

образования, представляющие собой замкнутые ячейки. Размер пор по мере увеличения температуры «водяной рубашки» уменьшается. У образцов № 1 и № 2 поры неправильной формы и вытянуты (средний диаметр пор 411,85 мкм и 376,86 мкм соответственно). Это приводит к изменению направления теплового потока, что может негативно отразиться на теплоизоляционных характеристиках материала. Равномерно распределенная мелкопористая сферическая структура приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности. У образцов № 3 и № 4 форма пор ближе к сферической (средний диаметр пор 268,68 мкм и 252,97 мкм соответственно). При дальнейшем увеличении температуры водяной рубашки размер пор увеличивается. У образцов № 5 и № 6 значение среднего диаметра пор составляет 297,99 мкм и 341,50 мкм соответственно.

К механическим свойствам теплоизоляционных материалов относят прочность (на сжатие, изгиб, растяжение). Прочность теплоизоляционных материалов зависит от структуры, плотности и пористости. Жесткий материал с мелкими порами более прочен, чем материал с крупными неравномерными порами. Результаты определения прочности образцов при сжатии представлены на рисунке 6.

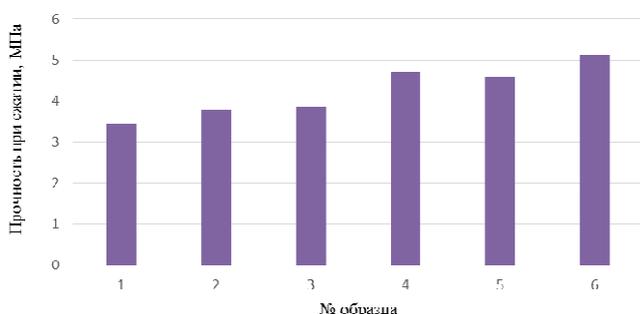


Рисунок 6 – Зависимость параметра прочности образцов при сжатии от характера нагрева составов под действием «водяной рубашки»

Анализируя результаты, полученные в ходе механических испытаний, можно сделать следующий вывод: прочность образцов вспененного пенополиуретана увеличивается при повышении температуры «водяной рубашки» на стадии полимеризации. Результаты механических испытаний коррелируют с испытаниями физических характеристик ППУ и с оптическими исследованиями структуры пор.

На основании проведенных экспериментальных исследований для осуществления теплоизоляции автоцистерн на ОАО «Грод-

ненский механический завод» целесообразно использовать пенополиуретановые составы, подготовленные в соответствии с режимами для образца № 4, для которых отмечено оптимальное сочетание теплофизических и эксплуатационных характеристик:

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,052$ Вт/(м·К);
- плотность $\rho = 49,92$ кг/м³;
- влагопоглощение $W = 1,9$ % по объёму;
- прочность на сжатие $\sigma_{сж} = 4,7$ МПа.

Оптимизирование технологического режима традиционной схемы термоизоляции цистерн предполагает использование подогрева «водяной рубашки» до температуры около 65°C.

Заключение. Основные эксплуатационные характеристики сформированного теплоизоляционного материала (низкий коэффициент теплопроводности, высокая плотность, малая усадка и повышенная прочность) возможны к реализации при корректировке режимов термоизоляции автоцистерн, осуществляемая по предложенному технологическому режиму, предполагающему предварительный нагрев компонентов А и Б на стадии полимеризации пенополиуретана. Разработанная технология обеспечивает комплексное улучшение эксплуатационных характеристик теплоизолированного слоя и способна обеспечить более продолжительный срок службы конструкции в целом.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бобров, Ю. Л. Теплоизоляционные материалы и конструкции: учебник для средних профессионально-технических учебных заведений / Ю. Л. Бобров [и др.]; под общ. ред. Ю. Л. Боброва. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 268 с.
2. Горлов, Ю. П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий: учебник для вузов / Ю. П. Горлов – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.
3. Китайцев, В. А. Технология теплоизоляционных материалов: учебник для студентов вузов / В. А. Китайцев – М.: Высшая школа, 1970. – 379 с.
4. Шашков, А. Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков [и др.]; под ред. А. В. Лыкова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
5. Фокин, В. М. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля / В. М. Фокин, А. В. Ковылин // Вестник. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. – 2009. – № 14(33). – С. 123–127.

