

Р.В. Гуров, д.т.н.,

А.Н. Щербаков, к.т.н.

(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, Бульвар 50 лет Октября, 7)

E-mail: grwl@yandex.ru, taiga78@list.ru

Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием

Предложены зависимости для определения формируемых параметров качества поверхностного слоя при отделочной и отделочно-упрочняющей обработке поверхностно-пластическим деформированием, определения режимов обработки, геометрических параметров инструмента с учетом исходных параметров качества поверхностного слоя. Предложены критерии выбора метода обработки, обеспечивающего требуемые параметры качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства поверхности.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование; отделочно-упрочняющая обработка; режимы обработки; геометрические параметры инструмента.

R.V. Gurov, Dr. Sc. Tech.,

A.N. Shcherbakov, Can. Sc. Tech.

(Bryansk State Technical University,

7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

Finish-strengthening treatment with surface-plastic deformation

There are offered dependences for the definition of parameters formed for surface layer quality when finishing and finish-strengthening with surface-plastic deformation, for the definition of processing modes, tool geometrical parameters taking into account initial parameters of surface layer quality. Criteria for the choice of the processing method ensuring quality parameters required for a surface layer and surface operation properties are offered.

Keywords: surface plastic deformation; finish-strengthening treatment; processing modes; tool geometrical parameters.

Анализ ряда работ [1] и экспериментальные исследования, позволили разработать физическую картину процесса деформирования неровностей шероховатости при отделочно-упрочняющей обработке поверхностно-пластическим деформированием (ОУО ППД) [2]. Схема формирования неровностей по разработанной картине представлена на рис. 1.

При деформировании неровностей материал из ее вершины практически равномерно перераспределяется во впадину неровности. При этом профиль впадины меняет свою фор-

му несущественно. Поэтому можно говорить о том, что вытесненный из вершины материал, перераспределяясь, равномерно приподнимает впадину шероховатости на величину $y_{\text{осн}}$.

Зависимость для определения высоты неровности шероховатости при ОУО ППД [1, 2] имеет вид:

$$Rz = h_1 + h_3 + h_4, \quad (1)$$

где составляющая h_1 – обусловлена геометрией и кинематикой перемещения инструмента; h_3 – определяется величиной пластических деформаций неровностей шероховатости;

h_4 – шероховатостью рабочей поверхности инструмента.

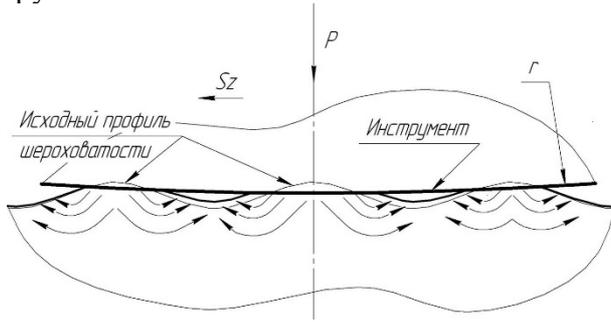


Рис. 1. Схема деформирования неровностей при ОУО ППД:

r – профильный радиус инструмента; P – рабочее усилие; Sz – направление подачи

Для расчета составляющей h_3 использовалась следующая зависимость:

$$h_3 = Rz_{исх} - (y_k + y_{осн}), \quad (2)$$

где y_k – величина контактного сближения инструмента и поверхности; $y_{осн}$ – величина поднятия впадины неровности.

