

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ С ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Л.М. КОЖУРО, д.т.н., профессор (БГАТУ);  
А.П. РАКОМСИН, технический директор ГП "МАЗ";  
Ю.В. ЧИГАРЕВ, д.т.н., профессор (БГАТУ)

Одним из наиболее распространенных методов повышения качества поверхностного слоя покрытия, полученного наплавкой композиционных порошковых материалов, является комбинированный метод наплавки с одновременным поверхностным пластическим деформированием [1, 2]. В процессе обработки порошковые материалы испытывают значительную необратимую объемную деформацию, что принципиально отличает их от литых материалов, которые принято считать несжимаемыми. По отношению к таким материалам механика сплошной среды может применяться для изучения различных процессов [2]. Применение ее основано на допущении, что рассматриваемое тело может быть разбито на элементарные макрообъемы, характерные размеры которых, с одной стороны, намного меньше характерных размеров тела, а с другой - намного больше характерных размеров структурных элементов. При этом предполагается, что изменение макропараметров внутри макроэлементов незначительно. Макрохарактеристики, такие как плотность, напряжения, деформации и другие, полученные согласно этим предположениям, будут с достаточной точностью совпадать с усредненными по объему макрохарактеристиками [3].

При решении многих практических задач учитывается малая, но конечная пластическая неоднородность материала. Приближенные решения таких задач исследовались А. И. Кузнецовым [4], А. Спенсером [5] и Е. Маршаллом [6]. Решение задачи в контактных напряжениях для общего случая установившегося качества шероховатого тела по идеально пластическому полупространству получено В. М. Сегалом [7] методом малого параметра. Решение возможно при условии, что радиус тела качения  $R$  значительно превышает ширину пластического контакта  $d$ . Движение деформирующего элемента радиусом  $R$  происходит под воздействием приложенных к нему усилий  $PZ$ ,  $P_y$  и момента  $M$ .

При электромагнитной наплавке идеально пластичным можно представить только тонкий нанесенный слой, а саму основу нужно рассматривать как жесткопластичный или упругопластичный материал.

Для определения малых упругопластических деформаций при активном нагружении А.А. Ильюшин предложил метод последовательных приближений, названный методом упругих решений [3]. Суть его заключается в рассмотрении последовательности линейных задач теории упругости, решение которых с увеличением порядкового номера сходятся к решению задачи теории пластичности. Известны различные модификации метода упругих решений: в форме дополнительных нагрузок [8], в форме переменных параметров упругости [9] и в других формах [10].

Воспользуемся формой переменных параметров упругости, обеспечивающей наиболее быструю сходимость итерационного процесса, построенного по методу упругих решений [6].

В качестве начального приближения примем решение для упругого полупространства с коэффициентом  $\chi_0$ , используемым в подавляющем большинстве критериев теорий прочности: Мора, Янга, Писаренко-Лебедева и других. В последующих приближениях также рассматривается упругое полупространство, но на каждом шаге  $i$  с новым коэффициентом  $\chi_i$

$$\chi_i = \frac{\sigma_0^+}{\sigma_0^-}$$

где  $\sigma_0^+$  и  $\sigma_0^-$  - напряжения, предельные для материала при одноосном растяжении и сжатии соответственно.

Аналогично, рассматривая вводимые формально фиктивные распределения температуры, можно методом упругих решений путем последовательных приближений решать задачи термопластичности [8].

Рассмотрим начальное приближение, полагая.

что  $\chi_i = \chi_0$ . Находим в деформируемом полупространстве области с эквивалентными напряжениями  $s_{\text{эки}}$ , превышающими предельные при упругих деформациях, и далее рассматриваем эти области при новых значениях коэффициента  $\chi_i$ . Если таких областей нет или они весьма малы, то при заданных нагрузках пластических деформаций в обрабатываемой поверхности нет или этими деформациями можно пренебречь и считать, что начальное приближение дает решение поставленной задачи.