Материал поступил в редакцию 13.11.2018

GAVRILOVA V. V., VORONTOV A. S., CHAUSOVA T. A. Optimization of the technological modes of production of izo-termicheskih of capacities

The technological regimes of the process of insulating tank trucks with foamed polyurethane have been studied. Based on the experimental studies carried out, the preheating temperature of the water jacket of the containers with components, which is 65 °C, is recommended. It is established that such a heating mode will allow obtaining a high-quality thermal insulation with an optimal combination of thermal and operational characteristics.

УДК 629.113.004:658.562.4:621.4

Иванов В. П., Вигерина Т. В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Введение. Сведения об остаточном ресурсе автомобильных агрегатов необходимы для планирования сроков и объемов ремонта с определением потребности в запасных частях. Самый простой, хотя и приближенный метод определения остаточного ресурса автомобильного агрегата основан на линейном программировании, когда изменение основного параметра в зависимости от наработки принимается линейным. При этом остаточный ресурс агрегата $t_{ост}$ опре-

деляют по формуле [1]

$$t_{ост} = t_T \left(\frac{\Pi_{пр} - \Pi_{нач}}{\Pi_T - \Pi_{нач}} - 1 \right), \quad (1)$$

где t_T – текущая наработка агрегата с начала эксплуатации или после ремонта; $\Pi_{нач}$ и $\Pi_{пр}$ – начальное и предельное значение ос-

Иванов Владимир Петрович, д. т. н., профессор, профессор кафедры автомобильного транспорта УО «Полоцкий государственный университет».

Вигерина Татьяна Владимировна, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой автомобильного транспорта УО «Полоцкий государственный университет».

Беларусь, ПГУ, 211440, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.

нового параметра, соответственно; Π_T – текущее значение основного параметра в момент определения технического состояния.

С начальным значением основного параметра $\Pi_{нач}$ (в литературе называемого структурным параметром) агрегат вводят в эксплуатацию после изготовления или капитального ремонта. Изменение параметра во время обкатки агрегата ввиду его малости обычно не учитывают. Предельное значение параметра $\Pi_{пр}$ соответствует техническому состоянию агрегата, при котором он или не может выполнять заданную функцию из-за изнашивания или старения, или выполнение этой функции связано с большим расходом ресурсов. В большинстве случаев $\Pi_{нач} < \Pi_T < \Pi_{пр}$.

Часто изменение основного параметра в зависимости от наработки t_T описывают степенным уравнением

$$\Pi_T = \Pi_{нач} + k \cdot t_T \cdot \alpha, \quad (2)$$

где k – коэффициент, полученный на основании опытных данных; α – показатель степени, характеризующий скорость изменения основного параметра.

При линейном изменении параметра $\alpha = 1$ скорость изменения параметра Π_T за время службы агрегата является постоянной. При $\alpha > 1$ значение параметра Π_T непрерывно растет, а кривая его отклонений вогнутая. Фактически значение α для различных агрегатов колеблется в пределах 1,1–1,8 и выше [1]. По данным исследований [2], значения α при прогнозировании остаточного ресурса, например, автотракторных двигателей, с достаточной для практических целей точностью принимают:

- по прорыву газов в картер – 1,3–1,5;
- по угару картерного масла – 2,0;
- по мощности двигателя – 1,1–1,7;
- по зазорам в подшипниках коленчатого вала – 1,4–1,6.

В этом случае при линейном изменении основного параметра Π_T от наработки остаточный ресурс агрегата определяют по формуле

$$t_{ост} = t_T \left[\left(\frac{\Pi_{пр} - \Pi_{нач}}{\Pi_T - \Pi_{нач}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right]. \quad (3)$$

Для повышения точности прогнозирования остаточного ресурса рекомендуют использовать несколько значений основного параметра по результатам его предшествующих измерений. Общее число m его значений в этом случае должно быть равным 3–5 (при $m = 2$ погрешность прогнозирования уменьшается незначительно, при $m > 5$ повышение точности практически не наблюдается).

Полагая, что распределение остаточного ресурса агрегата подчинено распределению Вейбулла, остаточный ресурс с заданной вероятностью безотказной работы следующий [3]

$$t_{ост} = t_T \left[\left(\frac{\Pi_{пр} / \Pi_T + B\sigma_n}{1 + B\sigma_n} \right)^{1/\alpha} - 1 \right], \quad (4)$$

где B – табулированный интеграл вероятностей (квантиль) (при $B = 0$ формула превращается в формулу остаточного ресурса элемента при гладких реализациях его параметра); σ_n – среднее квадратическое отклонение погрешности прогнозирования.

