

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЪЁМНЫХ КУЛАЧКОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ВАЛА ПОСЛЕ ДИФфуЗИОННОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Гусейнов А.Г.¹, Керимов А.Ф.¹, Гусейнзаде М.Б.², Мирзазаде Н.М.²

¹*Азербайджанский технический университет, Баку;*

²*Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана, Баку*

Ключевые слова: распределительный вал, съёмный кулачок, диффузионная металлизация, борохромирование, микротвёрдость, износостойкость, диффузионный слой.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования физико-механических свойств съёмных кулачков распределительного вала после диффузионного хромирования и комплексного борохромирования. Рассмотрены закономерности формирования диффузионного слоя, распределение микротвёрдости по глубине покрытия, а также влияние технологических режимов обработки на структуру и эксплуатационные характеристики поверхностного слоя. Установлено, что комплексное борохромирование обеспечивает формирование более толстых и менее хрупких диффузионных слоёв по сравнению с традиционным диффузионным хромированием. Показано, что применение данной технологии позволяет существенно повысить износостойкость рабочих поверхностей и увеличить ресурс съёмных кулачков распределительного вала.

INVESTIGATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF DETACHABLE CAMSHAFT LOBES AFTER DIFFUSION METALLIZATION

Huseynov A.G.¹, Karimov A.F.¹, Huseynzade M.B.², Mirzazade N.M.²

¹*Azerbaijan Technical University, Baku;*

²*Azerbaijan National Aerospace Agency, Baku*

Keywords: camshaft, detachable cam, diffusion metallization, borochromizing, microhardness, wear resistance, diffusion layer.

Abstract. The paper presents the results of studying the physical and mechanical properties of detachable camshaft lobes after diffusion chromium plating and complex borochromizing. The regularities of diffusion layer formation, microhardness distribution over the coating depth, and the influence of technological treatment conditions on the structure and performance of the surface layer are considered. It was established that complex borochromizing provides the formation of thicker and less brittle diffusion layers compared with traditional diffusion chromium plating. The obtained results show that this technology significantly improves wear resistance and increases the service life of detachable camshaft lobes.

Введение

В современных двигателях внутреннего сгорания надёжность и долговечность газораспределительного механизма во многом определяется состоянием рабочих поверхностей распределительного вала и его элементов. Одним из наиболее нагруженных элементов данного механизма являются съёмные кулачки распределительного вала, которые в процессе эксплуатации работают в условиях высоких контактных напряжений, ударно-абразивного изнашивания и воздействия агрессивных эксплуатационных сред.

В результате длительной эксплуатации происходит интенсивный износ рабочих поверхностей кулачков, что приводит к снижению эффективности работы двигателя, увеличению расхода топлива и повышению затрат на техническое обслуживание и ремонт. В большинстве случаев износ кулачков требует замены всего распределительного вала или сопряжённых деталей, что является экономически нецелесообразным и технологически сложным процессом.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка эффективных методов восстановления и упрочнения съёмных кулачков распределительного вала, обеспечивающих повышение их износостойкости и эксплуатационного ресурса. Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение методов диффузионной металлизации, позволяющих формировать на поверхности деталей высокоадгезионные упрочнённые слои с высокой твёрдостью и устойчивостью к изнашиванию [1-3].

Среди современных методов поверхностного упрочнения особый интерес представляет комплексное диффузионное насыщение сталей бором и хромом – борохроммирование. Данный процесс позволяет формировать на поверхности деталей диффузионные слои значительной толщины с благоприятным фазовым составом и высокой микротвёрдостью.

Целью настоящей работы является исследование физико-механических свойств и структурного состояния поверхностных слоев съёмных кулачков распределительного вала после диффузионного хромирования и комплексного борохроммирования.

Материалы и методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на образцах и деталях, изготовленных из конструкционных и легированных сталей, применяемых при производстве съёмных кулачков распределительных валов двигателей внутреннего сгорания. В качестве исследуемых материалов использовались стали ХВГ, ШХ15, 18Х2Н4ВА, 30ХГСА, 45 и У8, широко применяемые в машиностроении для изготовления высоконагруженных деталей (табл. 1).

