

2. Ракетостроение. Отраслевые решения. Холдинговая компания «Композит». Россия. Москва. 2009 – 2014. <http://www.hccomposite.com/sectors/126/>.
3. Сетчатые конструкции из органо-углепластиков. ФНПЦ ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения». Россия. Хотьково. http://www.tsniism.ru/production_4.htm.
4. Коваленко, В.А. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения её массовой и функциональной эффективности. / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев – Журнал «Авиационно-космическая техника и технология», №5 (82), 2011. – С.14-20.

УДК 620.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИНЖЕКТОРА НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕМ

Кузнецова Т.А.¹, Ширяева Т.И.¹, Чижик С.А.¹, Кравчук А.С.²,
Мишак А.³, Фриц М.³, Чабан А.³

¹ Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

² Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

³ Морская академия, Гдыня, Республика Польша

Для большинства деталей машин прочностные свойства поверхности являются определяющими для надежной работы всего механизма. Под прочностью материала понимают его способность сопротивляться разрушению в результате силового воздействия [1]. Характеристиками, позволяющими достоверно оценить прочностные свойства материалов, являются микротвердость и модуль упругости. В данной работе оценка изменения прочностных характеристик поверхностных слоев детали вследствие ее работы проводилась на примере деталей инжектора топлива (рисунок 1).

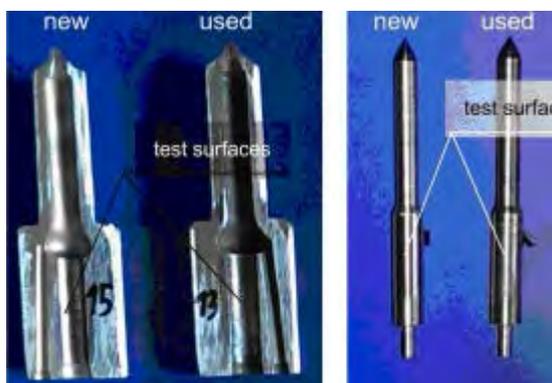


Рисунок 1 – Корпус и игла инжектора топлива

Внутренняя поверхность корпуса и наружная поверхность иглы подвергаются гидродинамическому давлению $12 \cdot 10^6 - 18 \cdot 10^6$ Па. При использовании топлива низкого качества помимо общего давления добавляется воздействие примесных абразивных частиц размером от десятых долей микрометра до нескольких микрометров, что ведет к образованию царапин и углублений в зазоре между корпусом и иглой и может привести к разгерметизации узла и его разрушению ранее запланированных 6000 часов.

Для исследования изменения микротвердости

и модуля упругости рабочих поверхностей корпуса и иглы инжектора топлива применяли наноиндентирование, основанное на локальном силовом воздействии с одновременной регистрацией деформационных откликов [2]. Для исследования зависимости прочностных свойств от расстояния до рабочей поверхности из образцов были изготовлены поперечные шлифы, одновременно обеспечивающие необходимую степень шероховатости для работы в режиме наноиндентирования. Исследования проводились на наноинденторе модели 750 Ubi фирмы Hysitron (США) путем внедрения алмазного наконечника Берковича, в виде трехгранной пирамиды с радиусом закругления острия 100 нм. Высокая точность позиционирования и малый радиус закругления острия индентора позволяют производить оценку механических свойств отдельных фаз многофазных материалов.

Для контроля качества исследуемой поверхности материала и точного выбора места индентирования были получены изображения топографии поверхности методом сканирующей зондовой микроскопии. Точность измерений обеспечивалась путем набора статистических данных в массиве из 20 точек на каждом поле. Индентирование проводилось с постоянной нагрузкой равной 5000 мкН по схеме: 10 с нагружение – 10 с разгружение. В результате внедрения в поверхность материала получали кривые нагружения-разгружения (зависимость силы от глубины внедрения) (рисунок 2), по которым проводился расчет микротвердости и модуля упругости по методу Оливера-Фарра. Метод Оливера-Фарра позволяет корректно определять микротвердость, контактную жесткость, модуль упругости, пластичность и другие характеристики материала с учетом реального закругления в вершине пирамидального индентора, упругого прогиба поверхности в области контакта,

жесткости силового контура прибора, дрейфов и др. [2].

На первом этапе исследования прочностных свойств измерения проводились на расстоянии порядка нескольких сотен микрометров от рабочей поверхности, предполагая, что свойства этих слоев материала не были подвержены изменениям в процессе работы. В случае корпуса, изготовленного из аналога стали ХН2, среднее значение микротвердости в массиве материала составило $H_u = 10,87 \pm 0,48$ ГПа, а модуля упругости $E_r = 199,00 \pm 5,12$ ГПа при средней глубине внедрения $h = 143,77$ нм. Значение микротвердости и модуля упругости иглы, изготовленной из аналога быстрорежущей стали марки Р12М5, составили соответственно $H_u = 14,26 \pm 1,52$ ГПа и $E_r = 233,86 \pm 10,24$ ГПа при средней глубине внедрения $h = 121,02$ нм. На втором этапе исследований выявлялся градиент прочностных свойств от рабочей поверхности деталей вглубь материала. Точки индентирования расставлялись на расстоянии 4 мкм друг от друга, начиная непосредственно от поверхности. Измерения проводились до тех пор, пока значения микротвердости и модуля упругости не достигали значений, зарегистрированных в массиве образца.