Рассмотренные методы определения остаточного ресурса агрегатов трудоемки и не обеспечивают необходимой точности его прогноза.

Цель работы – повышение точности прогноза остаточной долговечности автомобильных агрегатов с уменьшением трудоемкости ее определения.

Методы исследования. В работе использованы положения теории надежности и математической статистики, а также сведения о послеремонтной наработке отремонтированных двигателей.

Для изучения послеремонтной наработки восьмицилиндровых двухрядных бензиновых двигателей с рабочим объемом 4,25 л в зависимости от точности основного геометрического параметра (зазора между гильзой и поршнем), который в наибольшей степени характеризует техническое состояние агрегата, был проведен трудоемкий промышленный эксперимент, содержание которого следующее. Работы выполнялись без вмешательства в технологические процессы и организацию восстановления деталей и сборки двигателей. Размеры деталей, входящих в соединения измерялись с помощью нутромеров и микрометров на рабочих местах их восстановления, после чего рассчитывалось значение параметра в виде замыкающего размера. Области определения параметра ограничены слева минимальными значениями, установленными нормативной документацией на восстановление деталей, а справа – максимальными значениями, выявленными при их измерении. Большой интерес для исследования представляли случаи, когда значения параметров-аргументов существенно превышали нормативные, например, при выпуске продукции по особым санкциям. Отклонения параметров деталей от нормативных значений были вызваны использованием запасных частей низкого качества, недостаточными возможностями металлорежущего оборудования и применением деталей ремонтного фонда, параметры которых согласно руководству по капитальному ремонту агрегатов уступают параметрам деталей, изготовленных на автомобильных заводах.

Детали поступали на рабочие места сборки и устанавливались на двигатели. На каждый из этих двигателей составляли формуляр, в котором указывали детали со значениями их размеров. Работники лаборатории надежности наладили отношения с хозяйствами, в которых эксплуатировались двигатели, а по каждому двигателю были получены сведения о его наработке до предельного состояния (таблица 1). Были получены сведения по 41 двигателю.

Таблица 1 – Нарботка t (тыс. км пробега) отремонтированных двигателей до предельного состояния в зависимости от начального зазора $\Pi_{нач}$ (мм) между поршнем и цилиндром

№	$\Pi_{нач}$	t	№	$\Pi_{нач}$	t	№	$\Pi_{нач}$	t
1	0,07	91	15	0,09	104	29	0,09	105
2	0,09	95	16	0,11	69	30	0,07	128
3	0,10	121	17	0,11	78	31	0,08	130
4	0,09	112	18	0,09	98	32	0,09	123
5	0,11	70	19	0,06	120	33	0,12	59
6	0,09	103	20	0,10	87	34	0,11	74
7	0,12	55	21	0,08	119	35	0,10	87
8	0,13	40	22	0,09	105	36	0,11	76
9	0,10	89	23	0,07	144	37	0,09	105
10	0,05	153	24	0,08	123	38	0,10	91
11	0,10	88	25	0,10	90	39	0,11	70
12	0,11	74	26	0,12	60	40	0,08	116
13	0,12	56	27	0,11	54	41	0,08	109
14	0,08	114	28	0,11	77	–	–	–

Предложен метод определения остаточного ресурса автомобильных агрегатов (на примере наиболее сложного из них – автомобильного двигателя) с использованием:

- плотности вероятности распределение основного параметра в момент ввода агрегата в эксплуатацию;
- экспериментальных сведений о наработке агрегатов при изменении основного параметра от начального случайного значения до его предельного неслучайного значения;
- плотности вероятности распределения ресурса от наработки этого агрегата при достижении основным параметром предельного значения.

Техническое состояние агрегатов монотонно изменяется под влиянием изнашивания своих трущихся соединений. Однако можно выделить одно трущееся соединение, предельное состояние которого в наибольшей степени определяет предельное состояние всего агрегата [4, 5]. Агрегат в этом случае требует капитального ремонта или списания. Параметр, описывающий изменение указанного трущегося соединения, является основным, он существенно коррелирован с параметрами остальных трущихся соединений, поэтому достаточно полно описывает состояние всего агрегата.