Табл. 1. Таблица Химический состав исследуемых сталей, %

Марка стали	C	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Si	P
45	0,42–0,50	0,50–0,80	0,25	≤0,30	–	–	–	0,17–0,37	≤0,035
18Х2Н4ВА	0,14–0,20	0,25–0,55	1,35–1,64	4,0–4,4	–	–	0,30–0,40	0,17–0,37	≤0,025
30ХГСА	0,28–0,34	0,80–1,10	0,80–1,10	≤0,30	–	–	–	0,17–0,30	≤0,025
ШХ15	0,95–1,05	0,20–0,40	1,30–1,65	≤0,30	–	–	–	0,17–0,37	≤0,027
ХВГ	0,90–1,05	0,80–1,10	0,90–1,20	≤0,35	0,30	1,20–1,60	0,05	0,15–0,35	≤0,030
У8	0,76–0,83	0,17–0,28	≤0,20	≤0,20	–	–	–	0,17–0,33	≤0,025

Диффузионная обработка выполнялась в шахтных печах при температуре 950-1150°C с выдержкой 2-6 часов, что обеспечивало формирование диффузионных слоев достаточной толщины для восстановления и упрочнения изношенных поверхностей деталей [7, 8].

Металлографические исследования структуры поверхностных слоев проводились на микрошлифах, изготовленных по стандартной методике. Изучение микроструктуры выполнялось с использованием металлографического микроскопа МИМ-8 при увеличении до $\times 500$.

Микротвёрдость диффузионных покрытий определялась методом Виккерса на микротвердомере ПМТ-ЗМ. Измерения проводились по глубине диффузионного слоя для определения распределения микротвёрдости от поверхности к сердцевине материала.

Фазовый состав диффузионных покрытий исследовался методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-1 в излучении хрома. Дополнительно выполнялся спектральный анализ содержания углерода в поверхностных слоях и сердцевине образцов.

Полученные экспериментальные данные позволили определить влияние режимов диффузионной металлизации на толщину диффузионного слоя, микротвёрдость покрытия и структурно-фазовое состояние поверхностных слоев съёмных кулачков распределительного вала [3-5, 9].

Результаты исследования и их обсуждение. Проведённые экспериментальные исследования показали, что применение диффузионной металлизации оказывает существенное влияние на физико-механические свойства поверхностных слоев съёмных кулачков распределительного вала. В результате обработки на поверхности исследуемых образцов формируются упрочнённые диффузионные слои, характеризующиеся высокой микротвёрдостью и повышенной устойчивостью к абразивному и ударно-абразивному изнашиванию. Толщина диффузионного слоя зависит от химического состава стали, температуры процесса и продолжительности выдержки.

Установлено, что (рис. 1) при комплексном борохромиировании на поверхности стали формируются диффузионные слои, состоящие преимущественно из боридов железа и хрома $(\text{Fe,Cr})\text{B}$ и $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$. Данные соединения обладают высокой твёрдостью и обеспечивают значительное повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей.

Распределение микротвёрдости по глубине диффузионного слоя представлено на рисунке 2.

Как видно из графика (рис. 2), максимальные значения микротвёрдости наблюдаются на поверхности покрытия и достигают 1800-2100 HV. По мере удаления от поверхности вглубь материала микротвёрдость постепенно уменьшается и на глубине около 200-260 мкм приближается к значениям, характерным для основного металла.

Металлографический анализ показал, что структура диффузионного слоя имеет характерную игольчатую или мелкозернистую морфологию, в зависимости от химического состава стали. При этом толщина сформированного диффузионного слоя может достигать 350-480 мкм, что значительно превышает толщину слоя, получаемого при традиционном диффузионном хромировании.