Поскольку форма вершины и впадины неровности описывается разными зависимостями, то соотношение между y_k и $y_{осн}$ определяется различными выражениями в зависимости от величины y_k . Переходное значение величины контактного сближения инструмента и поверхности $y_{k\text{ пер}}$ определяется из зависимости:

$$\frac{Sm \cdot tm}{200Rp^v} \cdot \left(\frac{y_{k\text{ пер}}^{v+1}}{v+1} + \frac{Rp^{v+1} - y_{k\text{ пер}}^{v+1}}{v+1} - Rp \cdot y_{k\text{ пер}}^v + y_{k\text{ пер}}^{v+1} \right) = (Rp - y_{k\text{ пер}}) \cdot \frac{Sm(100 - t_m \left(\frac{y_{k\text{ пер}}}{Rp}\right)^v)}{200}. \quad (3)$$

При $y_k < y_{k\text{ пер}}$ соотношение между y_k и $y_{осн}$ определяется выражением:

$$\frac{Sm \cdot tm}{200Rp^v} \cdot \frac{y_k^{v+1}}{v+1} = y_{осн} \cdot \frac{Sm \cdot (100 - t_m \left(\frac{y_k}{Rp}\right)^v)}{200} - \frac{Sm \cdot t_m}{200 \cdot Rp^v} \left(\frac{(y_{осн} + y_k)^{v+1} - y_k^{v+1}}{v+1} - y_{осн} \cdot y_k^v \right). \quad (4)$$

Относительную контактную длину tp_k определяют по зависимости:

$$tp_k = t_m \left(\frac{y_k + y_{осн}}{Rp} \right)^v. \quad (5)$$

При $y_k > y_{k\text{ пер}}$ соотношение между y_k и $y_{осн}$ определяется выражением:

$$\begin{aligned} \frac{Sm \cdot tm}{200Rp^v} \cdot \frac{y_k^{v+1}}{v+1} = y_{осн} \cdot \frac{Sm \cdot (100 - t_m \left(\frac{y_k}{Rp}\right)^v)}{200} - \\ - \frac{Sm}{200} \left[100 \cdot (y_k + y_{осн} - Rp) - \frac{100 - t_m}{vB + 1} \cdot \left(\frac{(R_{max} - (y_k + y_{осн}))^{vB+1}}{(R_{max} - Rp)^{vB}} - (R_{max} - Rp) \right) \right] - \\ - \frac{Sm \cdot t_m}{200 \cdot (v+1)} \left(Rp - \frac{(y_k)^{v+1}}{Rp^v} \right) + \frac{Sm \cdot t_m \cdot y_k^v \cdot y_{осн}}{200 \cdot Rp^v}. \end{aligned} \quad (6)$$

Относительную контактную длину tp_k определяют по зависимости:

$$tp_k = 100 - (100 - t_m) \left(\frac{R_{max} - (y_k + y_{осн})}{R_{max} - Rp} \right)^{vB}. \quad (7)$$

При упругом восстановлении происходит изменение профиля шероховатости. Для его определения [3] было принято, что упругое восстановление профиля происходит только в пределах ширины контакта неровности с инструментом, а величина упругого восстановления в каждой i -ой точке контакта неровности с инструментом $y_{упр i}$ зависит от величины сближения y_k в данной точке.

Для построения кривой профиля при упругом восстановлении задается координата x положения точки по оси ординат и определяется величина упругого восстановления по зависимости:

Для построения кривой профиля при упругом восстановлении задается координата x положения точки по оси ординат и определяется величина упругого восстановления по зависимости:

$$y_{упр i} = \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4(y_k - y_{кHi})}{K^2}}}{\frac{2}{K^2}}, \quad (8)$$

$$\text{где } K = \sqrt{2} \frac{(1 - \mu^2)}{E} c' \cdot k \cdot \sigma_T \cdot \rho_{cp}^{0,5}, \quad (9)$$

где ρ_{cp} – средний радиус неровностей шероховатости; $y_{кHi}$ – величина контактного сближения инструмента и неровности, при которой

