

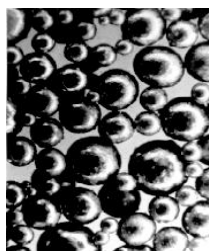
УДК 621.791:621.192

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

канд. техн. наук, доц. В.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Параметрическая надежность оценивается или прогнозируется на основе результатов исследования поведения ряда параметров системы, совокупность которых определяет ее техническое состояние. Поскольку выбор совокупности основных технических параметров в некоторой степени произволен, выбирают независимые параметры с независимыми по каждому из них условиями работоспособности. Это позволяет определять надежность отдельно по каждому из параметров. Условия работоспособности по каждому из основных технических параметров задаются в соответствии с характером поведения параметра и его ролью в обеспечении качества функционирования системы. Параметрическая надежность восстановленных деталей машин основывается на ограничении характера поведения параметра в отношении определенных границ (например, предельная пористость или допустимое количество дефектов в покрытии). Эти границы задают область значений параметра, при которых обеспечивается требуемое качество функционирования.

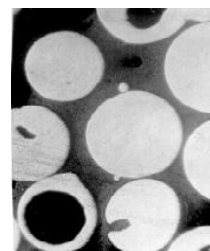
Введение. Одним из параметров, определяющим надежность восстановленных деталей машин, является качество и прочность сцепления материала покрытия и подложки. В настоящее время для упрочнения и восстановления деталей машин, работающих в агрессивных средах и при повышенных температурах, широко применяется покрытие из самофлюсующихся никелевых сплавов, содержащих хром, никель, бор и углерод. Нанесение покрытий осуществляется различными способами, например, индукционной, плазменной, газопорошковой наплавкой, либо газотермическим напылением с последующим оплавлением. При разработке технологии нанесения износостойкого покрытия важно обеспечить высокие физические и механические характеристики зоны сплавления основного металла и покрытия, так как именно они зачастую определяют работоспособность восстановленных и упрочненных деталей. В зависимости от марки основного металла, качества его поверхности, температурно-временных режимов наплавки прочность сцепления основного и наплавленного металлов может быть различной. Необходимо также учесть, что и к напыленным и наплавленным покрытиям предъявляются высокие требования по плотности и однородности. Зона сплавления формируется в условиях значительных температурных и концентрационных градиентов и представляет собой слой толщиной до 0,5 мм переменного химического и фазового состава. Металлические покрытия представляют собой сложные многокомпонентные неравновесные системы, обладающие избыточной свободной энергией, обусловленной наличием в слоях большого количества микро- и макродефектов структуры в частицах присадочного материала. Макродефекты – поры и включения в порошковых композициях. Их существование непосредственно связано с границами раздела фаз твердое тело – газ. Микродефекты распределены с некоторой плотностью в окрестностях макродефектов и обеспечивают локальное термодинамическое равновесие системы порошковый слой – подложка. По мере нагревания системы в ней возникают сложные физико-химические процессы, направленные в соответствии с общими принципами термодинамики в сторону уменьшения избыточной свободной энергии. Интенсивность этих процессов возрастает с повышением температуры и существенно зависит от наследственных свойств наносимого порошка (микро-и макродефектов, химически взаимодействующих реагентов и т.д.). На рисунке представлены форма и строение частиц порошка различных сплавов.



а)



б)



в)

Форма и строение частиц порошка:

а – ПГ-СР4 (фракция менее 200 мкм); б – ПГ-СР2 фракция (400...500 мкм);
в – внутренние поры в частицах порошка ПГ-СР3 (фракция 200...300 мкм)

Восстановление напылением. Покрытие, получаемое напылением, – это слоистый материал, состоящий из деформированных напыленных частиц, соединенных между собой по контактным поверхностям сварными участками. Напыленный слой формируется из мельчайших капелек металла сферической формы, покрытых снаружи, в момент удара их о поверхность материала детали, окисной пленкой. Капельки при ударе деформируются и в результате схватывания закрепляются на поверхности.

