном увеличении от $S_n = 0,02$ мм/об до $S_k = 0,5$ мм/об, а затем плавном уменьшении до первоначального значения исследовали при обработке образцов диаметром 60 мм, частоте вращения $n_u = 500$ об/мин и глубине резания $t = 1$ мм. Заготовка в патроне крепилась консольно (длина консоли 50 мм). Параметры переменной подачи были приняты следующими: $\Delta S = 0,1$ мм/мин; $\Delta l = 0,01$ мм.

Установлено (рис. 2), что для случая изменения подачи в сторону разгона значения Rz и Ra больше. Это заметнее на участках, обработанных с малыми подачами (диапазон от 0,04 до 0,24 мм/об) на станках, оснащенных дискретным приводом подачи. Величины Rz и Ra при обработке с постоянной подачей в свою очередь значительно больше, чем при обработке с переменной.

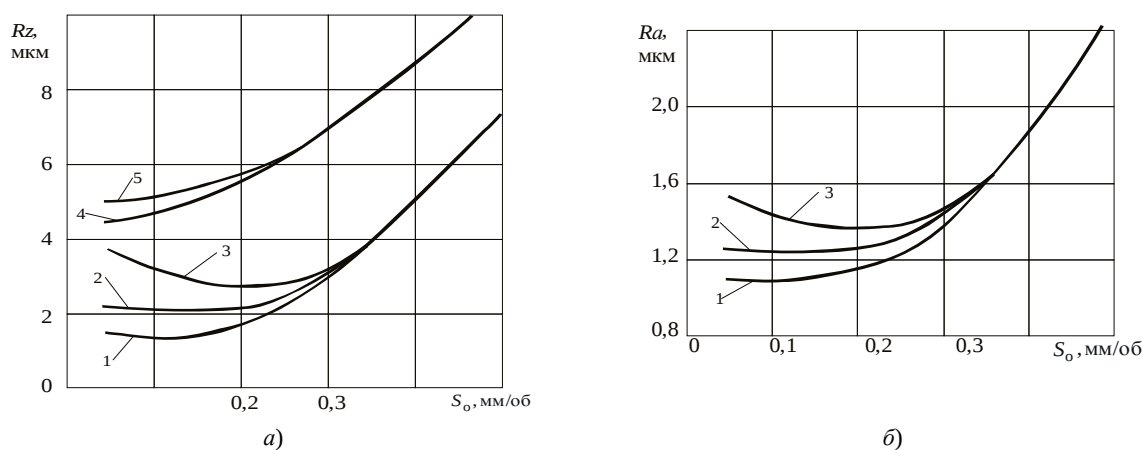


Рис. 2. Зависимость высоты неровностей Rz (а) и среднего арифметического отклонения профиля Ra (б) при точении:
1, 2 – соответственно замедленное и ускоренное перемещение резца с $\varphi_1 = 5^\circ$;
3 – обработка с постоянной подачей резцом с $\varphi_1 = 5^\circ$;
4, 5 – соответственно замедленное и ускоренное перемещение резца с $\varphi_1 = 45^\circ$

Явление образования более «чистой» поверхности при точении с переменной подачей по сравнению с обычной обработкой можно объяснить следующим образом. На токарных станках с ЧПУ и шаговым приводом подач скорость перемещения исполнительного органа определяется частотой управляющих импульсов, поступающих на обмотки шагового двигателя. Изменение подачи в диапазоне от 0,04 до 0,24 мм/об при частоте вращения шпинделя $n_u = 500$ об/мин и единице дискретности $Z_0 = 0,01$ мм соответствует частоте управляющих импульсов $\Psi_{0z} = 33...167$ Гц. В этом диапазоне частот импульсные свойства шагового двигателя проявляются в большей степени (перемещение исполнительного органа характеризуется чередованием скачков и остановок). Такое воздействие на механическую систему привода подач вызывает колебания ее отдельных элементов.

Исходя из тех же графиков (см. рис. 2) можно предположить, что уменьшение высоты микронеровностей при замедленном перемещении резца связано со значительной скоростью изменения подачи и малыми значениями вспомогательного угла в плане φ_1 ($\varphi_1 = 5^\circ$). Действительно, при значительной скорости изменения подачи происходит сближение вершины вновь образовавшегося гребешка с вершиной гребешка, образованного на предшествующем обороте заготовки. При этом резец вспомогательной режущей кромкой частично срезает вершины образованных ранее микронеровностей, величина которых ввиду пластических и упругих деформаций в зоне резания всегда значительно больше величины, определяемой только подачей и геометрией режущей части резца. С увеличением вспомогательного угла в плане φ_1 эффект уменьшения высоты микронеровностей при замедленном перемещении резца становится менее заметным.

