

## УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ КОМБИНИРОВАННЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Щурский Д.С., Афанасенко Д.Е.

**Научный консультант:** к.т.н., доцент Миранович А.В.

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г.Минск, Республика Беларусь*

Долговечность высоконагруженных деталей автотракторной техники (например, валов, осей) в основном определяется их сопротивлением усталости, так как они эксплуатируются в условиях динамических, повторных и знакопеременных нагрузок. При этом эксплуатационные свойства (сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость и др.) таких деталей зависят от качества поверхностного слоя, имеющего свою структуру, фазовый и химический состав [1, 2].

Для восстановления и повышения долговечности изношенных деталей достаточно широкое распространение в ремонтном производстве получили комбинированные технологические способы, основанные на нанесении металлических покрытий и последующем упрочнении сформированного поверхностного слоя. К их числу относится магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (ФМП) и поверхностное пластическое деформирование (ППД) покрытий, совмещенные в одной технологической схеме [3].

Следует отметить, что усталостное разрушение деталей машин, работающих при циклических нагрузках в условиях трения и изнашивания, начинается с поверхностного слоя, от физико-механических свойств которого в значительной степени зависит предел выносливости. Образовавшиеся в покрытиях при МЭУ с поверхностно-пластическим деформированием металлургические дефекты (поры, трещины, остаточные напряжения растяжения и др.), а также при последующей механической обработке покрытий царапины, риски, микротрещины снижают усталостную прочность. Эти дефекты, являясь в процессе работы детали концентраторами напряжений, образуют очаги зарождения усталостной трещины, которая, разрастаясь, приводит к их последующему износу [3, 4].

В связи с этим в работе проводились исследования усталостной прочности поверхностей, полученных комбинированным технологическим способом – МЭУ и ППД. При этом изучалось влияние на усталостную прочность сформированных поверхностей с учетом химического состава композиционных ферромагнитных порошков.

Исследования проводились на образцах круглого сечения из нормализованной стали 45, имеющих соотношение  $l/d = 15$  ( $l = 150$  мм – длина и  $d = 10$  мм – диаметр). В качестве ФМП использовались Fe-5%V и Fe-Ti (ГОСТ 9849-86), ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75).

Образцы после МЭУ и ППД на установке модели УМЭУ-1 подвергались абразивному шлифованию на станке модели ЗУ12А и магнитно-абразивной обработке на установке ЭУ-6, обеспечивая шероховатость поверхности  $Ra = 0,6 - 0,8$  мкм. Испытания образцов проводились в условиях действия знакопеременной нагрузки с постоянной амплитудой на машине модели У-20М [4, 5].

Результаты испытаний на усталость исследуемых материалов (напряжение и соответствующее ему число циклов до разрушения) подвергались статистической обработке, в задачу которой входило определение средних вероятных значений усталости и долговечности при заданных уровнях напряжений.

Кривые выносливости строили в двойной логарифмической системе координат, благодаря чему функциональная зависимость напряжений от числа циклов  $\sigma = f(N)$  представлена уравнением

$$m \lg \sigma + \lg N = \lg C,$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;

$m$  – параметр кривой,  $m = 5 - 100$  (приняли  $m = 10$ );

$N$  – число циклов нагружения;

$C$  – коэффициент.

Следует отметить, что криволинейная зависимость  $\sigma = f(N)$  в логарифмических координатах была приведена к уравнению прямой, что позволило применить метод линейной корреляции.

Для вычисления коэффициентов корреляции и составления корреляционных уравнений, полученные данные испытаний выносливости сводились в специальные таблицы. На основании этих таблиц вычисляли:

а) средние арифметические значения

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}; \quad \bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n},$$

где  $n$  – число испытаний,  $n = 5$ ;  $X_i = \lg N_i$ ,  $Y_i = \lg \sigma_i$ .

б) средние квадратичные отклонения

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}}; \quad S_\sigma = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}},$$

где  $x_i = X_i - \bar{X}$ ,  $y_i = Y_i - \bar{Y}$ , – являются отклонениями от средних арифметических значений.

в) коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum x_i y_i}{n S_N S_\sigma}.$$

Кроме того, составили корреляционное уравнение

$$X - \bar{X} = r \frac{S_n}{S_\sigma} (Y - \bar{Y}).$$

Недостовірність отриманих кореляційних рівнянь перевіряли по преобразованию, введенному Фишером для оценки коэффициента корреляции при малом числе испытаний

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}; \quad \sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}.$$

Затем, задаваясь величиной доверительной вероятности  $P = 0,95$ , вычисляли доверительный интервал для  $Z$  по зависимости

$$Z - \alpha\sigma_z < |Z| < Z + \alpha\sigma_z,$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от уровня доверительной вероятности.

