

УДК 62-405.8

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПОКРЫТИЯ НА ПРОЦЕСС ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОПОР С ТРЕЩИНАМИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

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

При определенных условиях трещины в металле способны залечиваться (уменьшать свой объем), что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик материала. Рассматривается возможный результат залечивания трещин при восстановлении работоспособного состояния деталей машин в рамках модели структурно-диффузионного механизма. При диффузии по границам зерен энергия активации диффузии хрома меньше, чем по вакансиям; скорость залечивания трещин главным образом определяется значением и изменением энергии активации диффузии атомов Cr. Увеличению скорости залечивания трещин способствует увеличение температуры отжига.

Ключевые слова: микротрещины, восстановление, структурно-диффузионный механизм, покрытия, хром, термообработка.

Введение. Дефекты в твердых телах, в частности в металлах, могут быть различного типа и происхождения. Дефектная структура твердых тел формируется уже на этапе получения самого материала. В процессе изготовления из него изделий и при эксплуатации готовых изделий она может существенно трансформироваться. При этом может изменяться количество самих дефектов и происходить их переформирование с образованием новых типов нарушений. Указанная трансформация дефектов оказывает существенное влияние на прочность сцепления покрытия с основным металлом при восстановлении–упрочнении работоспособного состояния деталей узлов трения. Наибольшее применение нашли самофлюсующиеся сплавы системы Ni(Co)–Cr–D–Si. Покрытия имеют слоистую структуру, и 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 [1]. 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.

Основная часть. Детали машин и элементы конструкций 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 взаимодействие с частицами присадочного материала (рисунок 1).

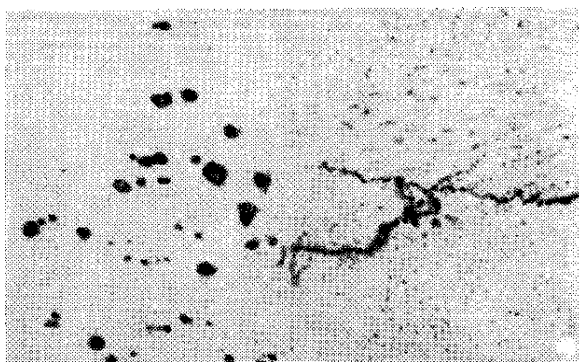


Рисунок 1. – Начало межкристаллитной микротрещины в металле покрытия на границе зерна
(увеличение 100:1)

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.

В материаловедении металлов состояние поверхности и зарождение трещин во многом определяет сопротивление материалов деформации и разрушению. При определенных условиях трещины в металле способны залечиваться (уменьшать свой объем), что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик материала.

Структурно-диффузионный механизм взаимодействия пор с трещинами. Трещины являются стоками для точечных дефектов и микропор в твердом теле. Процесс залечивания (разрастания) связан с потоком микропор (вакансий) от трещины (к трещине). Известно, что концентрация вакансий у поверхности малых трещин (пор) выше, чем у больших, и следовательно, появляется поток вакансий от малых трещин к большим. Происходит залечивание малых трещин. Поток микропор на поверхность единицы длины трещины f рассчитывается по формуле [2; 3]

$$f = \frac{\gamma n_1}{R} \sqrt{\frac{D}{n_2}} \frac{K_1(z)}{K_0(z)}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{2\alpha\Omega}{kT}$; $z = R\sqrt{\frac{n_2}{D}}$;

R – радиус трещины;

D – эффективный коэффициент диффузии для дефектов данного типа;

n_1, n_2 – константы;

α – удельная поверхностная энергия;

Ω – характерный объем одной микропоры (дефекта);

T – абсолютная температура;

$K_i(z)$ – цилиндрические функции Макдональда i -го порядка.

Учтем, что температурная зависимость коэффициента диффузии дефектов может быть описана известным соотношением

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}, \quad (2)$$

где E_a – энергия активации диффузии дефекта;

D_0 – постоянная величина;

k – постоянная Больцмана.

Таким образом, поток микропор оказывается сложной функцией многих параметров: температуры, коэффициента диффузии, поверхностной энергии, радиуса трещины.