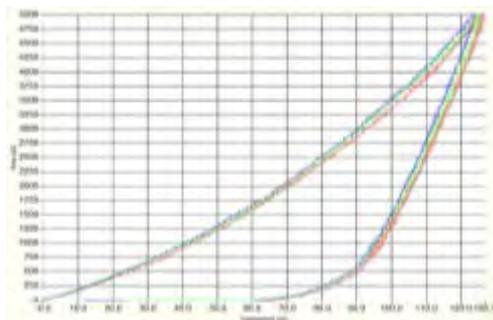
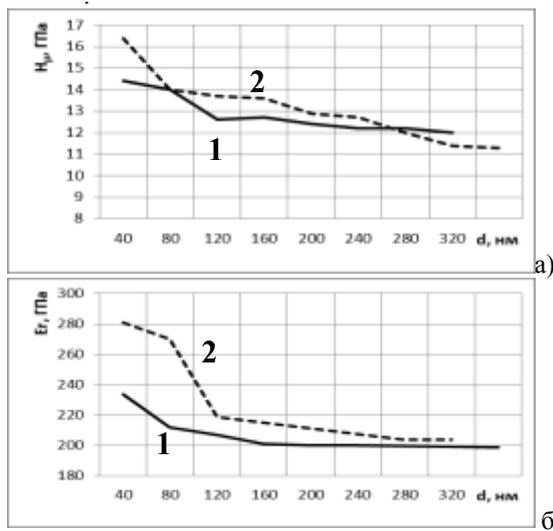


Рисунок 2 – Деформационная кривая нагружения – разгрузки материала корпуса (ХН2)

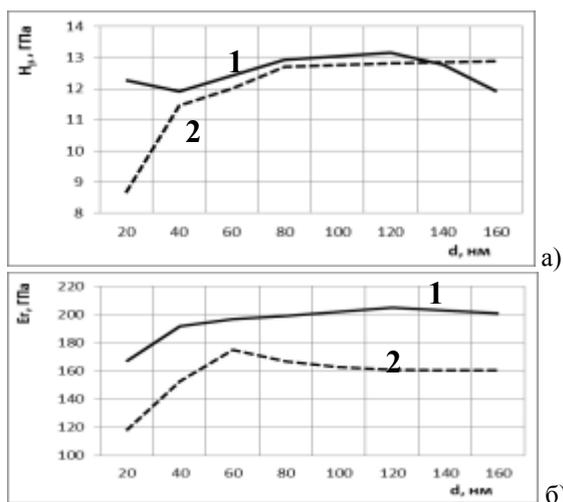
В исходном корпусе рост микротвердости на поверхности составил 15 %, модуля упругости менее 20 %, что связано с упрочнением поверхности в процессе формообразования детали. В исходной игле изменений по микротвердости на поверхности практически не зафиксировано. После эксплуатации у корпуса отмечен рост микротвердости в поверхностном слое более чем на 50 %, а модуля упругости на 40 %. У иглы после эксплуатации наблюдалось снижение микротвердости на 34 % а модуля упругости на 25 % (рисунки 3, 4).

Изменения прочностных свойств в поверхностных слоях не подвергавшихся рабочему воздействию корпуса и иглы были незначительны и, вероятно, объяснялись силовым воздействием в процессе изготовления.



а) изменение микротвердости; б) изменение модуля упругости; 1- исходная деталь; 2 – деталь после эксплуатации

Рисунок 3 – Зависимость механических свойств корпуса инжектора (ХН2) от расстояния до рабочей поверхности



а) изменение микротвердости; б) изменение модуля упругости; 1- исходная деталь; 2 – деталь после эксплуатации

Рисунок 4 – Зависимость механических свойств иглы инжектора (Р12М5) от расстояния до рабочей поверхности

Таким образом, выявлено влияние воздействия гидростатического давления в сочетании с абразивным износом на механические свойства поверхностных слоев деталей инжектора топлива. Экспериментально доказано, что корпус инжектора из стали - аналога марки ХН2 подвержен упрочнению в приповерхностных слоях, в отличие от иглы из стали- аналога Р12М5, склонной к разупрочнению. Разупрочнение Р12М5 связано с α -твердым раствором железа и не захватывает карбидную фазу. Причиной про-

типоволожного поведения поверхностей корпуса и иглы являются напряжения разного знака, возникающие на данных деталях под действием давления в процессе эксплуатации и различный фазовый состав иглы и корпуса.