Структура слоя, сформированного за один проход, неоднородна и определяется различными размерами и энергетическим состоянием – температурой и скоростью частиц, находящихся в периферийной и центральной зоне двухфазового потока, состоящего из частиц порошка и газа. Образование покрытия последовательной укладкой деформирующихся частиц неизбежно приводит к появлению микропустот, в первую очередь на стыках частиц. Покрытие формируется в атмосфере, поэтому микропустоты заполняются газом, что ухудшает свойства границ. Вследствие большой шероховатости покрытия, быстрого растекания и кристаллизации частиц в зоне контактов с поверхностью ранее нанесенных частиц остаются дефекты и полости, которые образуются также вследствие выделения газов, растворенных в расплавленных частицах [1]. Структура и свойства покрытия зависят от гранулометрического состава напыляемого порошка. С уменьшением размера частиц порошка улучшается заполнение покрытия: плотность его увеличивается, объем микропустот уменьшается, строение покрытия становится более однородным.

К числу дефектов напыленных покрытий относятся отслоение или вздутие покрытия из-за его плохой адгезии к основному металлу, трещины, сплошная пористость, низкая твердость, неоднородность структуры и др.

Для газопламенного напыления часто используются порошки системы Ni – Cr – B – Si, которые являются самофлюсующимися. Покрытия имеют слоистую структуру, свойства покрытий отличаются от свойств компактных материалов. Для таких покрытий характерны: пониженная прочность сцепления на границах между частицами и слоями, обусловленная неполным схватыванием, а также повышенным содержанием оксидов, нитридов, пор и различных включений в пограничных областях; пористость, возникающая в результате газовыделения и кристаллизации частиц с высокими скоростями, а также выплеска материала покрытия при ударе частиц о подложку [2]. Наибольшей пористостью характеризуются поверхностные слои покрытия и слои, прилегающие к подложке. Покрытия имеют различную твердость и микротвердость по поверхности и глубине, неоднородный химический состав, большое количество составляющих микроструктуры. В отдельных частицах и во всем покрытии формируются значительные внутренние напряжения, приводящие к образованию микротрещин.

Прочность сцепления газотермических покрытий с поверхностью определяется совместным влиянием структурных дефектов границы раздела и остаточными напряжениями в ее плоскости. Структурные дефекты возникают из-за неполного контакта деформированных напыленных частиц с напыляемой поверхностью и неполного развития физико-химических связей между контактирующими поверхностями. Остаточные напряжения обусловлены в основном различными теплофизическими и физико-механическими свойствами материалов покрытия и основы, а также разной их зависимостью от температуры [3 – 5].

Восстановление наплавкой. В процессе наплавки как в наплавленном металле, так и в прилегающей зоне могут возникать дефекты [4, 6 – 9], которые снижают эксплуатационную способность наплавленного металла. Наиболее распространены при наплавке трещины. Их подразделяют на кристаллизационные, холодные и околшовные. Кристаллизационные трещины возникают в процессе первичной кристаллизации наплавленного металла и их расположение, как правило, совпадает с направлением роста столбчатых кристаллитов. Физическая неоднородность металла покрытия связана с несовершенством его кристаллической решетки. Особенно много дефектов возникает при дендритной кристаллизации, характерной для наплавленного металла. Ветви дендритов имеют различную пространственную ориентацию, а кристаллиты – блочную структуру, усиливаемую из-за скопления между ветвями дендритов примесей и дислокаций. При наплавке кристаллизующийся металл находится под воздействием растягивающих напряжений, возникающих вследствие несвободной усадки наплавленного металла, который в процессе охлаждения подвержен пластической деформации. При кристаллизации некоторое время металл находится в твердожидком состоянии. Если нарастание напряжений опережает повышение пластичности металла, возникают межкристаллические разрушения. Если же процесс нарастания напряжения происходит тогда, когда металл уже прошел твердожидкое состояние и приобрел достаточную прочность и пластичность, то возникшие напряжения лишь вызовут пластическую деформацию и образование кристаллизационных трещин не произойдет [2, 6].

Холодные трещины в наплавленном металле образуются при сравнительно невысокой температуре (≈ 200 °С). Они возникают тогда, когда металл, казалось бы, уже приобрел высокие прочностные свойства. Характерная черта появления холодных трещин – замедленное их развитие в течение нескольких часов и даже суток. Затем при достижении определенной величины трещины развиваются мгновенно, взрывоподобно, с характерным звуковым эффектом. Холодные трещины возникают как по границам зерен, так и по телу зерна. Околошовные трещины подразделяют на горячие и закалочные. Горячие трещины при некоторых условиях образуются во время наплавки на участках сплавления и перегрева околошовной зоны. Трещины развиваются по границам зерен основного металла и могут распространяться в наплавленный слой. Образование горячих трещин в околошовной зоне объясняют сосредоточением на границах зерен вредных примесей, образующих легкоплавкие включения и прослойки. Закалочные трещины в околошовной зоне появляются в результате возникновения напряжений, обусловленных образованием мартенсита и высоких давлений, создаваемых водородом, заполнившим микроскопические пустоты в кристаллических решетках.

