УДК 621.923.7

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

Л.М.КОЖУРО, д.т.н., профессор (БАТУ); **С.С.МАКАРЕВИЧ**, к.т.н., доцент (БГТИ); **А.П.РАКОМСИН**, инженер (ГП "МАЗ")

Остаточные напряжения являются одной из причин разрушения покрытий. Однако необходимо отметить, что из-за многообразия факторов, влияющих на возникновение остаточных напряжений, и сложности их математического описания, многие аспекты прогнозирования и регулирования значений и знака напряжений являются открытыми.

Для оценки свойств покрытий используют такие понятия, как модуль упругости, коэффициенты линейного расширения, Пуассона, теплопроводности и т.д., усредненные по объему значительно большему, чем объем отдельно взятой капли. Поэтому кристаллизацию отдельно взятых капель при электромагнитной наплавке [1] можно заменить мо-дельным непрерывным процессом и проводить расчеты на основании существующих теорий физики и механики сплошной среды.

При рассмотрении наплавленного покрытия как сплошной среды, в первую очередь, представляют интерес остаточные напряжения первого рода, уравновешивающиеся в объеме, соизмеримом с размерами всего изделия. В этом случае замена кристаллизации отдельно взятых капель модельным непрерывным процессом является оправданной [2]. Впервые такое модельное рассмотрение в рамках теории упругости было введено в работе [3], затем оно получило дальнейшее подтверждение в работе [4]. При этом многие определяют температурную составляющую остаточных напряжений, рассматривая окончательно сформировавшееся покрытие. В действительности же остаточные напряжения формируются при постепенном приложении нагрузки и температуры до некоторых окончательных значений.

При определении остаточных напряжений в покрытиях, полученных электромагнитной наплавкой, приняли, как и авторы работы [5], следующую модель процесса: длина образца достаточно велика по сравнению с его диаметром и в нем в процессе наплавки возникает подвижное квазистационарное температурное поле; остаточные напряжения возникают в результате наплавки и охлаждения образца до температуры окружающей среды.

Наплавленное покрытие рассматривали как сплошную среду (пористость покрытий не более 5%), что позволяло рассматривать задачу в рамках феноменологических теорий теплообмена и механики сплошной среды.

Ввиду того, что процесс наплавки заготовки занимает малое время, будем считать, что температурное поле является постоянным в направлении оси цилиндра Z и симметричным относительно ее. Оно изменяется только по радиусу r, т.е. $T = T(r)$, и остается постоянным в окружном направлении θ.

Напряжения, возникающие при этом, можно определять как для осесимметричной задачи теории упругости в цилиндрических координатах [6].

Так как после наплавки цилиндрическая деталь получается двухслойной, будем обозначать слои порядковыми номерами 1 и 2, начиная от центра. При этом внутренний радиус первого слоя обозначим r_1, радиус границы слоев обозначим r_2, а внешний радиус второго слоя - r_3.

При описанном выше модельном процессе площадки, проведенные в детали перпендикулярно к осям Z, r и θ, будут главными площадками и на них будут возникать только нормальные напряжения $\sigma_{iz}, \sigma_{ir}, \sigma_{i\theta}$. Обозначим w_i перемещение в направлении оси Z, а u_i - в направлении радиуса r, где i - порядковый номер слоя.

Условия равновесия в этом случае будут сведены к уравнениям

$$r\frac{\partial\sigma_{ir}}{\partial r}+\sigma_{ir}-\sigma_{i\theta}=0;\ \sum_{i=1}^{r}\int_{r_i}^{r_{i+1}}\sigma_{iz}rdr=0. \qquad (1)$$

Кинематические уравнения для i-го слоя можно представить в виде

$$\varepsilon_{iz}=\frac{\partial w_I}{\partial z};\quad \varepsilon_{ir}=\frac{\partial u_i}{\partial r};\ \varepsilon_{i\theta}=\frac{u_i}{r}. \qquad (2)$$

Физические уравнения с учетом температуры для i-го слоя запишутся следующим образом

$$\begin{aligned}\sigma_{iz}&=2G_i\varepsilon_{iz}+\lambda_i l_i-\eta_i T_i;\\ \sigma_{ir}&=2G_i\varepsilon_{ir}+\lambda_i l_i-\eta_i T_i;\\ \sigma_{i0}&=2G_i\varepsilon_{i0}+\lambda_i l_i-\eta_i T_i,\end{aligned} \qquad (3)$$

где l_i – относительная объемная деформация

$$(\ l_i=\ \varepsilon_{iz}+\ \varepsilon_{ir}+\ \varepsilon_i\theta);$$

$\eta_i=E_i\alpha_i/(1-2\mu_i)$ – постоянная для данного слоя величина; $G_i = 0,5E_i/(1+m_i)$ - модуль сдвига; $\lambda_i = 2\mu_i G_i/(1-2\mu_i)$ - постоянная Ляме; E_i - модуль Юнга; μ_i - коэффициент Пуассона; α_i - коэффициент линейного расширения.