рассматриваемая точка контактирует с инструментом, с учетом величины упруго-пластического поднятия $y_{очHi}$, определяемая решением следующих систем уравнений:

$$\text{при } x < \frac{Sm \cdot t_m}{200} :$$

$$\left\{ \begin{aligned} y_{кHi} + y_{очHi} &= Rp \left(\frac{200x}{Sm \cdot t_m} \right)^{1/v} ; \\ \frac{Sm \cdot tm}{200Rp^v} \cdot \frac{y_{кHi}^{v+1}}{v+1} &= y_{очHi} \cdot \frac{Sm \left(100 - t_m \left(\frac{y_{кHi}}{Rp} \right)^v \right)}{200} - \\ &- \frac{Sm \cdot t_m}{200 \cdot Rp^v} \left(\frac{(y_{очHi} + y_{кHi})^{v+1}}{v+1} - y_{кHi}^{v+1} - y_{очHi} \cdot y_{кHi}^v \right); \end{aligned} \right. \quad (10)$$

В противном случае:

$$\left\{ \begin{aligned} y_{кHi} + y_{очHi} &= Rmax - \left(\frac{100 - \frac{200x}{Sm}}{100 - t_m} \right)^{1/vB} (Rmax - Rp); \\ \frac{Sm \cdot tm}{200Rp^v} \cdot \frac{y_{кHi}^{v+1}}{v+1} &= y_{очHi} \cdot \frac{Sm \left(100 - t_m \left(\frac{y_{кHi}}{Rp} \right)^v \right)}{200} - \\ &- \frac{Sm}{200} \left[100 \cdot (y_{кHi} + y_{очHi} - Rp) - \frac{100 - t_m}{vB + 1} \cdot \frac{(Rmax - (y_{кHi} + y_{очHi}))^{vB+1}}{(Rmax - Rp)^{vB}} - \right. \\ &\left. - (Rmax - Rp) \right] - \frac{Sm \cdot t_m}{200 \cdot (v+1)} \left(Rp - \frac{(y_{кHi})^{v+1}}{Rp^v} \right) + \frac{Sm \cdot t_m \cdot y_{кHi}^v \cdot y_{очHi}}{200 \cdot Rp^v}; \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Величина упругого восстановления невелика, поэтому значительного повышения точности построения профиля неровности при ОУО ППД не происходит. Однако упругое восстановление оказывает некоторое влияние на величину рабочего усилия, приводя к увеличению площади контакта.

Для расчета усилия, возникающего при упругом восстановлении неровности, целесообразно использовать зависимость номинального давления $P_{кном}$ от величины контактного сближения y_k и положения инструмента y_{yB} . Причем y_{yB} изменяется от 0 при контактном сближении y_k до максимального значения $y_{уп}$ в момент разрыва контакта инструмента и неровности. Определить его можно по зависимости:

$$P_{кном} = 2 P / Sm, \quad (12)$$

$$\text{где } P = \int_0^{b_y} P_k(x) dx = \int_0^{b_y} HB k \left(1 - \frac{y_{yBi}}{y_{уп}(x)} \right) dx, \quad (13)$$

где $y_{уп}(x)$ – зависимость величины максимального упругого восстановления в рассматриваемой точке от ее положения по оси X в пределах контакта с инструментом, определяемая из выражения (8), b_y – размер контактной площадки упругого взаимодействия инструмента и неровности, определяемая по зависимости:

$$b_y = \frac{Sm \cdot tp_{кy}}{200}, \quad (14)$$

где $tp_{кy}$ определяется по зависимостям:

$$\text{при } b_k \leq \frac{Sm \cdot t_m}{200} \text{ или при } b_k > \frac{Sm \cdot t_m}{200} \text{ и}$$

$$y_{yB} \geq y_{уп \text{ пер}} :$$

$$tp_{ky} = t_m \left(\frac{y_{кНi} + y_{оснi}}{Rp} \right)^v, \quad (15)$$

при $b_k > \frac{Sm \cdot t_m}{200}$ и $y_{yB} < y_{упр пер}$:

$$tp_{ky} = 100 - (100 - t_m) \left(\frac{R_{max} - (y_{кНi} + y_{оснi})}{R_{max} - Rp} \right)^{v_0}. \quad (16)$$

