

УДК 621.787.4

Попов М. Е.

СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Одним из наиболее эффективных путей повышения безотказности и долговечности деталей из высокопрочных сталей и сплавов является применение при их изготовлении обработки металлов давлением методами поверхностного пластического деформирования (ППД). В машиностроении разработано большое количество разновидностей чистовой обработки металлов давлением методами ППД, которые отличаются геометрией и конструкцией инструмента, кинематическими схемами и режимами обработки. Хотя чистовая обработка металлов давлением методами ППД подразделяется на сравнительно небольшое число отдельных основных процессов (рис. 1), но почти все они имеют много разновидностей [1–5].

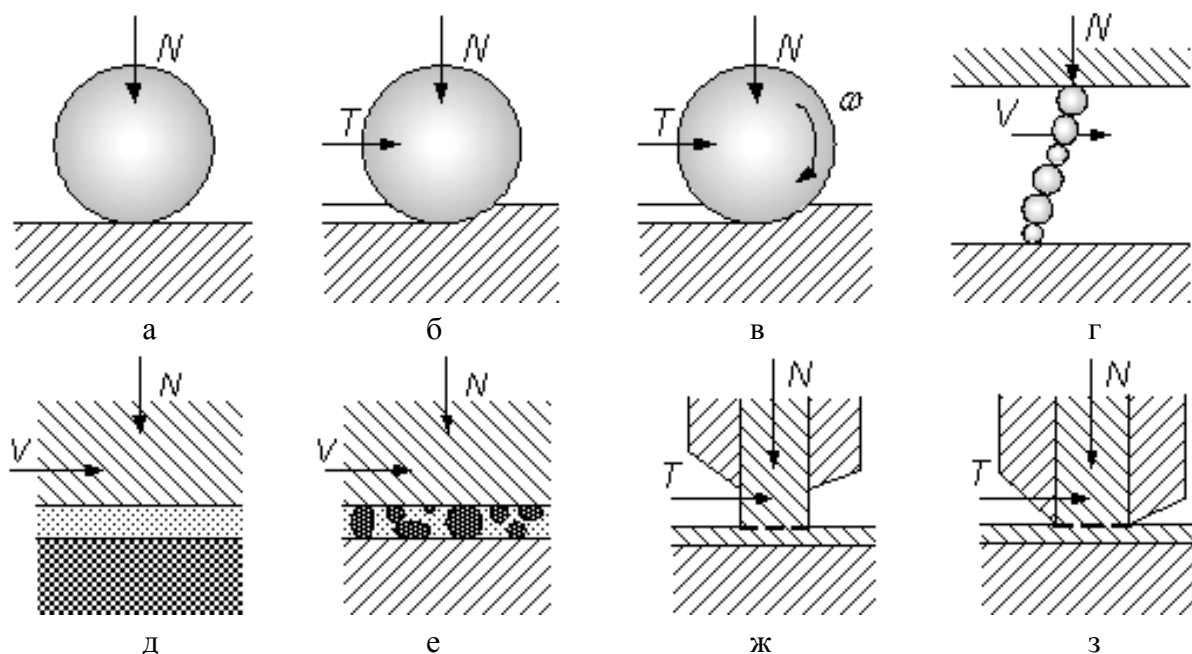


Рис. 1. Структурные схемы основных процессов чистовой обработки металлов давлением методами ППД:

а – вдавливанием; б – скольжением; в – качением; г – комбинированным контактным воздействием; д – атомарным переносом; е – плакированием; ж – натираем; з – истечением слоёв материала третьего тела

Можно выделить три основных направления исследований в области создания новых наукоёмких технологий чистовой обработки металлов давлением:

- субстантное;
- структурное;
- функциональное.

Субстантное направление связано с поиском физических эффектов и физических принципов действия и исследованием возможности их использования для создания новых методов чистовой обработки металлов давлением с целью повышения физико-механических свойств материала в целом или его поверхностного слоя.

