

УДК 621.923.7

## ВНУТРЕННИЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ, СФОРМИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ

*Докт. техн. наук, проф. КОЖУРО Л. М., асп. ЗЕЛЕНЦОВ А. Г.*

*Белорусский государственный аграрный технический университет*

Остаточные напряжения в покрытиях существенно влияют на эксплуатационные свойства восстановленных и упрочненных деталей и прежде всего на динамическую прочность при циклических нагрузках. Так, остаточные напряжения сжатия являются резервом повышения прочности деталей, а напряжения растяжения ослабляют их прочность, вызывают возникновение трещин в покрытиях, что приводит к разрушению.

Механизм формирования остаточных напряжений в покрытиях зависит от соотношения и взаимодействия в покрытии силовых и температурных факторов [1]. При восстановлении или упрочнении деталей электромагнитной наплавкой (ЭМН) различных порошков в силу локальных тепловых воздействий на основной металл и быстрого неравномерного охлаждения наплавленного покрытия в последнем формируются остаточные напряжения растяжения [2].

Представляет практический интерес определение остаточных напряжений первого рода (макронапряжений) в покрытиях, полученных ЭМН с поверхностным пластическим деформированием (ППД), а также после их механической обработки. Остаточные макронапряжения в покрытиях определяли методом рентгеноструктурного анализа, используя методику определения параметров линейно-напряженного состояния металла по смещению линий рентгенограммы [3].

Согласно закону Гука относительное изменение длины цилиндра при растяжении составляет

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E},$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $E$  – модуль упругости;  $l$  – длина цилиндра.

Относительное изменение диаметра цилиндра по закону Пуассона

$$\frac{\Delta D}{D} = -\mu \frac{\sigma}{E},$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $D$  – диаметр цилиндра.

Дифференцирование уравнения Вульфа – Брэгга дает

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta \theta}{\theta},$$

где  $d$  – расстояние между кристаллографическими плоскостями;  $\theta$  – угол Вульфа – Брэгга.

Считая кристаллографические плоскости, участвующие в отражении, параллельными оси цилиндра, можно записать

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta D}{D}.$$

Тогда

$$\sigma = -\frac{E \Delta d}{\mu d} = -\frac{E}{\mu} \Delta \theta \operatorname{ctg} \Delta,$$

где  $\Delta \theta$  – смещение максимума рентгеновской линии, вызванное макронапряжениями;

$$\Delta \theta = \theta_{\text{этало́на}} - \theta_{\text{образца}}.$$

Разделение  $K_{\alpha}$  дублета и определение точного положения интерференционной линии проводили по методике, в соответствии с которой

$$2\theta_1 = 2\theta_{\text{ц.т.}} - 0,333 \cdot 2\delta,$$

где  $\theta_1$  – положение линии  $K_{\alpha_1}$ ;  $\theta_{\text{ц.т.}}$  – положение центра тяжести профиля;  $\delta$  – междублетное расстояние, определяемое из соотношения

$$\delta = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \operatorname{tg} \theta,$$

где  $\lambda$  – длина волны рентгеновского луча;  $\Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda$  – разность длин волн  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$  рентгеновских излучений.

Рентгеновский анализ покрытий, нанесенных на образцы из стали 45, проводили на дифрактометре ДРОН-3 в кобальтовом монохроматическом излучении. Съемка профиля рентгеновской линии выполнялась в автоматическом режиме.

Результаты определения остаточных макронапряжений представлены на рис. 1. Анализ эпюр распределения остаточных напряжений в покрытиях показывает, что в результате поверхностной пластической деформации покрытий, изменения удельных объемов при фазовых превращениях, различия коэффициентов линейного расширения материалов порошка и основы в системе покрытие – основа возникают остаточные напряжения сжатия с большим градиентом по глубине деформированного слоя покрытий.

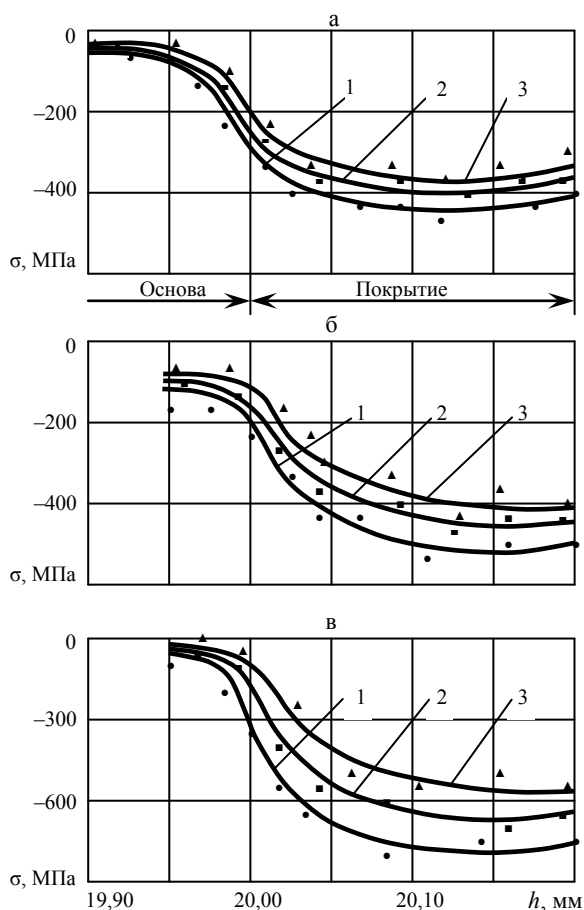


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений 1-го рода по сечению основы и покрытия, полученного: а – ЭМН с ППД; б – ЭМН с ППД и шлифованием; в – ЭМН с ППД и магнитно-абразивной обработкой: 1 – Fe-10 %V; 2 – P6M5Ф3; 3 – C-300

Данные рисунка позволяют сопоставить значения остаточных напряжений в покрытиях в зависимости от химического состава порошков и методов механической обработки. Из рис. 1а следует, что наибольшие остаточные напряжения сжатия имеют покрытия из порошка Fe-10 %V, наименьшие – из порошка C-300. Шлифование покрытий приводит главным образом к изменению градиента напряжений (рис. 1б). Благоприятное воздействие на остаточные напряжения оказывает магнитно-абразивная обработка, после которой они увеличиваются на поверхности покрытий из порошков Fe-10 %V, P6M5Ф3 и C-300 и соответственно составляют: –730, –640 и –580 МПа (рис. 1в). Шлифование образцов и магнитно-абразивную обработку последних проводили по оптимальным режимам [2].

После механической обработки происходят рост остаточных напряжений в покрытии и сдвиг максимума напряжений в глубину. Сравнение эпюр распределения остаточных напряжений показывает, что, начиная с переходной зоны покрытия, они идентичны.

## ВЫВОД

Таким образом, ППД покрытий, полученных ЭМН с ППД, формируют в системе покрытие – основа напряжения сжатия. Шлифование и магнитно-абразивная обработка покрытий увеличивают градиент напряжений. Верхние слои покрытий толщиной до 50–100 мкм представляют собой зону с большим градиентом напряжений, средние – толщиной 100–200 мкм – зону с малыми градиентами напряжений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мрочек, Ж. А. Остаточные напряжения / Ж. А. Мрочек [и др.]. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 317 с.
2. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск: Наука і тэхніка, 1995. – 232 с.
3. Миркин, Л. И. Рентгеноструктурный анализ машиностроительных материалов: Справ. / Л. И. Миркин. – М.: Машиностроение, 1997. – 134 с.

Поступила 13.01.2006