Исследуем напряженное состояние покрытия при поверхностном пластическом деформировании методами теории упругости с учетом решений, полученных для полуплоскости.

Напряженное состояние от сосредоточенной нагрузки  $P_y$ , приложенной в точке  $z = bh$  (при ППД шариком  $b = 2/7$ ) (рис. 1, а), опишется выражениями [9]

$$\sigma_z = A_1 B_1^2 y / C_1^2;$$

$$\sigma_y = A_1 y^3 / C_1^2;$$

$$\tau_{yz} = A_1 B_1 y^2 / C_1^2,$$

где  $A_1 = -2P_y / \pi$ ;  $B_1 = z - bh$ ;  $C_1 = B_1^2 + y^2$ ;

$b$  - положение максимальной эпюры контактной нагрузки;  $h$  - длина контактной площадки.

При незначительных размерах площадки контакта деформирующего элемента и обрабатываемой поверхности необходимо задавать распределение контактных нагрузок по площадке. При качении и верчении деформирующего элемента эту нагрузку в первом приближении можно описать выпуклой квадратной параболой [9]. Напряженное состояние от перпендикулярной нагрузки, описанной квадратной параболой [8] (рис. 1, б)

$$q_y = 3P_y \frac{[(z_1 - bh)^2 - (1 - b)h]^2}{(3b - 2)h^3},$$

представляется зависимостями

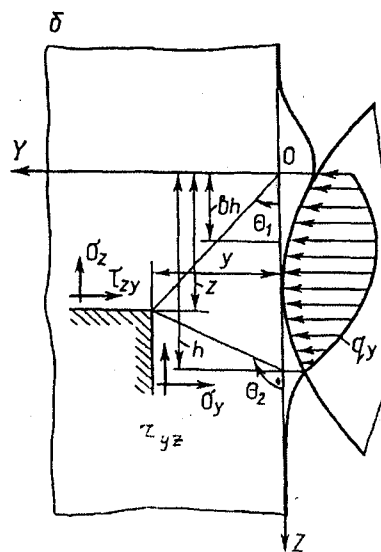
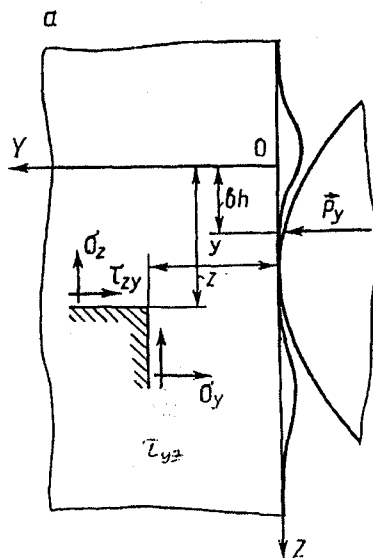


Рис. 1. Расчетные схемы полей напряжений от сосредоточенной силы (а) и распределенной по поверхности нагрузки (б) при электромагнитной наплавке с поверхностным пластическим деформированием.

$$\sigma_z = A_2 \left[ \frac{S_2 D_2 + 2B_2}{E_2} - \frac{D_2 z + 2B_2}{G_2} + \frac{2C_2 V_2 - U_2 (D_2 - 2)}{y} + \frac{2h}{y^2} \right];$$

$$\sigma_y = A_2 \left[ -\frac{S_2 D_2 + 2B_2}{E_2} + \frac{D_2 z + 2B_2}{G_2} - \frac{U_2 (D_2 + 2)}{y} \right];$$

$$\tau_{xy} = A_2 \left( \frac{D_x y - 2S_2 C_2}{E_2} - \frac{D_2 y - 2C_2 z}{G_2} + \frac{2C_2 U_2 - V_2}{y} \right),$$