Структурное направление связано с созданием и исследованием новых методов чистовой обработки металлов давлением путём совершенствования геометрии и конструкции инструмента, кинематических схем обработки в рамках известного физического принципа действия метода чистовой обработки металлов давлением.

Функциональное направление связано с исследованием технологических возможностей, закономерностей и связей между входными и выходными параметрами метода чистой обработки металлов давлением и технологическими условиями обработки.

Целью работы является раскрытие закономерностей механики чистой обработки металлов давлением методами ППД на основе обобщённых структурных моделей взаимодействия деформирующего элемента с поверхностью упругопластического упрочняющегося тела.

Многие тела при деформировании проявляют упругие, пластические и вязкие свойства. Для моделирования подобных сложных систем удобно использовать структурные элементы [7, 8], описывающие в отдельности тот или иной физический механизм деформирования (рис. 2).

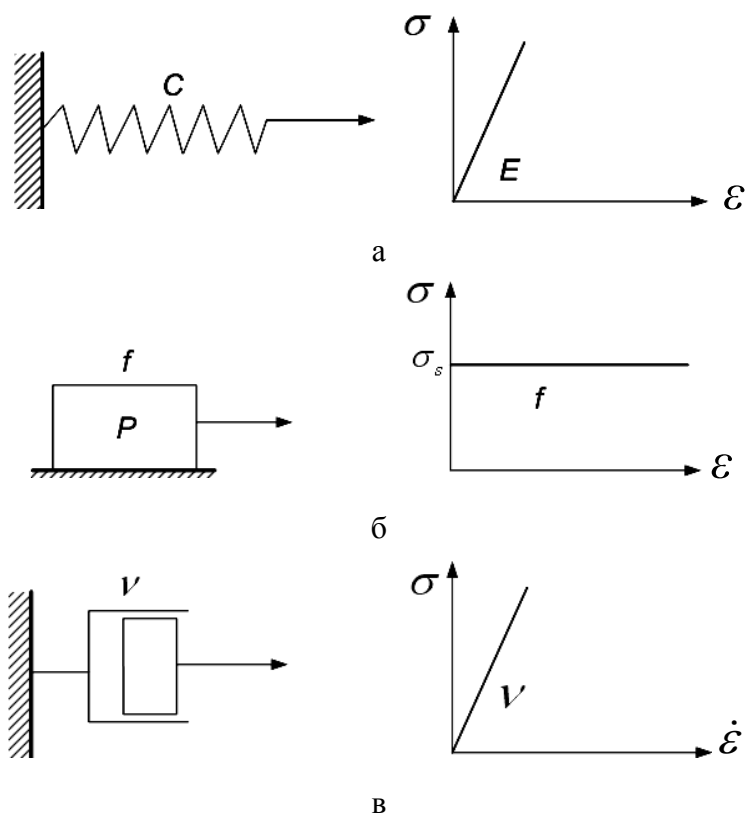


Рис. 2. Структурные элементы деформирования:

а – упругий механизм деформирования; б – пластический механизм деформирования; в – вязкий механизм деформирования

Упругий механизм деформирования можно моделировать с помощью структурного элемента в виде линейной или нелинейной пружины, сопротивление перемещению которого зависит от жесткости пружины c (рис. 2, а). Пластический механизм может быть смоделирован с помощью структурного элемента сухого трения (P), сопротивление перемещению которого зависит от величины коэффициента сухого трения f (рис. 2, б). Вязкий механизм можно изобразить с помощью структурного элемента вязкого трения, сопротивление перемещению которого зависит от коэффициента вязкого трения ν и скорости перемещения V (рис. 2, в).

Рассматривая различные комбинации соединения структурных элементов, можно строить структурные модели тела с различными деформационными свойствами.