Решая совместно уравнения (1) - (3), получим дифференциальное уравнение для i-го слоя

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{r}\frac{d(u_i r)}{dr}+\frac{1+\mu_i}{1-\mu_i}\alpha_i T_i\right)=0. \qquad (4)$$

Проинтегрировав уравнение (4) дважды, найдем

$$u_i=C_i r+\frac{D_i}{r}+\frac{1+\mu_i}{1-\mu_i}\frac{\alpha}{r}\int_{r_i}^{r}T_i(r)dr, \qquad (5)$$

где C_i, D_i - постоянные интегрирования.

Зная радиальное перемещение u_i и, используя уравнения (1) - (3), определим напряжения в слоях

$$\sigma_{ir}=\frac{E_i}{1-\mu_i^2}\left[C_i(1+\mu_i)-\frac{D_i}{r^2}(1-\mu_i)-(1+\mu_i)\frac{\alpha_i}{r^2}\int_{r_i}^{r}rT_i(r)dr\right];$$

$$\sigma_{i\theta}=\frac{E_i}{1-\mu_i^2}\left[C_i(1+\mu_i)+\frac{D_i}{r^2}(1-\mu_i)-(1+\mu_i)\alpha_i\left(T_i(r)-\frac{1}{r^2}\int_{r_i}^{r}rT_i(r)dr\right)\right];$$

$$\sigma_{iz}=\frac{E_i}{(1+\mu_i)(1-2\mu_i)}\left[(1-\mu_i)\varepsilon_z+2\mu_i C_i\right]-\frac{E_i\alpha_i}{1-\mu_i}T_i(r). \qquad (6)$$

Относительная деформация ε_z, входящая в формулу для σ_{iz}, определится из условия совместности деформаций слоев $\varepsilon_{1z}=\varepsilon_{2z}=\varepsilon_z$ и из второго уравнения равновесия системы (1)

$$\varepsilon_z=\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{E_i\alpha_i}{1-\mu_i}\int_{r_i}^{r_{i+1}}rT_i(r)dr+\frac{E_i\mu_i(r_i^2-r_{i+1}^2)}{(1+\mu_i)(1-2\mu_i)}C_i\right)\Big/\sum_{i=1}^{m}B_i, \qquad (7)$$

где - $B_i=\dfrac{E_i(1-\mu_i)(r_{i+1}^2-r_i^2)}{2(1+\mu_i)(1-2\mu_i)}$;

m =2 - число слоев.

Когда температура наплавляемого слоя падает до некоторой величины T_2, между наплавляемым слоем и основной деталью возникает адгезионная связь. При дальнейшем остывании, ввиду различного значения коэффициентов линейного расширения, между наплавляемым слоем и основной деталью на границе возникает контактное давление P.

Давление P и постоянные интегрирования C_i, D_i определятся из граничных условий: при $r = r_1$ $\sigma_{1r} = 0$; при $r = r_2$; $\sigma_{1r} = -P$, $\sigma_{2r} = -P$, $u_1 = u_2$; при $r = r_3$ $\sigma_{2r} = 0$.

Используя эти условия, из уравнений (5) и (6) получим

$$P=\sum_{i=1}^{m}\left[(-1)^{i-1}\frac{2\alpha_i}{(1-\mu_i)(r_{i+1}^2-r_i^2)}\int_{r_i}^{r_{i+1}}rT_i(r)dr\right]\Big/\sum_{i=1}^{m}\left[\frac{(1-\mu_i)r_{i+1}^2+(1+\mu_i)r_i^2}{E_i(r_{i+1}^2-r_i^2)}\right];$$

$$C_i=\frac{1-\mu_i}{r_{i+1}^2-r_i^2}\left[\frac{\alpha_i}{1-\mu_i}\int_{r_i}^{r_{i+1}}rT_i(r)dr+(-1)^i\frac{r_{i+1}^2}{E_i}P\right];$$

$$D_i=\frac{(1+\mu_i)r_i^2}{r_{i+1}^2-r_i^2}\left[\frac{\alpha_i}{1-\mu_i}\int_{r_i}^{r_{i+1}}rT_i(r)dr+(-1)^i\frac{r_{i+1}^2}{E_i}P\right]. \qquad (8)$$