Основной параметр, как правило, невозможно измерить без разборки агрегата, поэтому в текущий момент времени его определяют косвенно по результатам измерения диагностического параметра, функционально связанным с основным параметром. Таким диагностическим параметром в рассмотренном случае может быть расход газов, прорвавшихся в картер, или амплитуда вибрации стенки картера двигателя на определенной частоте.

Следует отметить, что зазоры в соединениях деталей можно определить лишь перед сборкой агрегата, имея данные о соответствующих размерах деталей. Во время эксплуатации агрегата владелец не позволит останавливать его, разбирать и измерять размеры деталей. Это связано с потерей времени и части остаточного ресурса агрегата с сопутствующими финансовыми затратами на заработную плату слесарей, приобретение некоторых деталей (прокладок, стопорных деталей) и материалов. Основной параметр можно определить второй раз непосредственно при разборке агрегата перед списанием или во время его ремонта.

Исходные данные для определения остаточного ресурса агрегата следующие:

- начальное значение основного параметра в момент ввода агрегата в эксплуатацию и распределение плотности его вероятности;
 - зависимость наработки агрегата с учетом условий эксплуатации от начального значения основного параметра на основании мониторинговых сведений;
 - значение основного параметра, определяющее предельное состояние агрегата.
- Расчет выполняют в три стадии (рис. 1):
- определяют распределение основного параметра в момент ввода агрегата в эксплуатацию при $t = 0$ (нижний квадрант II графика);
 - определяют наработку до предельного состояния агрегата, введенного в эксплуатацию с данным значением основного параметра;
 - рассчитывают остаточный ресурс агрегата в виде разницы наработки до предельного состояния и текущей наработки с оценкой ошибки прогноза.

Плотность вероятности распределения основного параметра изготовленного или отремонтированного агрегата согласно сведениям изданий по технологии машиностроения и ремонту машин распределена по кривой Гаусса (на рисунке заштрихованное поле), так как значение этого параметра формируется под влиянием большого числа независимых факторов (технического уровня технологического оборудования, квалификации рабочих, значений режимов обработки и др.). При этом считают, что математическое ожидание значений параметра равно половине допуска δ на размер (основного параметра). Считают также, что в поле допуска укладываются шесть средних квадратических отклонений. Тогда коэффициент вариации параметра равен $\delta / 6 : \delta / 2 \approx 0,33$. Плотность вероятности распределения основного параметра в этом случае равна

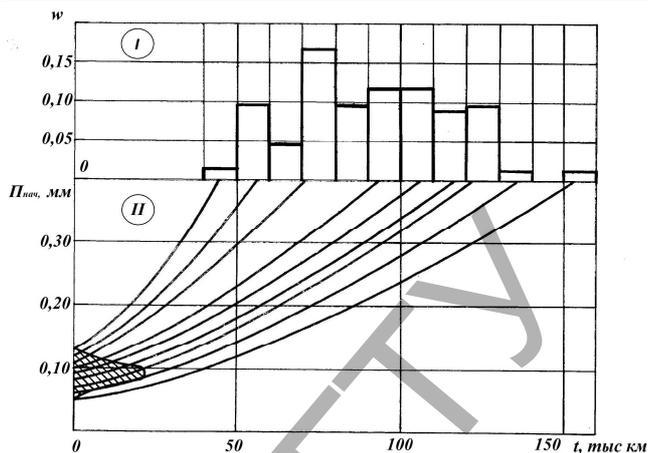


Рисунок 1 – Зависимость наработки t отремонтированных двигателей до предельного состояния от начального зазора $\Pi_{нач}$ между поршнем и цилиндром (нижний квадрант II) и гистограмма частоты отказов w от этой наработки (верхний квадрант I)

$$f(\Pi) = \frac{6}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(0,5\delta - \Pi_{сп})^2}{\delta^2}} \quad (5)$$

В ряде случаев изменение математического ожидания основного параметра в зависимости от наработки носит нелинейный характер, поэтому для повышения точности предсказаний целесообразно пользоваться нелинейными моделями, например степенными.

Прогнозируемое значение наработки агрегата от начального значения основного параметра выражали степенным уравнением

$$t = A\Pi_{нач}^a \quad (6)$$

Логарифмируя левую и правую части уравнения (6), получаем

$$lgt = lgA + alg\Pi_{нач} \quad (7)$$

или

$$t' = A' + a\Pi'_{нач} \quad (8)$$

где $t' = lgt$; $A' = lgA$; $\Pi'_{нач} = lg\Pi_{нач}$.