Параметр $y_{упр пер}$ определяется из выражения (8), в которое подставляется значение $y_{кНi}$, найденное решением системы (10) при $x = \frac{Sm \cdot t_m}{200}$. $y_{оснi}$ определяется из зависимости (4) или (6) соответственно. В них в качестве контактного сближения подставляется величина $y_{кНi}$, определяемая по зависимости:

$$y_{кНi} = y_k - \left(\frac{y_{yB}}{K} \right)^2 - y_{yB}. \quad (17)$$

В процессе пластической деформации материал упрочняется. Для определения абляционной зависимости упрочнения k использовалась зависимость, разработанная на основании формулы Мейера:

$$k = \left(\frac{4}{\pi} Ar \right)^{\frac{n}{2-1}} \left(\frac{30}{R_0} \right)^{n-2}, \quad (18)$$

где n – экспериментальный коэффициент, выражающий склонность материала к упрочнению R_0 – приведенного радиуса контакта; Ar – фактическая площадь контакта.

При малых контактных сближениях, характерных для отделочных режимов обработки, расстояния между площадками контакта будут соизмеримы или ощутимо больше самих площадок, а деформироваться будут только вершины неровностей. Очевидно, что в этом случае каждая контактная площадка может рассматриваться в виде контактирующей па-

$$k = (0,08 \int_0^{\sqrt{2R \cdot y_k}} r tp_k(y_k - R + \sqrt{R^2 - r^2}) dr)^{\frac{n}{2-1}} \left(\frac{30}{R} \right)^{n-2}. \quad (20)$$

Основными параметрами режима обработки ОУО ППД [1, 2, 4] являются подача S_0 и рабочее усилие P . Они существенно зависят от геометрических характеристик рабочей части инструмента [5].

Для равномерности деформирования неровностей минимальный профильный радиус инструмента должен быть подобран таким об-

разом, приведенный радиус которой будет зависеть от радиуса инструмента и неровности. Поскольку при таких режимах обработки упрочнение не требуется, то и определять степень упрочнения не целесообразно. Поэтому диапазон применения зависимости ограничивается отделочно-упрочняющей обработкой с большей контактной деформацией неровностей.

Зависимость Мейера справедлива при внедрении сферы в полупространство. За счет относительного движения инструмента и заготовки номинальная площадь контакта при отделочно-упрочняющих режимах ОУО ППД существенно меньше, чем площадь при нормальном внедрении сферического индентора при той же контактной деформации. Кроме того, в отличие от упрочняющих режимов, отсутствуют развитые внеконтактные зоны деформирования. Поэтому степень упрочнения зависит от величины контактной деформации, но практически не чувствительна к подаче. Соответственно, при расчете степени упрочнения можно пренебречь подачей и представить процесс как внедрение сферического индентора, радиус которого равен приведенному радиусу инструмента.

Зависимость для расчета фактической площади контакта имеет вид:

$$Ar = 2\pi \int_0^{r_k} r tp_k(y_{к тек}) dr / 100, \quad (19)$$

где r_k – максимальный радиус отпечатка, определяемый геометрически; $tp_k(y_{к тек})$ – зависимость (5) или (7) относительной контактной длины в пределах кольцевой площадки радиуса r от текущего контактного сближения $y_{к тек}$ на ней, определяемая геометрически.

После выполнения математических преобразований, зависимость для определения коэффициента упрочнения k принимает вид:

разом, что в случае попадания между выступами шероховатости в процессе обработки инструмент не должен «проваливаться» на величину, превышающую некоторое предельное значение от заданного контактного сближения. По рекомендациям эта величина не должна превышать $0,1 R_{z_{исх}}$.

Минимальную величину профильного ра-

диуса r_{\min} можно определить по зависимости:

$$r_{\min} = \frac{1000 Sm^2}{0,8 \cdot Rz} \quad (21)$$

При больших радиусах инструмента на отделочных и отделочно-упрочняющих режимах высота волнистости может превышать высоту шероховатости и контактные площадки будут испытывать значительную неравномерность деформации: при попадании инструмента во впадину волнистости увеличивается номинальная площадь контакта и уменьшаются контактные сближения, при попадании на вершину – номинальная площадь снижается, а контактные сближения увеличиваются. Это может привести к значительным отличиям

формируемой шероховатости на разных участках обрабатываемой поверхности.

