

**Вывод:** Температурный режим ДВС оказывает большое влияние на расход топлива и токсичность отработавших газов. По этому совершенствованию системы охлаждения современных двигателей уделяется большое внимание.

### Литература

1. Якубович, А.И. Системы охлаждения двигателей тракторов и автомобилей / А.И. Якубович, Г. М. Кухаренок, В.Е. Тарасенко. – Минск: БНТУ, 2011. – 254 с.
2. Савич, Е.Л. Легковые автомобили / Е.Л. Савич. – Минск: Новое знание, М.: ИНФРА, 2013. – 758 с.
3. Cummins Engine Company (Rev. 9/82) Printed in U.S.A. Bulletin 3382685, Inc.– Columbus, Indiana 47201.
4. Богданов, Ю.В. Термодинамика инжекторного ДВС / Ю.В. Богданов // Автомобиль и сервис. – 2014. – №4 – С.18 – 21.

УДК 621.793.620.172

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКОЙ СТАЛЬНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

М.И. Черновол<sup>1</sup>, Т.В. Ворона<sup>1</sup>, В.И. Жорник<sup>2</sup>, М.А. Белоцерковский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кировоградский национальный технический университет, Украина

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

**Актуальность исследований.** Качество сельскохозяйственных машин (с-х) в значительной мере определяется ресурсом их работы, который обусловлен износостойкостью деталей, являющейся важной эксплуатационной характеристикой. Износ деталей приводит к нарушению агротехнических требований, и как следствие – к уменьшению урожайности. В результате изнашивания изменяются свойства деталей, силы трения, увеличиваются зазоры, нарушается герметичность, а также возникают изменения в структуре материала. Анализ многочисленных исследований показал, что одним из наиболее эффективных способов борьбы с износом является нанесение износостойких покрытий на рабочие поверхности деталей. В с-х машиностроении изготовление деталей с износостойкими покрытиями ограничено, что является одной из причин их недостаточного ресурса. Наиболее перспективным методом повышения срока службы деталей сельскохозяйственной (почвообрабатывающей, зерноуборочной, кормоуборочной, перерабатывающей и др.) техники является формирование на рабочих поверхностях деталей износостойких покрытий из наиболее доступных и дешевых материалов в сочетании с низкостоимостными технологиями их

нанесения и последующей обработки для повышения эксплуатационных характеристик создаваемых изделий. В большинстве случаев в качестве наиболее доступных и низкостоймых материалов покрытий используются железо-углеродистые сплавы (стали). Кроме того, главной особенностью материала покрытий должна являться способность к определенным фазовым превращениям и структурным изменениям как на стадии нанесения покрытий и упрочняющих обработок, так и на стадии эксплуатации. Такими материалами являются стали мартенситного (40X13) и ферритного (Св-08) классов, что обусловлено особенностями структурно-фазовых превращений в них при термомеханическом воздействии. Поэтому разработка эффективных способов изготовления деталей с износостойкими покрытиями из сталей ферритного и мартенситного классов повышенной износостойкости – одна из актуальных задач материаловедения.

**Состояние проблемы.** Исследования ученых Ю.С. Борисова, В.И. Похмурского, М.М. Студента, Н.Н. Дорожкина, В.С. Ивашко, М.А. Белоцерковского и др. показали, что рациональными и экономически целесообразными способами восстановления и изготовления деталей с износостойкими покрытиями при одновременном повышении их срока службы являются газопламенный и электродуговой методы напыления. По данным «Metallisation UK» электродуговым и газопламенным напылением наносится более 75 % покрытий. Нанесение покрытий из проволоочных материалов электродуговым и газопламенным энергосберегающими методами экономически эффективно в условиях как ремонтных предприятий с крупносерийным производством, так и в небольших мастерских с единичным производством. Однако эти методы напыления имеют ряд недостатков, таких как, повышенное окисление металла, наличие пористости, недостаточная прочность сцепления покрытия с основой. Методы ЭДН/ГПН не обеспечивают высокие значения твердости и износостойкости покрытий из-за выгорания углерода в процессе напыления, что существенно ограничивает область их применения.

**Постановка задачи исследований.** В настоящее время известен ряд методов увеличения износостойкости поверхностных слоев напыленных покрытий, однако их применимость ограничена. В частности, лазерная и электронно-лучевая обработка приводят к неоднородной гетерогенной макроструктуре поверхности и не обеспечивают ее модифицирование. Методы высокоэнергетической ионной имплантации существенно увеличивают себестоимость покрытий. Химико-термическая обработка характеризуется большой продолжительностью процесса и не позволяет проводить обработку крупногабаритных изделий. Поэтому при проведении исследований стояла задача – повысить износостойкость напыленных покрытий, полученных газопламенным и электродуговым методами из сталей ферритного и мартенситного классов.