Рассмотрим диффузию микропор в объеме, прилегающем к открытой трещине цилиндрической формы. Тогда изменение объема трещины ΔV длиной h за время t рассчитаем как

$$\Delta V = 2\pi R h f t \Omega. \quad (3)$$

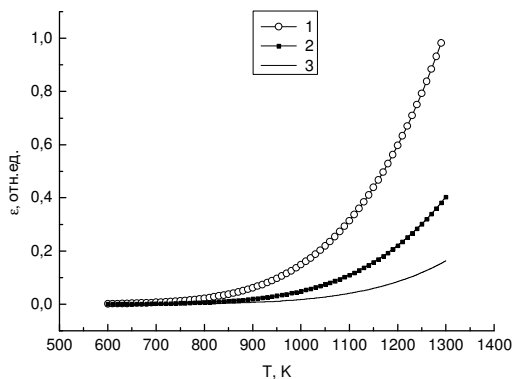
При оценке процесса залечивания трещины необходимо определить относительное изменение объема трещины (относительную скорость залечивания трещины) $\epsilon = \Delta V/V$.

На рисунке 2 представлены зависимости относительного изменения объема трещины от температуры для различных значений энергии активации диффузии микропор. Известно [4], что в металлах энергия активации для вакансий лежит в интервале 0,9–2,0 эВ.

Как видно из рисунка 2, изменение энергии активации пор в небольшом интервале 1–1,25 эВ существенным образом влияет на параметр залечивания. Кроме этого, скорость процесса залечивания зависит от температуры. С ростом температуры резко возрастает отличие в скорости залечивания в исследуемом интервале энергий.

Предполагается, что поток примесных атомов в процессе залечивания должен быть на порядок меньше вакансионного механизма, поскольку энергия миграции для примесей E_a лежит в широких пределах от 1 до 5 эВ. Таким образом, основное влияние пор на залечивание трещин связано с низким значением энергии активации диффузии пор.

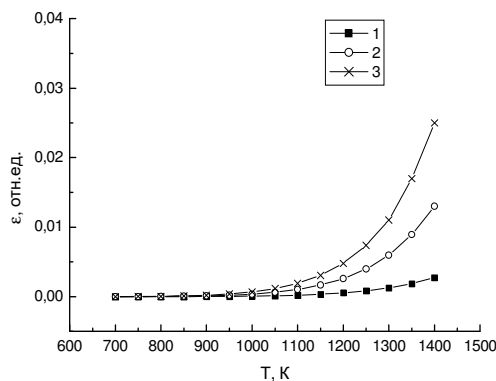
Рассмотрим диффузию атомов Сг в объеме, прилегающем к открытой цилиндрической трещине. Изменение объема трещины ΔV длиной h за время t определим по формуле (3).



1 – 1; 2 – 1,13; 3 – 1,25 ($D_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $t = 20 \text{ ч}$)

Рисунок 2. – Зависимость относительного изменения объема трещины от температуры при различных энергиях активации пор, эВ

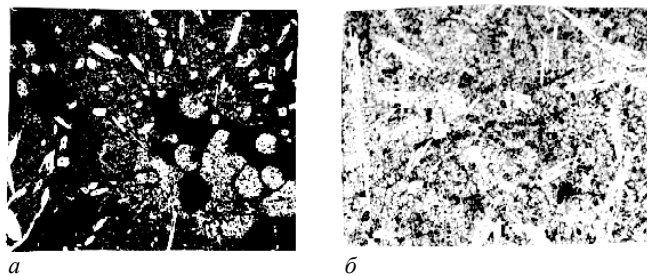
На рисунке 3 представлены результаты моделирования зависимости относительного изменения объема трещины при диффузии атомов хрома. Для хрома в α -Fe энергия активации лежит в пределах от 2,17 до 2,4 эВ, а частотный фактор – от 0,89 до 0,78 $\text{см}^2/\text{с}$. При переходе от диффузии по вакансиям (кривая 1) к диффузии по границам зерен металла (кривые 2, 3), где структура, как правило, чрезвычайно сильно искажена, процесс диффузии значительно ускоряется. Это связано с тем фактом, что при диффузии по границам зерен энергия активации диффузии хрома меньше, чем по вакансиям [5].



1 – 2,4; 2 – 2,2; 3 – 2,0 ($D_0 = 0,85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, время отжига $t = 20 \text{ ч}$)

Рисунок 3. – Зависимость относительного изменения объема трещины от температуры отжига при различных энергиях активации диффузии хрома, эВ

Результаты стереометрического анализа показали, что размер, количество и распределение микропор в покрытии существенно изменяются в зависимости от режима термообработки. Покрытия, наплавленные при температуре 1000–1050 °C и малых выдержках, имеют пористость до 10%. Поры мелкие, не более 0,2 мм, равномерно распределены по толщине слоя покрытия. При температурах 1050 °C и выше формируется практически беспористое покрытие (рисунок 4).