Поры в наплавленном металле представляют собой округлые пустоты, расположенные отдельными группами или цепочками внутри металла и на его поверхности. Поры возникают в процессе первичной кристаллизации. Шлаковые включения образуются вследствие плохой очистки от шлака поверхности предыдущих слоев при многопроходной наплавке; затекания шлака в несплошности металла, возникающие в результате подворотов, наплывов и других дефектов; применения электродов с чрезмерно тугоплавким покрытием; большой скорости наплавки и т.д. Размеры шлаковых включений могут быть от микроскопических до частиц диаметром несколько миллиметров [6, 10]. Форма их бывает округлой и вытянутой.

Качество покрытия при наплавке по слою порошка под флюсом в значительной степени зависит от толщины порошкового слоя. При толщине слоя порошка более 6...9 мм нарушается устойчивость дуги, в наплавленном металле появляются такие дефекты, как наплывы и несплавления [11].

Дефекты материала детали. Детали машин обычно содержат как врожденные дефекты и трещины, так и возникшие при обработке, изготовлении и транспортировке; все они подчиняются некоторой закономерности распределения по количеству и размерам. Это распределение в совокупности с локальным напряженным состоянием и средой определяют потенциальные центры возникновения трещины. Чаще всего трещина берет начало от какого-нибудь небольшого поверхностного дефекта детали по истечении инкубационного периода конечной продолжительности. Затем трещина растет под совместным влиянием приложенной нагрузки и окружающей среды. После того как трещина достигла критической глубины, происходит быстрое разрушение.

Отказ материала с покрытием в значительной степени определяется наличием дефектов в металле и материале покрытия, а также их взаимодействием с частицами присадочного материала. Механическая обработка таких деталей приводит к изменениям структуры поверхностного слоя; ранее скрытые дефекты и поры выходят на поверхность, являясь очагами разрушения [12, 14].

Наличие дефектов обусловлено как технологией изготовления изделия, так и его эксплуатацией. Н.А. Махутов и другие исследователи предложили непровары, поры, несплавления и прочие дефекты при расчетах показателей надежности рассматривать как трещины [13, 15]. Если обозначить критический размер дефекта a_c , размер дефекта в момент времени $t - a_t$ и считать их фиксированными случайными величинами, то вероятность безотказной работы $R(t)$ материала с покрытием можно представить в виде вероятности:

$$R(t) = 1 - F(t) = P\{a_t \leq a_c\} = \int_0^{\infty} [1 - F_t(a_t, Q_t)] f_c(a_c, Q_c) da_c, \quad (1)$$

где $F(t)$ – функция распределения ресурса; $f_c(a_c, Q_c)$ – плотность распределения критического размера дефекта; Q_c, Q_t – векторы параметров распределения, зависящие от времени t [15]. В качестве аппроксимирующей функции плотности распределения размера дефекта можно использовать: двухпараметрический закон Вейбулла – Гнеденко, распределение Эрланга, законы нормального и равномерного распределения и др. [16]. Размер критического дефекта можно найти через характеристики статической трещиностойкости.

Функция риска $h(t)$ определяется из выражения:

$$h(t) = F'(t)/(1 - F(t)), \quad (2)$$

где $F'(t)$ – производная функции распределения ресурса по времени t .