**Результаты исследований.** Установлено, что повысить износостойкость ГПН/ЭДН покрытий из железо-углеродистых сплавов целесообразно путем механо-термического упрочнения, в частности, таким методом, как электроконтактная обработка (ЭКО). В работе предложен новый подход к получению газотермических стальных покрытий на низколегированных сталях с повышенной износостойкостью, в основе которого лежит управление структурно-фазовыми  $\gamma \rightarrow \alpha$  – превращениями в сталях мартенситного и ферритного классов путем ЭКО, как в сочетании с углеродсодержащими модификаторами, так и без них. Научная гипотеза, положенная авторами в основу предлагаемого подхода, заключается в формировании в покрытиях из этих сталей двухфазной структуры, содержащей метастабильный аустенит, имеющий твердость 200 – 300 HV и определенного количества оксидов. При этом в процессе дальнейшей эксплуатации деталей с этими покрытиями (приработки) вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит будет трансформироваться в износостойкий и твердый мартенсит (HV=700...800) за счет протекания деформационного  $\gamma$ - $\alpha$  превращения. Объектами исследования являлись покрытия из проволочных сталей 40X13 (мартенситного класса) и Св-08 (ферритного класса), диаметр проволоки –  $\varnothing 2,0$  мм. Нанесение покрытий осуществлялось с использованием технологий высокоскоростного напыления по следующим режимам: распыление скоростной воздушной струей металла, расплавленного в факеле пропано-кислородного пламени (ГПН покрытие); распыление струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси (1/25) металла, расплавленного в электрической дуге (ЭДН покрытие). Для обработки и модифицирования рабочей поверхности ГПН/ЭДН покрытий использовали установку для электроконтактной обработки УЭКО. Модификаторами являлись коллоидный графит и ультрадисперсная алмазо-графитная смесь УДАГ. Для восстановления высокой активности частиц УДАГ и их структурообразующей способности использовали ультразвуковую обработку. Таким образом, схема нанесения износостойких комбинированных стальных покрытий включает: 1) напыление покрытий с последующей ЭКО; 2) электрохимическую полировку поверхности для вскрытия пор с последующим насыщением пор углеродсодержащими модификаторами (коллоидный графит) и ЭКО.

**Выводы.** На основании исследований разработаны методические рекомендации по изготовлению деталей с износостойкими покрытиями, полученными напылением с электроконтактной обработкой, в том числе с углеродными модификаторами. Показано, что при помощи ЭКО можно снизить интенсивность изнашивания напыленных стальных покрытий более чем 2 раза. Производственные испытания деталей сельскохозяйствен-

ной техники, в частности шарнирных сопряжений механизмов копирования рельефа поля, лап культиваторов показали повышение срока службы деталей в 2-3 раза.

УДК 539.3

## АНАЛИЗ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛИННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

А.В. Чигарев, А.Р. Покульницкий

Белорусский национальный технический университет, Минск

Тонкостенные трубы, изготовленные из различных типов стали, значительно распространены в промышленности. Они находят свое применение в том числе в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслях. Анализ собственных частот и форм малых колебаний имеет важное значение как для проектирования, так и для проведения экспертизы уже существующих промышленных конструкций. Решение задач динамики тонкостенных оболочек позволяет увеличить срок службы таких труб. В работе получены значения собственных частот колебаний, а также их формы. Для исследования собственных частот использовались методы теории упругости. Численное моделирование проводилось с использованием метода конечных элементов. Проведено сравнение аналитических результатов с численными, полученными с использованием программного комплекса ANSYS.

Дифференциальные уравнения динамики оболочки в перемещениях с учетом внешней нагрузки и компонентов распределённых сил инерции представимы в виде:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2R^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta \partial x} + \frac{\mu}{R} \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1-\mu^2}{E\delta} P_1 - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \\ & \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial \theta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial W}{\partial \theta} - \frac{\delta^2}{12R^2} \left( \frac{1}{R^2} \frac{\partial^3 W}{\partial \theta^3} + \frac{\partial^3 W}{\partial \theta^2 \partial x} - \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} \right) + \frac{1-\mu^2}{E\delta} P_2 - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \\ & \mu \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{R} W + \frac{\delta^2}{12R^2} \left( R^3 \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2R \frac{\partial^4 W}{\partial \theta^2 \partial x^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial^4 W}{\partial \theta^4} - \frac{1}{R} \frac{\partial^3 V}{\partial \theta^3} - R \frac{\partial^3 V}{\partial \theta \partial x^2} \right) - \frac{R(1-\mu^2)}{E\delta} P_3 + \rho \frac{R(1-\mu^2)}{E} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P_1, P_2, P_3$  – компоненты распределённой внешней нагрузки.

Решение системы уравнений (1) будем искать в следующем виде:

$$U = A_{\min} \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \cos(n\theta) \sin(\omega t); \quad (2)$$

$$V = B_{\min} \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \sin(n\theta) \sin(\omega t); \quad (3)$$

$$W = C_{\min} \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \sin(n\theta) \sin(\omega t); \quad (4)$$