После построения структурной модели тела, можно получить для этого тела определяющие соотношения, устанавливающие функциональную зависимость между мерами напряжённого и деформированного состояния всего агрегата, что является одной из самых сложных задач в механике деформируемого твёрдого тела (в частности в теории пластичности).

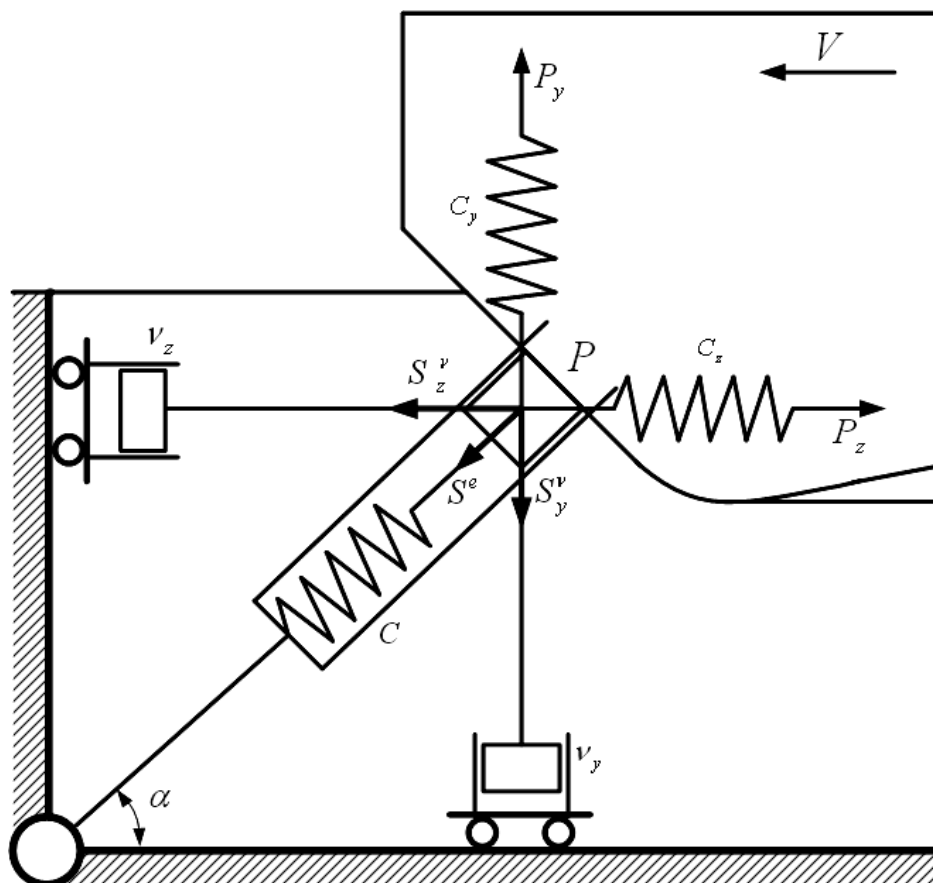


Рис. 3. Двумерная структурная модель поверхностного пластического деформирования упругопластического упрочняющегося тела

Для построения связи между мерами напряжённого и деформированного состояний (и/или их скоростями) упругопластического тела рассмотрим для произвольного момента процесса деформирования двумерную структурную модель тела, включающую все виды структурных элементов и условно изображённую на рис. 3. В данной схеме внешние упругие элементы моделируют упругое деформирование, а внутренний упругий элемент описывает эффект деформационного упрочнения. Вязкие элементы моделируют скоростное упрочнение (или разупрочнение) материала при деформировании. Вследствие того, что тело считается изотропным, упругие и вязкие свойства тела в обоих направлениях совпадают. Это можно легко смоделировать, задав одинаковые характеристики структурных элементов (c и ν).