Данное явление можно объяснить тем, что с увеличением вспомогательного узла в плане ϕ_1 до 45° вспомогательная режущая кромка, расположенная под большим углом к направлению подачи, не будет производить сглаживания острых вершин микронеровностей. Однако в данном случае ввиду плавного уменьшения толщины среза наступает момент, когда резец перемещается в слое металла, упрочнённого (наклепанного) на предшествующем обороте заготовки. При этом происходит частичное суммирование наклепов (следовательно и микротвердостей) [4].

Снижение вязкости обрабатываемого материала за счет наклёпа поверхностного слоя ведет к уменьшению шероховатости обработанной поверхности. По данным А.А. Маталина, такое явление наблюдается при развёртывании отверстий после зенкерования. Если припуск, оставленный на развёртывание, меньше глубины наклепанного зенкерованием слоя, поверхность в результате развёртывания имеет минимальную высоту микронеровностей [5].

При формообразовании закон изменения подачи в каждом конкретном случае определяется конструктивными параметрами поверхности и требованиями к ее рельефу. Существующее множество законов изменения подачи с приемлемой точностью могут быть аппроксимированы отрезками прямых, реализуемых по представленному алгоритму изменения минутной подачи в функции пути.

Модулированное изменение подачи заключается в периодическом ее увеличении от $S_{\min}$ до $S_{\max}$ с последующим снижением до первоначального значения. Подача между ее пиковыми значениями изменяется приращениями на величину ΔS по мере обработки участков Δl между этими приращениями. Для этого устройство ЧПУ поочередно реализует зависимости:

$$S_{\max} = S_{\min} + n_s \Delta S \quad \text{и} \quad S_{\min} = S_{\max} - n_s \Delta S,$$

где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от $S_{\min}$ до $S_{\max}$ (рис. 3).

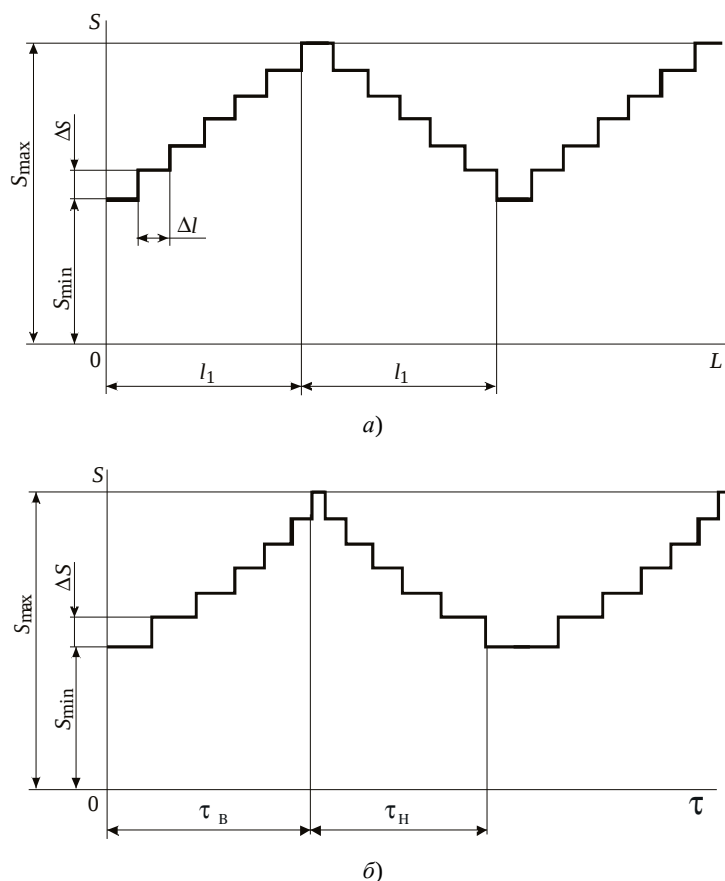


Рис. 3. Диаграммы модулированного изменения подачи в функции пути (а) и в функции времени (б)

Длина пути разгона (замедления) при этом определяется из выражения $l_1 = n_s \Delta l$; значение ΔS выбирается кратным 0,1 мм/мин; Δl принимается кратной единице дискретности.

Время разгона τ_b на участке длиной l_1 при реализации данного алгоритма может быть представлено выражением:

$$\tau_b = \frac{\Delta l}{\Delta S} \left[\ln(S_{\min} + n_s \Delta S - \Delta S) - \ln S_{\min} \right], \quad (7)$$

где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от $S_{\min}$ до $S_{\max}$.