УДК: 621.375.826

МИКРОПАРАМЕТРЫ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ МЕЖДУ ПРИМЕСНЫМИ ИОНАМИ В КРИСТАЛЛЕ $Tm, Ho: KY(WO_4)_2$

Курильчик С.В.¹, Кулешов Н.В.¹, Зенькевич Э.И.²

¹НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ, Минск, Республика Беларусь

²Кафедра технической физики БНТУ, Минск, Республика Беларусь

Для получения лазерной генерации в спектральной области около 2 мкм на кристаллах, соактивированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} , как правило, используется накачка в полосу поглощения ионов тулия [1], в результате которой происходит заселение долгоживущего энергетического состояния 3F_4 (рисунок 1).

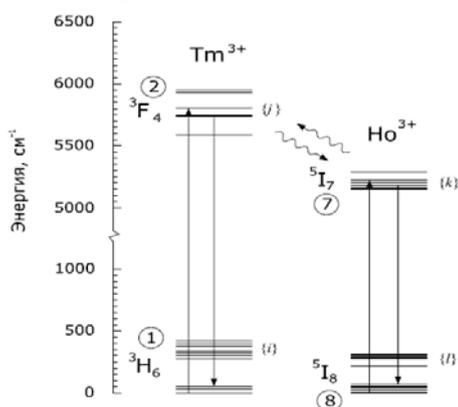


Рисунок 1 – Схема уровней ионов Tm^{3+} и Ho^{3+}

Вследствие близости энергии уровней 3F_4 тулия и 5I_7 гольмия имеет место безызлучательный перенос энергии на ионы гольмия, что открывает перспективы для получения генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов гольмия [1]. Однако на эффективность генерации негативное влияние оказывает обратный перенос энергии с уровня 5I_7 гольмия на уровень 3F_4 тулия. Поэтому для оценки перспективности использования соактивированного материала в качестве активной среды лазеров, излучающих в области 2 мкм, весьма важным является определение параметров переноса энергии между примесными ионами.

Исследование параметров переноса энергии между примесными ионами проводилось для кристалла $Tm, Ho: KY(WO_4)_2$ с концентрацией ионов тулия 5 ат. % и гольмия 0,4 ат. % в рамках теории индуктивно-резонансного переноса энергии Фёрстера-Декстера [2,3] в приближении ди-

1. Шульце, Г. Металлофизика / Г. Шульце. – М.: Мир, 1971. – 603 с.
2. Головин, Ю.И. Наноиндентирование и его возможности / Ю.И. Головин. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.

поль-дипольного межиионного взаимодействия. В соответствии с данной теорией вероятность переноса энергии между отдельными ионом-донором и ионом-акцептором определяется выражением:

$$W_{ДА} = \frac{c_{ДА}}{r_{ДА}^6}, \quad (1)$$

где $c_{ДА}$ - микропараметр переноса энергии для диполь-дипольного межиионного взаимодействия, постоянный для данной среды; $r_{ДА}$ - расстояние между взаимодействующими ионами. Микропараметр переноса энергии $c_{ДА}$ выражается через время жизни возбужденного состояния иона-донора в отсутствие акцептора τ_D и критическое расстояние взаимодействия $R_{ДА}$:

$$c_{ДА} = \frac{R_{ДА}^6}{\tau_D}. \quad (2)$$

Критическим расстоянием взаимодействия называется такое расстояние между донором и акцептором в среде, при котором вероятность прямого резонансного переноса энергии равна вероятности спонтанной излучательной релаксации донора ($1/\tau_D$). Выражения для критического расстояния взаимодействия $R_{ДА}$ и микропараметра переноса энергии $c_{ДА}$ определяются спектроскопическими параметрами активных ионов в данной среде и, учитывая (2), могут быть записаны в следующем виде [3-5]:

$$R_{ДА}^6 = \frac{9c\tau_D\kappa^2}{16\pi^4n^2} \int \sigma_D^{изл}(\lambda)\sigma_A^{погл}(\lambda)d\lambda, \quad (3)$$

$$c_{ДА} = \frac{9c\kappa^2}{16\pi^4n^2} \int \sigma_D^{изл}(\lambda)\sigma_A^{погл}(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

где c - скорость света, n - показатель преломления среды, $\sigma_D^{изл}(\lambda)$ - сечение вынужденного излучения донора, $\sigma_A^{погл}(\lambda)$ - сечение поглощения акцептора, κ^2 - ориентационный фактор, характеризующий взаимную ориентацию дипольных моментов переходов в доноре и акцепторе. В случае, когда взаимная ориентация доноров и акцепторов в среде случайная, но фиксированная и не меняется за время жизни иона в возбужден-