Обозначим усилия, действующие на внешние упругие элементы, через P_z и P_y , усилия во внутренних вязких элементах – через S_z^v и S_y^v , а усилие во внутреннем упругом элементе – через S^e . Перемещения во внешних упругих элементах обозначим через l_z и l_y , перемещения пластического элемента – через u_z и u_y . Требуется установить функциональную зависимость между внешними воздействиями (усилиями P_z и P_y) и откликом системы (её перемещениями). Другими словами, необходимо определить функциональную зависимость вида $\varepsilon = F(\sigma)$, где ε – некоторая мера деформаций; σ – мера напряжённого состояния; F – неизвестный оператор, вид которого требуется определить. При этом будем считать, что полная деформация складывается из упругой, пластической и вязкой деформаций.

Для нахождения функциональной зависимости (вид оператора F) между мерами напряжённого и деформированного состояний упругопластического упрочняющегося тела воспользуемся построенной структурной моделью. Для внешних упругих элементов можно записать:

$$l_z = \frac{1}{c_z} \cdot P_z; \quad l_y = \frac{1}{c_y} \cdot P_y. \quad (1)$$

Очевидно, что перемещение пластического элемента P (поршень в цилиндре с сухим трением) будет происходить, когда результирующие усилия достигнут некоторого предельного значения:

$$(P_z - S_z)^2 + (P_y - S_y)^2 = K^2, \quad K = const, \quad (2)$$

где K – предельное значение силы сухого трения.

Внутренние усилия определяются следующим образом:

$$S_z = S_z^v + S^e \cdot \cos \alpha; \quad S_y = S_y^v + S^e \cdot \sin \alpha; \quad \tan \alpha = P_y / P_z.$$

Приращение перемещения элемента пластичности происходит по направлению равнодействующей, т. е.:

$$\frac{\Delta u_z}{P_z - S_z} = \frac{\Delta u_y}{P_y - S_y}. \quad (3)$$

Сила натяжения во внутренней пружине связана с перемещениями следующим образом:

$$S^e = c \cdot u. \quad (4)$$

Перемещения вязких элементов связаны с усилиями следующими соотношениями:

$$S_z^v = \nu \cdot \dot{u}_z; \quad S_y^v = \nu \cdot \dot{u}_y. \quad (5)$$

Соотношения (1)–(5) полностью описывают механическое поведение построенной структурной модели. Переходя от усилий к напряжениям, а от перемещений к деформациям, их можно переписать в форме, принятой в теории пластичности [6]. Из условия (2) следует, что существует функция нагружения g , с помощью которой можно установить момент возникновения пластических деформаций. При этом функция нагружения имеет вид окружности постоянного радиуса R . Тогда условие (2) можно переписать в виде:

$$g(\sigma - S) = R; \quad R = const. \quad (6)$$

Здесь под S понимается тензор внутренних напряжений. Это условие известно в теории пластичности как условие пластичности Мизеса [7, 8].

Соотношения (3) показывают, что вектор скоростей пластических деформаций должен быть направлен по нормали к поверхности нагружения g , что соответствует известному ассоциативному закону пластического течения [7]:

$$d\varepsilon^p = d\lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma}, \quad (7)$$

где $d\lambda$ – некоторый множитель. Тогда определяющие соотношения, соответствующие построенной структурной модели, имеют вид:

$$\begin{aligned} d\varepsilon &= d\varepsilon^e + d\varepsilon^p; \\ d\varepsilon^e &= \frac{1}{E} \cdot d\sigma; \quad d\varepsilon^p = d\lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma}; \\ g(\sigma - S) &= R; \quad R = const; \\ dS &= E_1 \cdot d\varepsilon^p; \quad S = \nu \cdot \frac{d\varepsilon^v}{dt}, \end{aligned} \quad (8)$$

где E_1 – модуль упрочнения материала, зависящий от жесткости внутренней пружины и коэффициента вязкого трения.