Таким образом, для определения максимального радиуса инструмента получаем зависимость:

$$r_{\max} = \frac{1000 Sm_w^2}{16 \cdot Wz}, \quad (22)$$

где Sm_w – средний шаг неровностей исходной волнистости, мм; Wz – высота неровностей исходной волнистости, мкм.

По различным литературным данным при ОУО ППД рекомендуется обеспечивать перекрытие следов обработки в диапазоне от 1,5 – 3 до 6 – 8 раз. То есть максимальное значение подачи составит:

$$Sz_{\max} \leq b/1,5 \dots 3 = 2(2r \cdot y_k)^{0,5} / 1,5 \dots 3 \approx \sqrt{2 \cdot r \cdot y_k}, \quad (23)$$

где b – ширина следа инструмента; r – приведенный радиус инструмента.

Минимальное значение подачи составит:

$$Sz_{\min} \geq 2(2r \cdot y_k)^{0,5} / 6 \dots 8 \approx 0,25 \sqrt{2 \cdot r \cdot y_k} \quad (24)$$

Взаимосвязь между величиной y_k и составляющей шероховатости h_1 при принятом диапазоне подач:

$$h_1 = (1 \dots 0,0625) \cdot 2 \cdot r \cdot y_k / 8 \cdot r = (0,25 \dots 0,016) \cdot y_k, \quad (25)$$

Приняв допущение, что величина h_1 не должна быть более половины средней высоты неровностей шероховатости, сформированной после ОУО ППД, получим зависимость для расчета максимальной подачи:

$$Sz_{\max} \leq \sqrt{0,004 \cdot r \cdot Rz_{TP}}, \quad (26)$$

где r – профильный радиус инструмента, мм; Rz_{TP} – средняя высота неровностей шероховатости, которую необходимо обеспечить после ОУО ППД, мкм.

При отделочных и отделочно-упрочняющих режимах ОУО ППД каждая площадка инструмента в пределах номинальной площади контакта формирует свою величину контактной деформации неровностей шероховатости y_{ki} и свою величину относительной контактной длины tp_{ki} и степени упрочнения k_i . Соответственно на каждой элементарной площадке действует собственное усилие, определяемое сформированными на ней параметрами. Для определения суммарного рабочего усилия необходимо произвести

сложение полученных сил на элементарных площадках.

В пределах номинальной площади контакта усилие обработки определяется в двух зонах: зоне упруго-пластических деформаций в передней части контакта (от линии начала контакта до максимального контактного сближения инструмента и обрабатываемой поверхности); зоне упругого восстановления после точки максимального контактного сближения до линии отрыва инструмента от обрабатываемой поверхности.

Поскольку физическая картина взаимодействия в этих зонах существенно отличается, то расчет усилий для них целесообразно производить отдельно. При этом результирующее рабочее усилие получается суммированием упруго-пластической составляющей $P_{пл}$ и составляющей от упругого восстановления P_y :

$$P = P_{пл} + P_y \quad (27)$$

Усилие в зоне упруго-пластических деформаций будет определяться по зависимости:

$$P_{пл} = HB \int_{A_{H_{пл}}} tp_k(y_{ki}) \cdot k(y_{ki}) dA_{H_{пл}} / 100 = \int_{A_{H_{уп}}} P_{номпл} dA_{H_{уп}}, \quad (28)$$

а в зоне упругого восстановления по зависимости:

$$P_y = \int_{A_{H_{упр}}} P_{ном\ u} dA_{H_{упр}}, \quad (29)$$

где $A_{H_{пл}}$ и $A_{H_{упр}}$ – номинальные площади зоны упруго-пластического контакта и зоны упругого восстановления соответственно, $tp_k(y_{ki})$ – зависимость относительной контактной длины от контактной деформации y_{ki} в рассматриваемой (i -й) точке контакта; $k(y_{ki})$ – зависимость коэффициента упрочнения от контактной деформации y_{ki} в рассматриваемой (i -й) точке контакта, определяемое по (20).