Заменив в зависимости (7) n_s его значением из выражения $n_s = (S_{\max} - S_{\min}) / \Delta S$ и выполнив преобразование, получим

$$\tau_b = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln \frac{S_{\max} - \Delta S}{S_{\min}}. \quad (8)$$

Время замедления (изменения подачи от $S_{\max}$ до $S_{\min}$) после соответствующих преобразований можно представить как

$$\tau_n = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln \frac{S_{\max}}{S_{\min} + \Delta S}. \quad (9)$$

Время одного цикла τ_u^m модулированного изменения подачи можно определить, используя зависимость $\tau_u^m = \tau_b + \tau_n$. Подставляя в нее значение τ_b из выражения (8) и значение τ_n из выражения (9), после преобразования получим

$$\tau_u^m = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln \frac{S_{\max} (S_{\max} - \Delta S)}{S_{\min} (S_{\min} + \Delta S)}.$$

Основной причиной образования волнистости является отклонение действительной траектории движения обрабатываемой заготовки и инструмента от заданной. Периодическое увеличение (уменьшение) подачи в процессе обработки заготовки приводит к колебаниям сил резания и, как следствие, колебаниям величины деформаций в технологической системе, к образованию поперечной волнистости.

Экспериментальная проверка влияния модулированной подачи на образование поперечной волнистости проводилась при точении в патроне заготовок из стали 40ХН диаметром 70 и длиной 50 мм. Было обработано пять партий заготовок по 10 штук в каждой. Принятые параметры режима резания: скорость резания $v = 120$ м/мин; глубина резания $t = 1$ мм; длина обработки l_1 , соответствующая пути, на котором подача изменяется между ее пиковыми значениями, была равна 2,5 мм.

Для каждой партии заготовок выбирался определенный размах изменения подачи. Причем верхнее пиковое значение подачи, всегда было равно 0,4 мм/об. Волнистость обработанной поверхности записывали и измеряли по параметру Ra на профилографе-профилометре модели 201 с помощью приспособления для проверки волнистости. Ощупывание поверхности производилось щупом с радиусом сферы 2 мм.

Исследование волнограмм показало, что шаг образующихся поперечных волн всегда равен удвоенной длине l_1 , на которой происходит увеличение (уменьшение) подачи. Высота же волн зависит от величины размаха между пиковыми значениями подачи. Большому размаху соответствует большая высота волны.

Проведенный анализ большого количества волнограмм (более 100 штук), сил резания, возникающих при модулированном изменении подачи, и жесткости технологической системы показал, что высота поперечной волнистости целиком зависит от колебания составляющей силы резания P_y и жесткости технологической системы. Осциллограммы составляющей силы резания P_y при точении с модулированной подачей и соответствующие им волнограммы приведены на рисунке 4.

Действительно, периодическое увеличение (уменьшение) подачи в процессе обработки заготовки приводит к колебаниям сил резания и, как следствие, к колебаниям величины деформаций в технологической системе. При этом величина деформации технологической системы y от составляющей силы резания P_y выражается зависимостью

$$y = P_y / J, \quad (10)$$

где J – жесткость технологической системы, Н/мм.

Используя известную из теории резания зависимость для определения P_y , можно записать:

$$P_{y_{\max}} = C_{P_y} S_{o_{\max}}^{y_{P_y}} t^{x_{P_y}} v^{z_{P_y}}, \quad (11)$$

$$P_{y_{\min}} = C_{P_y} S_{o_{\min}}^{y_{P_y}} t^{x_{P_y}} v^{z_{P_y}}, \quad (12)$$

где $P_{y_{\max}}$ и $P_{y_{\min}}$ – максимальное и минимальное значения радиальной составляющей силы резания при модулированном изменении подачи, Н.