Система (8) полностью описывает поведение упругопластического тела с учётом эффектов деформационного и скоростного упрочнения. При этом, изменяя параметры системы (c, c_1, ν и f), можно получать различные диаграммы деформирования. Например, задавая жесткость внутренней пружины и коэффициент вязкого трения пренебрежимо малыми, получим модель идеально упругопластического тела. Если, наоборот, эти коэффициенты задать достаточно большими, то пластический элемент «включаться» не будет, и получим модель упругого тела. В случае, когда коэффициент вязкого трения мал, а жесткость внешних пружин выше жесткости внутренней пружины, имеем модель упругопластического тела с линейным упрочнением. И, наконец, можно подобрать коэффициент вязкого трения и жесткость внутренней пружины таким образом, что получим модель упругопластического тела с нелинейным упрочнением.

На показатели качества поверхностного слоя при ППД наибольшее влияние оказывает усилие деформирования, максимальные значения нормальных и касательных напряжений действующие в точке деформации, а также соотношение их значений, определяющих направление деформаций и перемещений металла в зоне контакта.

Известно, что напряжения непосредственно связаны с перемещениями и скоростями точек деформируемой поверхности, находящимися в зоне контакта. Исходя из этого, решение задачи сводится к нахождению указанной взаимосвязи [3, 4].

При монотонном нагружении поверхности зависимость между напряжениями и деформациями может быть определена из диаграммы растяжения-сжатия, которую называют также кривой упрочнения. Считают, что кривая упрочнения является фундаментальной характеристикой металла, устанавливающей однозначную связь пластических деформаций с напряжениями [6, 7].

Кривые упрочнения аппроксимируются функциями различного вида. Учитывая, что кривая упрочнения имеет вид явно выраженной степенной зависимости, её представляют формулой:

$$\sigma_i = A \cdot \varepsilon_i^m, \quad (9)$$

где A, m – константы, зависящие от физико-механических свойств деформируемого материала.

Если получен график кривой упрочнения, то из него:

$$m = \left(\ln \frac{\sigma_T}{\sigma_\varepsilon} \right) / \left(\ln \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_\varepsilon} \right);$$

$$A = E \cdot \varepsilon^{1-m},$$

где $\sigma_T, \sigma_\varepsilon, \varepsilon_T, \varepsilon_\varepsilon$ – предел текучести, предел временного сопротивления, а также деформации, соответствующие пределу текучести и пределу временного сопротивления;

E – модуль упругости обрабатываемого металла.

Таким образом, для вычисления напряжений по формуле (9), необходимо установить деформации поверхности в зоне контакта, или, что то же самое, кинематику точек деформируемой среды.

Так, на основании исследований, приведенных в работах [3], было установлено, что при ППД роликами траекториями точек деформируемой поверхности без учета проскальзывания, являются циклоиды, эпициклоиды и гипоциклоиды при обработке плоскостей, валов и отверстий соответственно.

Движение по циклоидам описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} S_z &= r_p \cdot [(\varphi_k - \varphi_m) - \sin(\varphi_k - \varphi_m)]; \\ S_y &= r_p \cdot [1 - \cos(\varphi_k - \varphi_m)]; \end{aligned} \quad (10)$$

где r_p – изменение радиуса ролика по длине контакта;

φ_k – угол контакта, соответствующий полуширине контакта z_k ;

φ_m – параметр семейства, соответствующий текущему значению угла контакта $0 \leq \varphi_m \leq \varphi_k$.

Произведя преобразования и продифференцировав полученные выражения по z и y , получим относительные деформации ε_z и ε_y :

$$\varepsilon_z = \frac{dS_z}{dz} = \left[\frac{1}{\sqrt{r_p^2 - \frac{(z - z_k)^2}{r_p}}} - 1 \right]; \quad \varepsilon_y = \frac{dS_y}{dy} = \left[\frac{z_k - z}{r_p \cdot \sqrt{1 - \frac{(z - z_k)^2}{r_p}}} \right]. \quad (11)$$

где r_p – радиус ролика;

z – изменение текущей характеристики полуширины контакта.