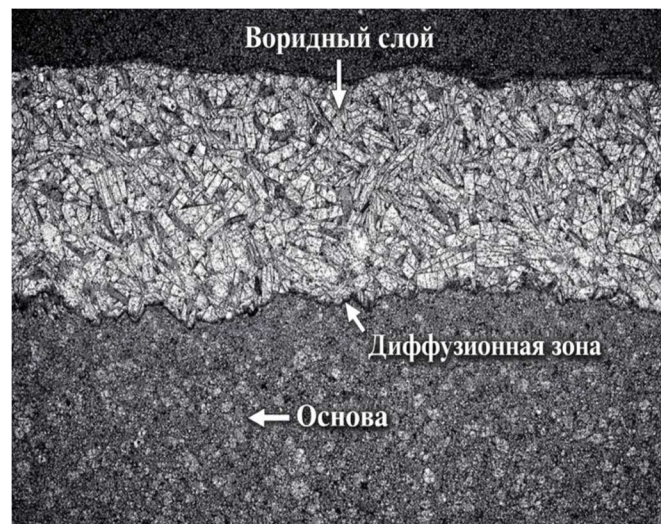


Рис. 1. Микроструктура диффузионного слоя после комплексного борохромирования

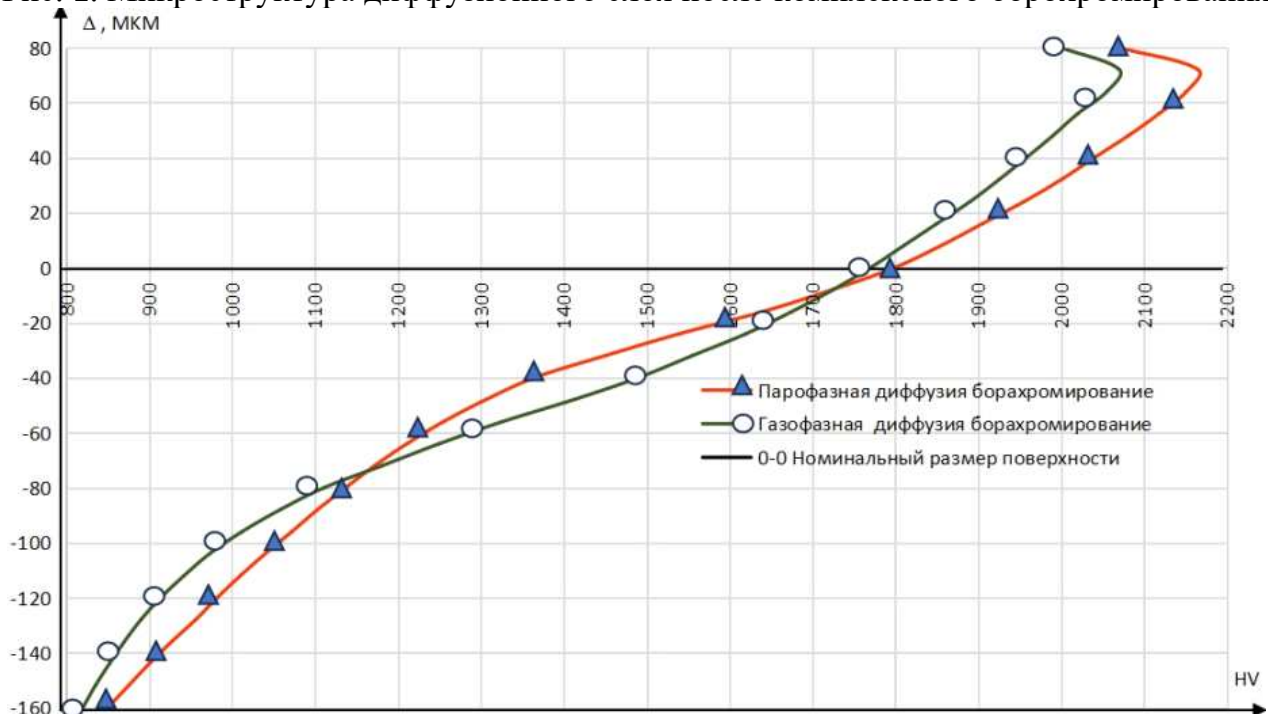


Рис. 2. Зависимость микротвёрдости (Hm) диффузионного слоя от его толщины (Δ) при комплексной диффузионной металлизации. Приращение диффузионного слоя на поверхности детали (0-80 мкм), диффузионного слоя по глубине детали (-160-0 мкм)

Также установлено, что между толщиной диффузионного слоя и приращением линейных размеров деталей существует определённая корреляционная зависимость. В среднем увеличение размеров образцов составляет около половины толщины сформированного покрытия, что позволяет использовать данный процесс для восстановления изношенных поверхностей деталей.

Следует отметить, что высокая температура процесса диффузионной металлизации приводит к снижению твёрдости сердцевины вследствие процессов рекристаллизации и высокотемпературного отжига. В связи с этим для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик деталей целесообразно применять локальную индукционную закалку рабочих поверхностей кулачков после диффузионной обработки.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения комплексного борохромирования для упрочнения и восстановления съёмных кулачков распределительного вала, работающих в условиях высоких контактных нагрузок и интенсивного изнашивания.