где

$$A_2 = 3P_y \left( \frac{y}{h} \right)^3 / [\pi(2 - 3b)]; \quad S_2 = z - h;$$

$$B_2 = z - bh; \quad C_2 = \frac{B_2}{y}; \quad T_2 = \frac{S_2}{y};$$

$$D_2 = C_2^2 - 1 - \left[ (1 - b) \frac{h}{y} \right]^2; \quad E_2 = S_2^2 + y^2;$$

$$G_2 = z^2 + y^2; \quad U_2 = \arctg T_2 - \arctg \frac{z}{y};$$

$$V_2 = \ln E_2 - \ln G_2.$$

Исследование полей напряжений, рассчитанных согласно полученным соотношениям, позволяет по величинам допустимых напряжений определить рацио-

нальную величину усилия деформирования.

Для описания напряженного состояния в обрабатываемом материале используем критерий Мора [11], эквивалентные напряжения в котором представляются выражением

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{(1-\chi)(\sigma_z + \sigma_y)}{2} + \frac{(1+\chi)}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2}$$

и сопоставляются с напряжением для данного обрабатываемого материала при одноосном растяжении

$$\sigma_0^+ \geq \sigma_{\text{экв}}.$$

Коэффициент  $\chi = \sigma_0^+ / \sigma_0^-$  изменяется от 0 до 1 с ростом пластичности, которая увеличивается при повышении температуры нагрева обрабатываемого материала [12]. При  $\chi = 1$  принимают критерий наибольших касательных напряжений

$$\tau_{\text{max}} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2}$$

и сопоставляют с напряжением

$$\sigma_0^+ / 2 \geq \tau_{\text{max}}.$$

Поля напряжений в зоне поверхностного пласти-

вивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  и максимальных касательных напряжений  $\tau_{\text{max}}$  использовались различные значения коэффициента  $\chi_i = \sigma_0^+ / \sigma_0^-$  от 0,1 до 1,0.

Ввиду малости зоны идеальной пластичности при электромагнитной наплавке, равной небольшой толщине покрытия, расчеты были ограничены начальным приближением.

Проведенные расчеты (рис. 2) показывают, что в зависимости от площади контактного взаимодействия и физико-механических свойств обрабатываемых материалов определяются формы и размеры зон наибольших эквивалентных напряжений и максимальных касательных напряжений. Следовательно, изменением площади контакта и физико-механических свойств обрабатываемых материалов путем увеличения усилия деформирования и интенсивности теплового воздействия можно управлять деформационными и термомеханическими процессами для повышения параметров качества обрабатываемой поверхности. Причем глубина упрочнения в результате этих процессов может быть как больше, так и меньше толщины покрытия, полученного ЭМН с ППД.