По найденным граничным значениям  $Z$  определяли доверительный интервал коэффициента корреляции, и, если значения его нижней границы оказались больше значения  $r_{кр}$ , определяемого зависимостью

$$r_{кр} = \alpha\sigma_z,$$

то это подтверждало наличие корреляционной связи между напряжением и долговечностью при циклическом нагружении исследуемых материалов, что и имело место при проведении исследований.

Результаты исследований показывают, что различная способность к сопротивлению усталостному разрушению (рис. 1) объясняется неодинаковой чувствительностью материалов покрытий к дислокационному скольжению. Установлено, что усталостная прочность обработанных поверхностей ФМП Fe-5%V, ФБХ-6-2 и Fe-Ti выше эталона соответственно в 1,43, 1,33 и 1,21 раза. При этом в процессе МЭУ и ППД формируются в системе «покрытие-основа» остаточные напряжения сжатия, также увеличивается зона термического влияния. Кроме того, происходит выделение дисперсных карбидов и интерметаллидов, блокирующих сдвиги по плоскости скольжения. Это в конечном итоге обеспечивает повышение поверхностной прочности, особенно проявляющейся в покрытиях со следующими структурами: мартенсит, легированные дисперсные карбиды и интерметаллиды.

Изучение характера излома образцов с покрытием показывает, что усталостные трещины зарождаются как на поверхности образцов, так и в их глубине, то есть в покрытии и зоне адгезии с основой. В покрытиях, полученных МЭУ и ПДД, трещины зарождаются, как правило, в зоне адгезии основы с покрытием [3, 5].

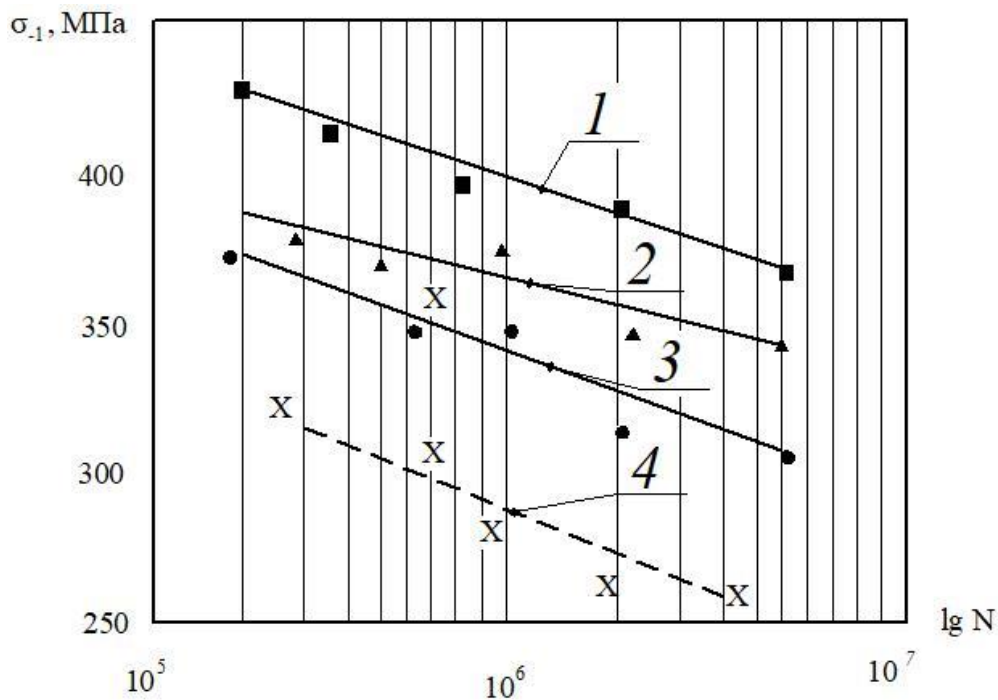


Рисунок 1. Влияние химического состава ФМП на усталостную прочность восстановленных МЭУ и ППД деталей:  
1 – Fe-5%V; 2 – ФБХ-6-2; 3 – Fe-Ti; 4 – сталь 45

Таким образом, проведенные исследования показывают, что для повышения усталостной прочности обрабатываемых поверхностей целесообразно восстановление и упрочнение деталей машин производить комбинированным технологическим способом – магнитно-электрическим упрочнением композиционными ферромагнитными порошками и последующим поверхностным пластическим деформированием покрытий.

#### Список литературы

1. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В.П. Иванова. Москва: Машиностроение, 2003. 672 с.
2. Игнатъев А.Г. Повышение долговечности восстановленных деталей машин на основе управления остаточными напряжениями / А.Г. Игнатъев, А.А. Третьяков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение», 2018, Т. 18, № 1, С. 58-67.
3. Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. Полоцк: ПГУ, 1999. 240 с.
4. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. - Минск : Наука і тэхніка, 1995. 232 с.
5. Акулович Л.М., Миранович А.В. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники. Минск: БГАТУ, 2016. 236 с.