Для нахождения коэффициентов уравнения (6) методом наименьших квадратов составляем систему уравнений

$$\begin{aligned} A'n + a\sum_{i=1}^n \Pi'_{нач} &= \sum_{i=1}^n t' \\ A'\sum_{i=1}^n \Pi'_{нач} + a\sum_{i=1}^n (\Pi'_{нач})^2 &= \sum_{i=1}^n t'\Pi'_{нач} \end{aligned} \quad (9)$$

где n – число наблюдений.

Адекватность уравнения (6) экспериментальным данным определяют с помощью критерия Фишера F при соответствующем учете числа степеней свободы

$$F = S_p / S_e \quad (10)$$

где S_p – расчетная дисперсия; S_e – дисперсия воспроизводимости.

Ошибка прогноза определяется сопоставлением численных и относительных прогнозируемых и экспериментальных значений наработки агрегата до предельного состояния.

Пример. Значение основного параметра исследуемых двигателей в виде износа цилиндропоршневой группы, определяющего их предельное состояние $\Pi_{пр}$, составляло 0,4 мм. Подставляя данные из таблицы 1 в вышеприведенную систему уравнений (9), получаем

$$A'41 - a42,185 = 80,087$$

$$-A'42,185 + a43,710 = -82,791$$

откуда $A' = 0,616$, $A = 4,130$ (полученное в результате потенцирования A'), $a = -1,300$.

Уравнение (6) в численном виде принимает вид

$$t = 4,130\Pi_{нач}^{-1,30} = \frac{4,130}{\Pi_{нач}^{1,30}} \quad (11)$$

Здесь математическое ожидание случайной величины $M(t) = 94,20$ тыс. км пробега, расчетная дисперсия S_p равна 586,9, а среднее квадратическое отклонение $\sigma = 24,23$ тыс. км пробега. Коэффициент вариации v равен 0,26.

Для расчета дисперсии воспроизводимости S_e для обследованной группы двигателей была рассмотрена их выборка из таблицы 1 с начальным зазором между поршнем и цилиндром, равным 0,10 мм. В выборку были включены двигатели №№ 3, 9, 11, 20, 25, 35 и 38. Дисперсия воспроизводимости составляет 128,4. Получено значение критерия Фишера $F = 586,9 / 128,4 = 4,57$. С учетом числа степеней свободы 40 для большей дисперсии и для меньшей дисперсии – 6 при пяти- и однопроцентных верхних пределах его уклонений табличные значения F_T равны 3,77 и 7,14, соответственно, что подтверждает удовлетворительную сходимость экспериментальных результатов с теоретическими.

Принимали, что плотность вероятности $f(t)$ ресурса агрегатов распределена по закону Вейбулла

$$f(t) = \frac{b}{t_0} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^b}, \text{ тыс. км,} \quad (12)$$

где $t_0 = (\bar{t} - C_e) K_e$ и b – параметры распределения Вейбулла; \bar{t} – математическое ожидание послеремонтной наработки t , C_e и K_e – коэффициенты.

Параметр t_0 имеет размерность наработки, а параметр b – безразмерный.

Параметр b и вспомогательные коэффициенты K_e и C_e определяли методом интерполяции по приложению 5 [6]. При $v = 0,26$ $b = 4,20$, $K_e = 0,92$ и $C_e = 0,23$. Значение t_0 равно $t_0 = (94,20 - 0,23) / 0,92 = 102,1$, тыс. км.

Таким образом, с учетом подстановки найденных значений параметров, зависимость плотности распределения вероятности послеремонтного ресурса следующая

$$f(t) = \frac{4,2}{102,1} \left(\frac{t}{102,1} \right)^{3,2} e^{-\left(\frac{t}{102,1}\right)^{4,2}} = 0,0411(0,0098t)^{3,2} e^{-0,0098t^{4,2}}, \quad (13)$$

Экспериментальное распределение ресурса агрегата при достижении основным параметром предельного значения $\Pi_{пр}$ при его начальном значении $\Pi_{нач}$ представлено в верхнем квадранте I рисунка 1.