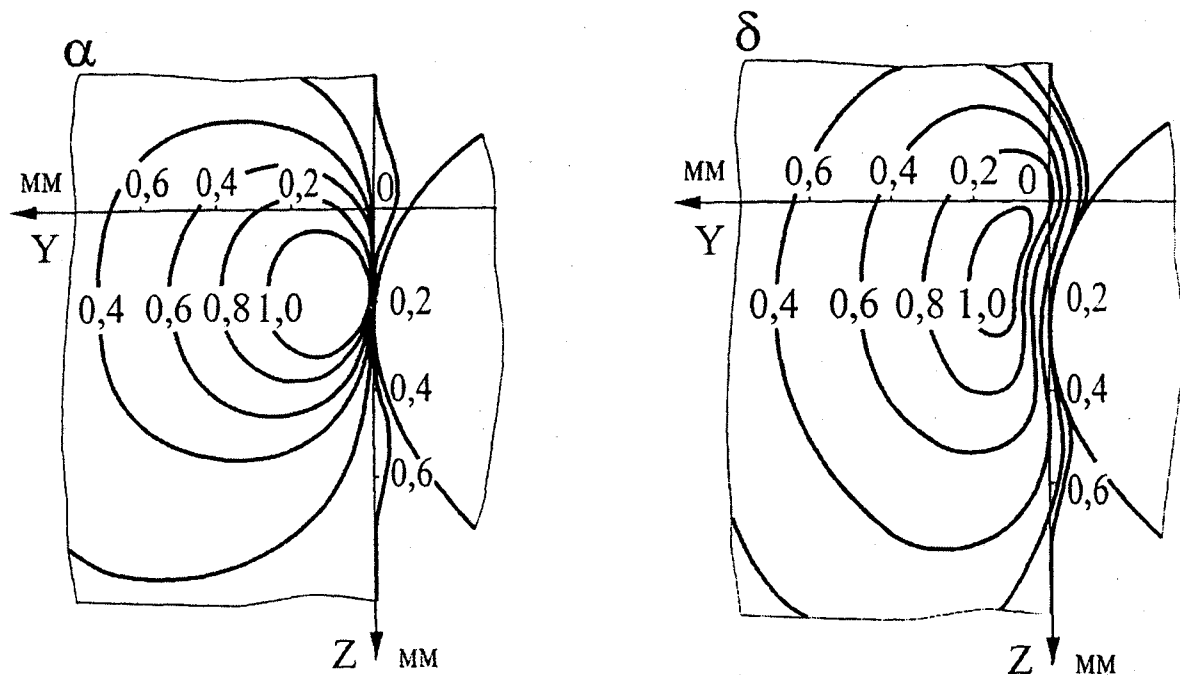


Рис. 2. Поля напряжений при деформировании наплавленных поверхностей для точечного контакта (а) и для площадки контакта при  $\chi_i = 0,3$  (б).

ческого деформирования рассчитывались по полученным формулам как для случая точечного контакта (рис. 2, а), так и для случая квадратичного распределения нагрузки по линии контакта (рис. 2, б).

Для покрытия и основы с отличающимися физико-механическими свойствами при построении полей эк-

По результатам проведенных расчетов и их экспериментальной проверки можно предложить следующую последовательность определения рационального усилия деформирования поверхности при ЭМН и ППД:

1) устанавливаем условия прочности, т. е. рассчитываем силу, при которой произойдет разрушение по-

крытия в процессе его поверхностного пластического деформирования, по зависимости

$$P_{y1} = \frac{\pi(2-3b)\sigma_{эКВ}}{3(y/h)^3 \left[ \frac{(1-\chi)}{2}(\sigma'_z + \sigma'_y) + \frac{(1+\chi)}{2} \sqrt{(\sigma'_z - \sigma'_y)^2 + 4\tau_{yz}'^2} \right]},$$

где  $\sigma_{эКВ} = \sigma_0^+$ ;

$$\sigma'_z = \frac{SD+2B}{E} - \frac{Dz+2B}{G} + \frac{2CV-U(D-2)}{y} + \frac{2h}{y^2};$$

$$\sigma'_y = \frac{SD+2B}{E} + \frac{Dz+2B}{G} - \frac{U(D+2)}{y};$$

$$\tau'_{zy} = \frac{Dy-2SC}{E} - \frac{Dy-2Cz}{G} + \frac{2CU-V}{y},$$

в которых

$$S = z - h; \quad B = z - bh; \quad C = \frac{B}{y}; \quad T = \frac{S}{y};$$

$$D = C^2 - 1 - \left[ (1-b) \frac{h}{y} \right]^2; \quad E = S^2 + y^2;$$

$$G = z^2 + y^2; \quad U = \arctg T - \arctg \frac{z}{y};$$

$$V = \ln E - \ln G.$$

При поверхностном пластическом деформировании покрытия, полученного ЭМН, в качестве опасной точки для расчета целесообразно выбрать точку, расположенную под максимумом эпюры контактных нагрузок на границе покрытие-основа с координатами  $y = bh$ ,  $z = a$ ;

2) рассматриваем возможность упрочнения поверхности пластическим деформированием, т.е. находим силу, при которой соблюдается условие пластичности на определенной глубине, по формуле

$$P_{y2} = \frac{2 \cdot \pi(2-3b)\tau_{\max}}{3(y/h)^3 \sqrt{(\sigma'_z - \sigma'_y)^2 + 4\tau_{yz}'^2}},$$

где  $\tau_{\max} = \sigma_0^+ / 2$ .