Для определения границ номинальной площади контакта инструмента и обрабатываемой поверхности при отделочной и отделочно-упрочняющей обработке был принят ряд упрощений. Многообразие схем сведено к схеме контактирования «плоскость-сфера». Для приведения к ней используются известные зависимости, учитывающие геометрию инструмента и обрабатываемой поверхности. На основании литературных данных и результатов собственных исследований принято, что отсутствует волна вытесненного материала перед инструментом.

Для расчета опорных точек профиль инструмента смещается в направлении обрабатываемой поверхности на расчетную величину контактного сближения y_k . При этом на обрабатываемой поверхности уже присутствует след от предыдущего прохода, смещенный на величину подачи S_0 от текущего профиля. Геометрически определяются величины деформации в каждой точке контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью y_{ki} в пределах пятна контакта.

Расчет номинальной площади контакта, на которой происходит упруго-пластическое деформирование $A_{H_{пл}}$ и упругое восстановление $A_{H_{упр}}$ обрабатываемой поверхности возможен как интегрированием кусочно-аналитических функций вида $z(x)$, описывающих положение границы контакта, так и суммированием элементарных площадок с размерами (dx, z_i) , если граница определена дискретными точками.

Одними из ключевых показателей процесса обработки при ОУО ППД динамическими методами являются энергия единичного удара E_y и плотность ударов m – среднее количество ударов, приходящееся на единицу площади обрабатываемой поверхности. В связи с этим в качестве энергетического параметра обрабатываемой поверхности, позволяющего произвести расчет необходимой энергии удара ин-

струмента, при отделочной и отделочно-упрочняющей обработке динамическими методами использовалась удельная работа на единицу площади обрабатываемой поверхности $A_{ду}$, обеспечивающая требуемый показатель шероховатости. Таким образом, получаем выражение:

$$A_{ду} = E_y \cdot m, \quad (30)$$

где E_y – энергия единичного удара, Дж; m – плотность ударов, $мм^{-2}$.

С другой стороны, $A_{ду}$ определяется по зависимости:

$$A_{ду} = \int_0^{y_k} tp_k(y) k(y) dy \cdot HB/100, \quad (31)$$

где y_k – величина контактной деформации исходной шероховатости, необходимая для обеспечения заданной шероховатости; $tp_k(y)$ – зависимость относительной контактной длины от текущего значения контактной деформации; $k(y)$ – зависимость коэффициента упрочнения от контактной деформации; HB – твердость обрабатываемого материала, $кг/мм^2$.

Учитывая, что параметр m зависит от шага между отпечатками, который эквивалентен подаче при статических методах, получаем уравнение:

$$\frac{k_{\mathcal{E}} k_S^2 M \cdot v^2}{4 \cdot r \cdot y_k} = \int_0^{y_k} tp_k(y) k(y) dy \cdot HB/100 \quad (32)$$

или

$$\frac{k_{\mathcal{E}} k_S^2 M \cdot v^2}{2 \cdot Sz_{пр} \cdot Sz_{поп}} = \int_0^{y_k} tp_k(y) k(y) dy \cdot HB/100, \quad (33)$$

где $k_{\mathcal{E}}$ – доля кинетической энергии, затраченная на процесс пластического деформирования (обычно $k_{\mathcal{E}} \approx 0,86...0,68$); k_S – соотношение между максимальным и минимальным шагом между отпечатками (составляет от 1 до 4); M – масса инструмента; v – нормальная составляющая скорости инструмента; r – приведенный радиус инструмента; $Sz_{пр}$, $Sz_{поп}$ – продольный и поперечный шаг ударов (для повышения производительности целесообразно принимать $Sz_{пр} = Sz_{поп}$).