Совпадение данных, полученных с помощью уравнения (13), с экспериментальными сведениями выполняли с помощью критерия Пирсона χ^2 , определяемого по уравнению

$$\chi^2 = \sum_1^{n_y} \frac{(m_{oi} - m_{ti})^2}{m_{ti}}, \quad (14)$$

где n_y – число интервалов укрупненного статистического ряда; m_{oi} – опытная частота в i -м интервале статистического ряда; m_{ti} – теоретическая частота в i -м интервале статистического ряда.

Получено значение критерия Пирсона χ^2 , равное 4,1 при числе степеней свободы 9. При вероятности 90 % опытные и теоретические сведения совпадают между собой.

Ошибка прогноза определялась сопоставлением численных (в виде разницы предсказанной теоретической t_t и средней фактиче-

ской $t_{ср.ф}$ наработками) и относительных (в виде отношения $(t_{ср.ф} - t_t) / t_t$) значений наработки агрегата до предельного состояния (рис. 2). Учитывались группы двигателей с одинаковыми начальными значениями основного параметра $\Pi_{нач}$, включающие наибольшее число изучаемых объектов (табл. 2).

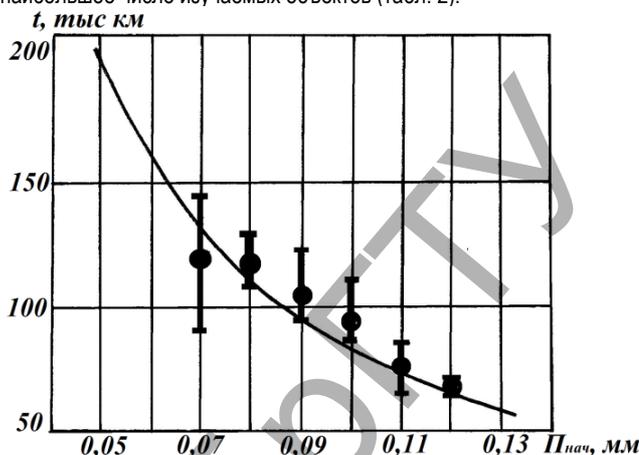


Рисунок 2 – Зависимость прогнозной наработки t отремонтированных двигателей до предельного состояния от начального зазора $\Pi_{нач}$ между поршнем и цилиндром и средние фактические значения наработки

Прогноз остаточного ресурса агрегатов особенно актуален при наработке, приближающейся к предельному состоянию. В этом случае относительная ошибка прогноза изменяется от 0,021 до 0,130, что вполне приемлемо для практических приложений.

Заключение. Таким образом, предложенный метод определения остаточного ресурса агрегатов позволяет при наличии мониторинговых сведений определить наработку до предельного состояния и остаточную долговечность отдельного агрегата как разность между его прогнозной наработкой и наработкой в рассматриваемый момент времени с ошибкой прогноза от 2 до 13 %.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гурвич, И. Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей / И. Б. Гурвич, П. Э. Сыркин. – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
2. Ждановский, Н. С. Надежность и долговечность автотракторных двигателей / Н. С. Ждановский, А. В. Николаенко. – Л.: Колос, 1981. – 292 с.
3. Михлин, В. М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники / В. М. Михлин. – М.: Колос, 1984. – 335 с.
4. Иванов, В. П. Влияние качества ремонта двигателей на их долговечность / В. П. Иванов, А. П. Кастрюк // Вестник государственного технического университета им. П. О. Сухого, 2012. – № 3. – С. 30–34.
5. Иванов, В. П. Комплексное диагностирование цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания // В. П. Иванов, А. Н. Васюкович, Г. А. Уваров // Вестник ПГУ: Промышленность. Прикладные науки – 2015. – № 11. – С. 87–92.
6. Надежность и ремонт машин / В. В. Курчаткин [и др.]; под ред. В. В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776 с.

Материал поступил в редакцию 06.09.2018

Таблица 2 – Расчет ошибки прогноза наработки двигателей до предельного состояния

$\Pi_{нач}, \text{ мм}$	$t_t, \text{ тыс. км}$	$t_{ср.ф}, \text{ тыс. км}$	$t_{ср.ф} - t_t, \text{ тыс. км}$	$(t_{ср.ф} - t_t) / t_t$
0,07	131,0	121,0	-10,0	-0,083
0,08	110,1	118,5	8,4	0,071
0,09	94,5	105,6	11,1	0,105
0,10	82,4	93,2	10,8	0,116
0,11	72,8	71,3	-1,5	-0,021
0,12	65,0	57,5	-7,5	-0,130

A method for determining the residual life of auto-mobile units (on the example of automobile engines) is proposed and approved, which is characterized by less laboriousness and satisfactory forecast accuracy.