Для упрочнения покрытия деформированием после ЭМН лучше всего выбрать точку с координатами  $y = bh$ ,  $z > a$ , в которой выполняется условие пластичности;

3) сравниваем полученные значения  $P_{y1}$  и  $P_{y2}$ .

Если  $P_{y1} \geq P_{y2}$ , то принимаем  $P_{y2}$ , обеспечивая тем самым требуемое упрочнение; если  $P_{y1} \leq P_{y2}$ , то принимаем  $P_{y1}$ , не допуская тем самым разрушения

покрытия, а при  $z = a$  - отслаивания наплавленного слоя.

Определим рациональные усилия деформирования по имеющимся замерам контактной площадки  $h = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $y = 2/7h = 0,7 \cdot 10^{-3}$  м; максимальной толщине наплавленного слоя из ферропорошка Fe-5 %V;  $z = a = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м и допустимым параметрам напряжений

$$\sigma_{эКВ} = 50 \text{ кН/м}^2; \quad t_{\max} = s_{эКВ} / 2 = 25 \text{ кН/м}^2 [1];$$

$$P_{y1} = s_{эКВ} / 68 = 735 \text{ Н};$$

$P_{y2} = t_{\max} / 33 = 758 \text{ Н}$ . Так как  $P_{y1} < P_{y2}$  принимаем  $P_{y1} = 735 \text{ Н}$ .

С учетом запаса на 30...40 % получаем  $P_y = 1029 \text{ Н}$  и рациональную величину  $P_y = 800...1000 \text{ Н}$ .

Следовательно, усилие при ППД шариком 6,5 мм покрытия толщиной до 0,5 мм, полученного ЭМН, выбирается из диапазона 800...1000 Н.

Таким образом, исходя из прогнозируемых параметров качества поверхностного слоя покрытия, модифицированного термомеханическим упрочнением, можно по рассчитанным полям напряжений определить необходимые усилия деформирования при заданной температуре и оценить рациональные температуры обрабатываемой поверхности.

## Литература

1. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Ракомсин А.П. и др. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. - Мн.: ФТИ НАН Беларуси, 1997. - 416 с.
2. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. - М.: Машиностроение, 1989. - 168 с.
3. Ильющин А.А. Механика сплошной среды. - М.: Изд. МГУ, 1971. - 248 с.
4. Кузнецов А.И. Плоская деформация неоднородных пластических тел // Вестник Ленинградского университета, 1958. № 13. - С. 12...15.
5. Spenser A.J.M. Perturbation method in plasticity // Journal of the mechanics and physics of solids, 1968. V. 14, № 4. - P. 24...32.
6. Marchall E.A. Rolling contact with plastic deformation // Journal of the mechanics and physics, 1968. V. 14, № 4. - P. 16...29.
7. Сегал В.М. Технологические задачи теории пластичности (методы исследования). - Мн.: Наука и техника, 1977. - 256 с.
8. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности. - М.: Высшая школа, 1990. - 368 с.
9. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. - М.: Высшая школа, 1990. - 400 с.
10. Победря Б.Е., Шешенин С.В., Холматов Т.А. Задачи в напряжениях. - Ташкент: Фан, 1988. - 200 с.
11. Подскребко М.Д. Сопrotивление материалов. - Мн.: Дизайн ПРО, 1998. - 592 с.
12. Ткачев В.Н., Фиштейн В.М., Козинцев Н.В. и др. Индукционная наплавка твердых сплавов. - М.: Машиностроение, 1970. - 184 с.