Надежность восстановленной детали. Восстановление может носить различный характер: элемент может либо заменяться новым, идентичным ему элементом, либо подвергаться такому ремонту, который полностью восстанавливает все его исходные свойства. Считаем, что в момент отказа элемент подвергался ремонту, который полностью восстанавливает его исходные свойства. Предполагается также, что время восстановления мало по сравнению с временем жизни элемента [17]. Пусть элемент начинает свою работу в момент $t = 0$ и, проработав случайное время τ_1 , выходит из строя. В этот момент он заменяется новым элементом, который, проработав время τ_2 , выходит из строя и заменяется третьим элементом. Естественно предположить, что времена жизни элементов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ независимы [18]. Случайные времена $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ имеют один и тот же закон распределения, который обозначим через $F(t)$:

$$F(t) = P \tau_n < t. \quad (3)$$

Моменты отказов или восстановлений $t_1 = \tau_1, t_2 = \tau_1 + \tau_2, \dots, t_n = \tau_1 + \dots + \tau_n, \dots$ образуют случайный поток и среднее время жизни элемента и его дисперсия конечны:

$$T_0 = M\tau_n = \int_0^{\infty} 1 - F(t) dt; \quad (4)$$

$$\sigma^2 = D\tau_n = 2 \int_0^{\infty} t [1 - F(t)] dt - T_0^2.$$

Пусть существует непрерывная плотность распределения $f(x) = F'(x)$.

При изучении процесса восстановления основную роль играет случайная величина $v(t)$, равная числу отказов, произошедших за время t .

Величина $v(t)$ определяется из условия:

$$t_{v(t)} < t \leq t_{v(t)+1}. \quad (5)$$

Фундаментальное значение при изучении процесса восстановления играет так называемая функция восстановления $H(t)$, которая равна среднему числу отказов, произошедших до момента t [17]. Функция $H(t)$ удовлетворяет интегральному уравнению:

$$H(t) = F(t) + \int_0^t H(t-\tau) dF(\tau), \quad (6)$$

которое удобно использовать при изучении некоторых свойств $H(t)$. Важная роль функции $H(t)$ объясняется тем, что через нее выражаются все основные характеристики процесса восстановления.

Заключение. Рассмотренные величины можно использовать при решении задач надежности восстановленных деталей машин. Сущность методов расчета деталей машин на надежность сводится к определению одной или нескольких количественных характеристик надежности. Анализ этих показателей позволяет указать пути повышения надежности машин в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В.Н. Анциферов [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
2. Точение износостойких защитных покрытий / С.А. Клименко [и др.]. – Киев: Техніка, 1997. – 142 с.
3. Куприянов, И.Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И.Л. Куприянов, М.А. Геллер. – Минск: Наука и техника, 1976. – 234 с.
4. Витязь, П.А. Теория и практика газопламенного напыления / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1993. – 295 с.
5. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 1998. – 583 с.
6. Шехтер, С.Я. Наплавка металлов / С.Я. Шехтер, А.М. Резницкий. – М.: Машиностроение, 1982. – 71 с.
7. Ивашко, В.С. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий / В.С. Ивашко, И.Л. Куприянов, А.И. Шевцов. – Минск: Наука и техника, 1996. – 375 с.
8. Шипко, А.А. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А.А. Шипко. – Минск: Наука и техника, 1995. – 280 с.
9. Григорьянц, А.Г. Оборудование и технология лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов. – М.: Высш. шк., 1990. – 159 с.
10. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
11. Дорожкин, Н.Н. Дуговая газопорошковая наплавка / Н.Н. Дорожкин, Н.Н. Петюшев. – Минск: Беларусь, 1989. – 94 с.
12. Завистовский, В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями / В.Э. Завистовский. – Новополоцк: Изд-во ПГУ, 1999. – 144 с.
13. Филонов, И.П. Вероятностно-статистические методы оценки качества в машиностроении / И.П. Филонов, А.И. Медведев. – Минск: Тесей, 2000. – 128 с.
14. Завистовский, В.Э. Физические основы расчета на надежность восстановленных деталей машин / В.Э. Завистовский // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления: сб. науч. тр.: в 3-х т. – Минск: Технопринт, 2002. – Вып. 1, Т. 2. – С. 358 – 360.
15. Махутов, Н.А. Применение численных методов расчета показателей надежности элементов конструкций с повреждениями / Н.А. Махутов, И.И. Кокшаров, А.М. Лепихин // Проблемы прочности. – 1991. – № 5. – С. 3 – 8.
16. Завистовский, В.Э. Обзор законов распределения случайных величин при расчетах надежности технических систем / В.Э. Завистовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2004. – № 4. – С. 108 – 122.
17. Кокс, Д.Р. Теория восстановления / Д.Р. Кокс, В.Л. Смит. – М.: Сов. радио, 1967. – 300 с.
18. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

Поступила 04.09.2008