Анализ формул (10) и (11) показал, что выбор движения точек деформируемой поверхности по циклоидам является более предпочтительным, т. к. объясняет некоторые экспериментально полученные результаты [3].

Учитывая связь напряжений с деформациями, определяемой формулой (9), можно определить распределение напряжений по площади контакта на фронтальной поверхности ролика:

$$\sigma_z = A \cdot \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{z - z_k}{r_p} \right)^2} - 1 \right]^m; \quad \sigma_y = A \cdot \left[\frac{z_k - z}{r_p \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z - z_k}{r_p} \right)^2}} \right]^m.$$

Соответственно, нормальные и касательные составляющие усилия деформирования можно определить из зависимостей:

$$P_z = A \cdot \int_0^{L_k} \left\{ \int_0^{z_k} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(z - z_k)^2}{r_p^2}}} - 1 \right]^m dz \right\} dl; \quad P_y = A \cdot \int_0^{L_k} \left\{ \int_0^{z_k} \left[\frac{z - z_k}{\sqrt{r_p^2 - \frac{(z - z_k)^2}{r_p^2}}} \right]^m dz \right\} dl;$$

где L_k – длина контактной зоны;

l – текущее значение длины контактной зоны;

z_k – изменение полуширины контакта:

$$z_k = \sqrt{R_d^2 - \left[\frac{(R_d + r_p) \cdot (R_d - h_k)}{R_d - (r_p - h_k)} \right]^2},$$

где R_0 – радиус обрабатываемой детали.

Таким образом, понимание законов взаимодействия деформирующих элементов с поверхностью детали позволяет получить как закон распределения напряжений в контактной зоне, так и составляющие усилия деформирования, необходимые для достижения оптимального качества обрабатываемой поверхности.

При подборе функций для описания отдельных элементов моделей необходимо найти их аналитическое выражение с проверкой влияющих параметров на существенность. Однако, в виду влияния большого количества параметров различного характера, все описываемые элементы моделей имеют случайный характер. Поэтому для решения поставленных задач требуется новый подход. Не имея возможности строгого математического описания отдельных элементов, необходимо прибегать к их описанию в неявном виде, используя методику планирования эксперимента и статистического аппарата для анализа и оценки.

Определив все элементы моделей, учитывая конкретный процесс, имеется возможность проектирования процессов чистовой обработки металлов давлением методами ППД при помощи ЭВМ.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы: несмотря на многообразие процессов чистовой обработки металлов давлением методами ППД, они могут описываться математическими моделями, имеющими общую структуру, что позволяет совершенствовать процессы, создавать автоматизированные системы проектирования технологических процессов чистовой обработки металлов давлением методами ППД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек А. В. *Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием*. Библиотека технолога / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьёв, А. Г. Лазуткин. – М. : Машиностроение, 2004. – 288 с.
2. Одинцов Л. Г. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием* / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 311 с.
3. Отений Я. Н. *Теория и технологическое обеспечение качества деталей машин при обработке поверхностным пластическим деформированием роликами* : автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2005.
4. Попов М. Е. *Основы САПР технологических процессов упрочняющей обработки* : учеб. пособие / М. Е. Попов // РИСХМ. – Ростов на Дону, 1987. – 91 с.
5. Шнейдер Ю. Г. *Технология финишной обработки давлением* : справочник / Ю. Г. Шнейдер. – СПб. : Политехника, 1998. – 414 с.
6. *Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования* / Под ред. В. И. Беляева. – Мн. : Наука и техника, 1988. – 184 с.
7. Алёхин В. П. *Физика прочности и пластичности поверхностных слоёв материалов* / В. П. Алёхин. – М. : Наука, 1983. – 279 с.
8. Соколкин Ю. В. *Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел* / Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов. – М. : Наука, 1984. – 115 с.

Попов М. Е. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ.

ДГТУ – Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия.

E-mail: mepop@yandex.ru