a – $T = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 5 \text{ мин}$; *б* – $T = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 20 \text{ мин}$

Рисунок 4. – Изменение плотности и структуры покрытия при нагреве (x60)

Заключение. 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. Сопротивление восстановленных деталей машин с покрытиями усталостному разрушению в значительной степени зависит от состава, структуры и свойств материала подложки и покрытия, а также технологии того или иного метода получения защитного покрытия, характера и параметров нагружения. Предварительные результаты исследования говорят о том, что скорость залечивания трещин главным образом определяется значением и изменением энергии активации диффузии атомов Cr. При кратковременной температурной обработке температура от максимума на поверхности уменьшается вглубь материала. На поверхности поры температура различна, и атомы, «испаряясь» с «горячей» поверхности, конденсируются на «холодной». В итоге пора перемещается как единое целое. Учитывая, что коэффициент поверхностной диффузии больше чем объемной, вклад в изменение размера поры диффузии по границам зерен может быть существенным. Кроме того, разность температур создает давление, сжимающее пору в направлении градиента температуры.

В результате учета перечисленных факторов можно ожидать, что при кратковременной высокотемпературной обработке в приповерхностной области металла малые поры залечиваются полностью; поры, лежащие близко к поверхности, выходят на поверхность, создавая беспористую «корку», что приводит к дополнительному упрочнению материала. Можно предположить, что увеличению скорости залечивания трещин способствует последующая термообработка покрытия, позволяющая повысить их прочность за счет уменьшения общей пористости и размеров поровых каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск : Технопринт, 2004. – 200 с.
2. Завистовский, В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями / В.Э. Завистовский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 1999. – 144 с.
3. Zavistovskiy, V. On interaction between cracks and particles in coated materials / V. Zavistovskiy, E. Bogdanova, S. Zavistovskiy // Fracture mechanics and physics of construction materials and structures : Materials of II International symposium, Lviv-Dubliany, 7–10 Nov. 1996. – P. 45–48.
4. Фистуль, В.И. Физика и химия твердого тела / В.И. Фистуль. – М. : Металлургия, 1995. – 486 с.
5. Завистовский, В.Э. Влияние хрома на процесс взаимодействия пор с трещинами [Электронный ресурс] / В.Э. Завистовский, А.С. Вабищевич // Инновационные технологии в машиностроении : электрон. сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 19–20 апр. 2018 г. – Новополоцк : ПГУ, 2018. – С. 66–69. – URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/22014>.

REFERENCES

1. Belocerkovskij, M.A. (2004). *Tekhnologii aktivirovannogo gazoplamnennogo napyleniya antifrikcionnyh pokrytij* [Technologies of activated flame spraying of antifriction coatings]. Minsk : Tekhnoprint. (In Russ.).
2. Zavistovskiy, V.E. (1999). *Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov s pokrytiami* [Fracture mechanics and strength of materials with coatings]. Novopolotsk: Polotsiy State University. (In Russ.).
3. Zavistovskiy, V., Bogdanova, E., & Zavistovskiy, S. On interaction between cracks and particles in coated materials. [Fracture mechanics and physics of construction materials and structures] (45–48).
4. Fistul', V.I. *Fizika i khimiya tverdogo tela* [Physics and chemistry of solid state]. Moscow : Metallurgiya. (In Russ.).
5. Zavistovskiy, V.E., & Vabishchevich, A.S. (2018). Vliyaniye khroma na protsess vzaimodeystviya por s treshchinami [Influence of chromium on the process of interaction of pores with cracks]. *Innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii* [Innovative technologies in mechanical engineering]. Novopolotsk : PGU. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/22014>

Поступила 05.11.2021

THE INFLUENCE OF COATING COMPONENTS ON THE PROCESS OF INTERACTION OF MICROPORES WITH CRACKS DURING THE RESTORATION OF MACHINE PARTS

V. ZAVISTOVSKY, S. ZAVISTOVSKY

Under certain conditions, cracks in the metal can heal (reduce their volume), which leads to an improvement in the performance characteristics of the material. The possible result of the healing of cracks during the restoration of the functional state of machine parts within the framework of the model of the structural-diffusion mechanism is considered. When diffusing along grain boundaries, the activation energy of chromium diffusion is less than for vacancies; the rate of crack healing is mainly determined by the value and change in the activation energy of diffusion of Cr atoms. An increase in the annealing temperature contributes to an increase in the crack healing rate.

Keywords: microcracks, restoration, structural diffusion mechanism, coatings, chrome, heat treatment.