УДК 621.791.7: 621.785: 621.793

Поболь И. Л.

МЕТОДЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. ОПЫТ ОСВОЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Введение. Методы высокоэнергетической обработки материалов во многих случаях обеспечивают радикальное повышение характеристик поверхностных слоев изделий из всех металлических материалов, используемых в промышленности, а также изготовление соединений, которые невозможно получить с применением традиционных технологий. Несмотря на то, что такие методы изучаются уже достаточно продолжительное время и показали свою экономическую эффективность, степень их использования предприятиями страны оставляет желать лучшего.

Одновременно благодаря созданию научных и технологических основ применения таких перспективных высокоэнергетических методов появляются и бурно развиваются технологии, которые признаны краеугольными для формирования «Индустрии 4.0». К их числу правомерно отнести аддитивные технологии, прежде всего использующие послойное выращивание изделий из металлов.

1. Электронно-лучевые (ЭЛ) методы обработки материалов. Наиболее широкое применение в мире мощные источники ЭЛ нагрева нашли при выплавке особо чистых материалов с изготовлением слитков массой до нескольких десятков тонн, получении соединений с глубиной шва до 200–300 мм в ответственных изделиях, нанесении покрытий испарением материалов и их осаждением на изделия.

Методы ЭЛ обработки обладают целым рядом технологических преимуществ перед другими вариантами плавки, сварки и поверхностного воздействия: высокая точность и воспроизводимость подачи энергии; отсутствие окисления и обезуглероживания материала изделия; высокая надежность электромагнитной системы перемещения луча, возможность автоматизации управления процессом; высокий КПД нагрева (более 75%); возможность использования одного оборудования для проведения различных технологических процессов – сварки, поверхностной закалки, плавления, послойного выращивания заготовок и др.

Основными параметрами обработки, которые определяют характер реализуемого ЭЛ процесса, являются ускоряющее напряжение, ток луча, удельная мощность, длительность нагрева или скорость перемещения луча [1]. Управление технологическими процессами реализуется благодаря формированию требуемого температурного поля в заготовке путем варьирования параметрами потока электронов. Применяется ЭЛ оборудование с использованием пушек как с косвенным накалом катода, так и с плазменными источниками электронов [2].

Сварка. В ФТИ НАН Беларуси разработаны технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) изделий из материалов в широких диапазонах температур плавления (от алюминия до ниобия) и толщин материалов (от 2–3 до 200 мм). Совместно с ОАО «МТЗ», ОАО «Амкор», ОАО «БелАЗ» и другими предприятиями разрабатываются конструкции сварных соединений узлов, изготавливаются экспериментальные и промышленные партии изделий типа шестерен, валов, блок-шестерен.

Проведены исследования влияния параметров ЭЛ воздействия на геометрию шва и морфологию поверхности соединений тонколистовой (2 мм) меди М1. Получены соединения с шириной шва от 2 до 6 мм и выпуклостью шва с обратной стороны (провисанием) в пределах 180–300 мкм. Образование неровностей на поверхности сварных швов связано главным образом с кристаллизационными слоями (рисунок 1 а). Увеличение тока фокусировки позволяет уменьшить высоту неровностей, вносимых процессом кристаллизации металла, до 10–15 мкм. При использовании предварительного подогрева заготовки лучом высота неровностей не превышает 2 мкм (рисунок 1 б).

Полученные при обработке режимов ЭЛС сплава меди послужили основой для изготовления по заказу ОИЯИ партии резонаторов из особо чистого ниобия (рисунок 1 в) для нужд строящихся ускорителей частиц класса мега-сайенс [3]. Одной из задач при ЭЛС была минимизация величины провисания шва в связи с необходимостью получения гладкой внутренней поверхности в резонаторе.



Рисунок 1 – Образцы и изделие, полученные ЭЛС: обратная поверхность сварных соединений меди М1, изготовленных с использованием различных режимов, $\times 10$ (а, б) и эллиптический СВЧ резонатор из особо чистого ниобия (в)

Поболь И.Л., д. т. н., доцент, нач. отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы Физико-технического института НАН Беларуси, e-mail: pobol@phti.by.
Беларусь, г. Минск, ул. Академика Купревича, 10/2.