На основании анализа литературных источников предлагается классификация всех методов ОУО ППД на три вида: отделочную, отделочно-упрочняющую и упрочняющую обработку. В качестве основного критерия разделения методов предлагается использо-

вать величину контактной пластической деформации обрабатываемой поверхности y_k . Дополнительным критерием является номинальное контактное давление при обработке p_n [2, 6, 7].

Отделочная обработка ППД производится с целью уменьшения исходной шероховатости поверхности и увеличения ее несущей способности, т.е. увеличения параметра t_p или снижения параметра R_p без упрочнения поверхностного слоя детали. Это необходимо для повышения износостойкости детали при жидкостном трении, контактной жесткости, герметичности и коррозионной стойкости. Процесс обработки деталей осуществляется при номинальном контактном давлении $0,1HВ < p_n < 0,26HВ$, что обеспечивает частичное сглаживание выступов шероховатости при контактных деформациях $y_k \leq 0,5R_{p_{исх}}$.

Отделочно-упрочняющая обработка ППД производится с целью уменьшения исходной шероховатости поверхности и увеличения ее несущей способности и частичного поверхностного упрочнения детали. Это необходимо для повышения износостойкости при граничном трении, контактной жесткости, герметичности и частично усталостной прочности деталей. Процесс осуществляется при номинальном контактном давлении $0,26HВ < p_n < 0,63HВ$, обеспечивающем контактные деформации в пределах $0,5 R_{p_{исх}} \leq y_k \leq R_{p_{исх}}$.

Упрочняющая обработка ППД производится с целью упрочнения поверхностного слоя детали. Это необходимо для повышения износостойкости при сухом трении и усталостной прочности деталей. При этом происходит полное переформирование исходной шероховатости, вплоть до формирования нового регулярного профиля. Процесс упрочняющей обработки ППД осуществляется при $y_k > R_{p_{исх}}$ и $0,63HВ < p_n < 2HВ$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
2. Гуров, Р.В. Особенности проектирования операций отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – №1. – С. 73 – 78.

3. Гуров, Р.В. Определение влияния упругих деформаций при ОУО ППД на усилие обработки и формирование шероховатости // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – №6/2. – С. 42 – 46.

4. Гуров, Р.В. Учет упругого восстановления в 9А9люю9се отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2012. – №3. – С. 9 – 15.

5. Гуров, Р.В. Научно обоснованное определение геометрии рабочего элемента инструмента для отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2011. – №6 (6) – С. 43 – 46.

6. Суслов, А.Г. Гуров, Р.В., Тишевских, Е.С. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2008. – №9. – С. 11 – 14.

7. Суслов, А.Г., Гуров, Р.В. Методология выбора методов и определения режимов отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием деталей машин исходя из их функционального назначения // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. – 2012. – №2. – С. 15 – 23.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. Technological Support of Surface Layer State Parameters in Parts. – M.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 208.
2. Gurov, R.V. Design peculiarities of finish-strengthening with surface –plastic deformation // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2011. – No.1. – pp. 73-78.
3. Gurov, R.V. Definition of elastic deformation impact at FS with SPD upon treatment effort and roughness formation // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2011. – No.6/2. – pp. 42-46.
4. Gurov, R.V. Elastic recovery accounting during finish-strengthening with surface plastic deformation // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2012. – No.3. – pp. 9-15.
5. Gurov, R.V. Scientifically substantiated definition of tool working element geometry for parts finish-strengthening with surface plastic deformation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – No.6(6) – pp. 43-46.
6. Suslov, A.G., Gurov, R.V., Tishevskikh, E.S. Finish-Strengthening with Surface Plastic Deformation // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2008. – No.9. – pp. 11-14.
7. Suslov, A.G., Gurov, R.V. Methodology for choice of methods and definition of finish-strengthening with surface plastic deformation of machinery reasoning from their functional purpose // *Reference Book. Engineering Journal with Supplement*. – 2012. – No.2. – 15-23.

Рецензент д.т.н.
Максим Николаевич Нагоркин