В процессе наплавки на заготовку попадает расплавленный материал при некоторой температуре T. Частицы расплавленного материала при соприкосновении с поверхностью заготовки очень быстро остывают и, как показано в работе [1], к моменту соединения наплавляемого материала с заготовкой температура его равна T_2 (T_2=150...250 °C). Следовательно, на внешней поверхности заготовки ($r = r_2$) можно принять расчетную температуру T_2. С уменьшением радиуса r она будет резко падать, так как продолжительность наплавки небольшая и температура не успевает достичь больших значений на достаточной глубине. Проведенные нами опыты показали, что с достаточной точностью распределение температуры по радиусу можно записать зависимостью

$$T(r)=T_0+(T_2-T_0)\left(\frac{r}{r_2}\right)^n,$$

где T_0 - температура в центре заготовки ($r = 0$) в предположении, что она сплошная; n - положительное число.

Что касается наплавляемого слоя, то, учитывая его небольшую толщину, температуру можно считать постоянной по толщине и равной T_2.

В заготовке в момент наплавки будут возникать напряжения от неравномерного распределения температуры. Эти напряжения будем называть напряжениями наплавки и обозначать с индексом "н". Напряжения наплавки в заготовке $\sigma''_{1z}, \sigma''_{1z} и\, \sigma''_{1\theta}$ определятся по формулам (6) - (8) при $m = 1$ и $P = 0$. Напряжения наплавки в наплавляемом слое отсутствуют $\sigma''_{2z}=\sigma''_{2r}=\sigma''_{2\theta}=0$.

В дальнейшем при остывании также будут возникать остаточные напряжения, которые будем обозначать с индексом "о". Для определения остаточных напряжений остывания в заготовке необходимо в формулах (6) - (8) принять

$$T_1(r) = -\left[T_0 + (T_2 - T_0)\left(\frac{r}{r_2}\right)^n\right],$$

а для наплавляемого слоя $T_2(r) = -T_2$. В результате остаточные напряжения будут складываться из напряжений, возникающих в процессе наплавки, и напряжений, возникающих при остывании

$$\sigma_{ir} = \sigma''_{ir} + \sigma^0_{ir};\ \sigma_{i0} = \sigma''_{i0} + \sigma^0_{i0};\ \sigma_{iz} = \sigma''_{iz} + \sigma^0_{iz}.$$

Таким образом, как в заготовке, так и в наплавленном слое остаточные напряжения будут создавать объемное напряженное состояние, которое необходимо учитывать при расчетах на прочность восстановленных электромагнитной наплавкой деталей.

Полученные расчетные соотношения позволили разработать алгоритм и составить программу для численных исследований остаточных напряжений при электромагнитной наплавке. Установлено, что для покрытий в зависимости от условий наплавки величина остаточных напряжений изменяется в пределах 200...650 МПа, в основе - от -4 до -20 МПа. Характер их распределения не изменяется: в покрытии формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе - сжимающие тангенциальные и радиальные. Увеличение теплонапряженности процесса электромагнитной наплавки за счет повышения разрядного тока приводит к росту термопластических деформаций в системе покрытие - основа. Так, изменение разрядного тока от 100 до 160 А увеличивает остаточные напряжения в 2,2 раза. Наибольших величин остаточные напряжения достигают на границе раздела покрытия с основой.

Проведенные экспериментальные исследования остаточных напряжений в покрытии и основе, которые определялись рентгеноструктурным анализом, используя метод определения параметров линейно-напряженного состояния металла по смещению линий рентгенограммы, подтвердили достоверность численных результатов определения напряжений, так как расхождение не превышало 16%. Кроме того, экспериментально установлено, что при совмещении электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием как в покрытии, так и в основе формируются остаточные напряжения сжатия с большим градиентом по глубине деформационного слоя покрытий. Шлифование покрытий и последующая магнитно-абразивная обработка увеличивают градиент остаточных напряжений сжатия, которые для покрытий из порошков Fe-10%V, Р6М5Ф3 и С-300 соответственно составляют 730, 640 и 580 МПа.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Литература

1. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле.- Мн.: Навука і тэхніка, 1995. -232 с.

2. Витязь П.А., Ивашко В.С., Манойло Е.Д. и др. Теория и практика газопламенного напыления.- Мн.: Навука і тэхніка, 1993.-295с.

3. Вирник А.М., Морозов И.А., Подзей А.В. //Физика и химия обработки материалов. 1970, № 4. С.53...58.

4. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий.- М.: Машиностроение, 1990.-384 с.

5. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Хейфец М.Л., Чемисов Б.П. //Докл. НАН Беларуси. 1997. Т.41, № 3. С.112...118.

6. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. - М.: Высшая школа, 1968.- 512 с.