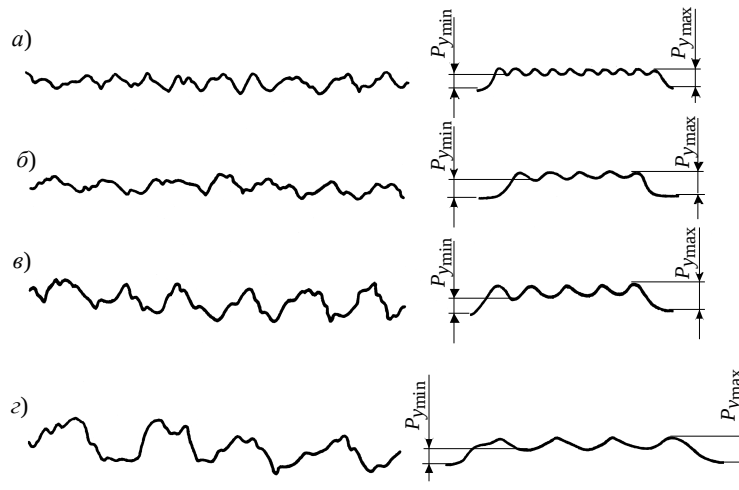


Рис. 4. Волнограммы поверхностей, обработанных с модулированной подачей (увеличение: вертикальное $\times 2000$, горизонтальное $\times 8$), и соответствующие им осциллограммы составляющей силы резания P_y 2000,

а – $S_{o_{\min}} = 0,24$ мм/об; $S_{o_{\max}} = 0,4$ мм/об; $l_1 = 0,4$ мм; б – $S_{o_{\min}} = 0,24$ мм/об; $S_{o_{\max}} = 0,4$ мм/об; $l_1 = 0,8$ мм;
в – $S_{o_{\min}} = 0,20$ мм/об; $S_{o_{\max}} = 0,5$ мм/об; $l_1 = 0,8$ мм; г – $S_{o_{\min}} = 0,20$ мм/об; $S_{o_{\max}} = 0,5$ мм/об; $l_1 = 1,25$ мм

В первом приближении высотой поперечной волны W_1 при модулированном изменении подачи является разность между деформациями технологической системы $y_{\max}$, определяемой силой $P_{y_{\max}}$, и $y_{\min}$, определяемой силой $P_{y_{\min}}$, то есть

$$W_1 = y_{\max} - y_{\min}. \quad (13)$$

Используя зависимость (10), выражение (13) можно представить в следующем виде:

$$W_1 = \frac{P_{y_{\max}} - P_{y_{\min}}}{J}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) значения $P_{y_{\max}}$ и $P_{y_{\min}}$ соответственно из (11) и (12), получаем

$$W_1 = \frac{K_{P_y} C_{P_y} (S_{o_{\max}}^{y_{P_y}} - S_{o_{\min}}^{y_{P_y}}) t^{x_{P_y}} v^{z_{P_y}}}{J}.$$

В приведенном выражении коэффициент K_{P_y} равен отношению среднего значения радиальной составляющей силы резания P'_y при модулированном изменении подачи к радиальной составляющей силы резания P_y при обычной обработке с подачей, равной среднему значению модулированной.

Большинство подрезно-проходных резцов с механическим креплением твердосплавной пластины обладают отрицательной жесткостью (явление, когда перемещение y противоположно направлению действия радиальной составляющей P_y). Это относится к использованному в экспериментах подрезно-

проходному резцу. Наличие отрицательной жесткости в данном случае объясняется поворотом пластины вокруг штифта под действием составляющей силы резания P_x . В результате поворота происходит смещение режущей кромки в направлении, перпендикулярном направлению действия составляющей силы резания P_x , на величину y_{nl} . Величина y_{nl} в каждом конкретном случае зависит от величины P_x и жесткости узла крепления пластины твердого сплава J_{nl} . Как правило, величина y_{nl} соизмерима с величиной деформации технологической системы y , вызываемой составляющей силы резания P_x , и может быть выражена зависимостью $y_{nl} = P_x / J_{nl}$. При этом высота поперечной волны W_2 , которая определяется отрицательной жесткостью твердосплавной пластины, может быть определена из следующего выражения:

$$W_2 = \frac{K_{P_x} C_{P_x} (S_{o_{max}}^{y_{P_x}} - S_{o_{min}}^{y_{P_x}}) t^{x_{P_x}}}{J_{nl}}.$$

Полная высота волны на поверхности, обработанной с модулированной подачей резцом с механическим креплением режущей пластины, равна

$$\vec{W} = \vec{W}_1 + \vec{W}_2.$$

Волнограммы поверхностей, обработанных подрезно-проходным резцом с механическим креплением пластины твердого сплава, представлены на рисунке 5.