Заключение. Проведённые исследования показали, что применение методов диффузионной металлизации является эффективным способом повышения износостойкости и эксплуатационной надёжности съёмных кулачков распределительного вала.

Установлено, что в результате диффузионного хромирования и комплексного борохромирования на поверхности исследуемых сталей формируются упрочнённые диффузионные слои, характеризующиеся высокой микротвёрдостью и благоприятным структурно-фазовым состоянием.

Экспериментальные результаты показали, что микротвёрдость диффузионного слоя достигает максимальных значений на поверхности покрытия и постепенно уменьшается по мере удаления вглубь материала, формируя градиентную структуру, способствующую повышению сопротивления изнашиванию.

Показано, что комплексное борохромирование по сравнению с традиционным диффузионным хромированием обеспечивает формирование более толстых диффузионных слоев с меньшей хрупкостью и более стабильными эксплуатационными характеристиками.

Установлена корреляционная зависимость между толщиной диффузионного слоя и приращением линейных размеров деталей, что позволяет использовать процесс диффузионной металлизации не только для упрочнения, но и для восстановления изношенных поверхностей прецизионных деталей.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения комплексной диффузионной металлизации для восстановления и упрочнения съёмных кулачков распределительного вала. Применение данной технологии позволяет увеличить ресурс деталей газораспределительных механизмов в 2–4 раза по сравнению с серийными образцами.

Список литературы

1. Huseynov A., Nazarov I., Huseynli F., Safarov M. Challenges of property inheritance during the technological processing of fuel pump precision parts // *Tribologia - Finnish Journal of Tribology*. 2025, vol. 42(1-2), pp. 72-79. doi.org/10.30678/fjt.160975.
2. Huseynov A., Huseynli F., Safarov M. Reliability Prediction of Precision Parts of Fuel Pumps with Enhanced Surface Hardness Achieved Through Laser Technology // *Tribologia - Finnish Journal of Tribology*. 2025, vol. 42(1-2), pp. 64-71. doi.org/10.30678/fjt.152491.
3. Guseinov A.G. Lapping the precision parts with diffusion coatings // *Russian Engineering Research*. 2002, vol. 22, no.11, pp. 50-61.
4. Гусейнов А., Керимов А. Изучение износа распределительного вала двигателя внутреннего сгорания // *Вестник Азербайджанской инженерной академии*. – 2025. – №17(3). – С. 35-46. – doi.org/10.52171/herald.291.
5. Abbasov V.A., Amirov F.G., Karimov A.F. Wear properties of camshaft cams and Improvement of their wear resistance // *RT&A*. 2025, no. 7(83), vol. 20, pp. 297-303.
6. Amirov F.G., Abbasov V.A., Kerimov A.F., Rzayeva V.H. Design Features of New Camshaft // *Russian Engineering Research*. 2025, vol. 45, pp. 1244-1247. doi.org/10.3103/S1068798X25702132.

7. Abbasov V., Amirov F., Karimov A. Features of the New Design of the Camshaft of Internal Combustion Engines. In: Karakoc, T.H., Abdullayev, K., Dalkiran, A., Mirzayev, F., Aghayev, E., Cinoğlu, B. (eds) Research and Updates on the Use of Artificial Intelligence in Drone Technology // ISUDEF 2024. Sustainable Aviation. – Springer, Cham. 2026. – P. 282-288. – doi.org/10.1007/978-3-032-07678-6_50.
8. Guseinov A.G., Serviceability of machine and equipment parts reconditioned and hardened by diffusion metallization // Russian Engineering Research. 2000, vol. 21, no. 10, pp. 49-55.
9. Guseinov A.G. Reliabilitation of precision machine parts by diffusion metallization // Russian Engineering Research. 2000, vol. 20, no. 5, pp. 33-38.

Сведения об авторах:

Гусейнов Алекпер Гюльяхмед оглы – д.т.н., профессор, заведующий кафедры «Специальные технологии и оборудование»;

Керимов Азад Фейруз оглы – ассистент кафедры «Специальные технологии и оборудование»;

Гусейнзаде Микаил Бабек оглы – докторант;

Мирзазаде Нухад Мирза оглы – докторант.