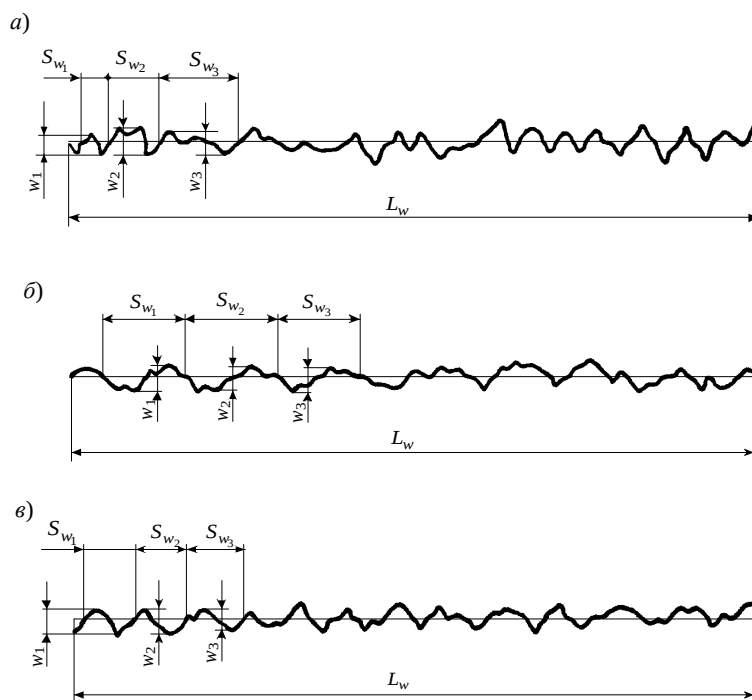


Рис. 5. Волнограммы поверхностей заготовок из стали 40ХН, обработанных подрезно-проходным резцом с постоянной и модулированной подачей ($v = 120$ м/мин; $t = 1$ мм)

а – $S_o = 0,32$ мм/об; б – $S_{o_{min}} = 0,24$ мм/об; $S_{o_{max}} = 0,4$ мм/об; $l_1 = 0,8$ мм;

в – $S_{o_{min}} = 0,24$ мм/об; $S_{o_{max}} = 0,4$ мм/об; $l_1 = 0,4$ мм

Анализ представленных волнограмм показал, что образование поперечной волнистости связано с явлением затягивания резца в металл, которое возникает вследствие большого значения главного угла в плане ϕ (обработка велась резцом с $\phi = 95^\circ$) и податливости узла крепления пластины твердого сплава. Это приводит к тому, что шероховатость выступа волны значительно меньше шероховатости впадины, образованной на большей подаче (поверхность выступа тем «чище», чем она ближе к вершине). Кроме этого, радиус выступа значительно больше радиуса впадины.

При уменьшении длины обработки l_1 , на которой осуществляется изменение подачи между ее верхним и нижним пиковыми значениями, уменьшается расстояние между смежными выступами волны.

Для значений l_1 , близких к среднему значению подачи на оборот S_o , волнистость фактически переходит в шероховатость, образованную неровностями с шагом между средними выступами, равным $2l_1$.

Форма и размеры неровностей при этом определяются параметрами модулированного изменения подачи $S_{o_{min}}$, $S_{o_{max}}$, l_1 . Задавая различные сочетания указанных параметров, легко получить регулярный профиль обрабатываемой поверхности как по высоте неровностей, так и по их форме.

Закключение. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что требуемые законы изменения параметров рельефа поверхности под газотермическое напыление могут быть получены на токарных станках с ЧПУ путем линейного изменения подачи в функции пути. Реализация функции модулированного изменения подачи позволяет получить на обрабатываемой под покрытие поверхности поперечную волнистость, параметры которой определяются размахом изменения подачи между ее пиковыми значениями, длиной пути разгона (замедления) и жесткостью технологической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов, К.Ф. Подготовка поверхностей деталей для нанесения покрытий / К.Ф. Скворцов. – М.: Машиностроение, 1980. – 64 с.
2. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Машиностроение, 1992. – 432 с.
3. Каштальян, И.А. Математические модели и алгоритмы управления нестационарными процессами формообразования на станках с ЧПУ / И.А. Каштальян // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 6. – С. 18–24.
4. Каштальян, И.А. Формирование микрорельефа поверхности при нестационарном резании на токарных гибких производственных модулях / И.А. Каштальян // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2003. – № 1. – С. 52–57.
5. Маталин, А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
6. Лоповок, Т.С. Волнистость механически обработанных поверхностей / Т.С. Лоповок // Стандарты и качество. – 1974. – № 3. – С. 48–51.

Поступила 04.03.2014

THE FORMING OF MACHINE PARTS WORKING SURFACES RELIEF FOR GAS-THERMAL SPRAYING

I. KASHTALYAN

The method of machine parts external and internal surfaces relief forming for gas-thermal spraying on lathes with numerical program control by the linear and modulated change of the feed in the function of path is considered. The mathematical models and algorithm of feed control are presented. The functions, that establish interrelation of control action parameters and parameters of machined surfaces roughness and waviness, are sited.