

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
И В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Межвузовский сборник научных трудов
Выпуск 13

Рецензируемое издание

Тверь 2020

УДК 621.891
ББК 22.37:34.41:31.264-04(082)

Рецензенты: зав. кафедрой общей физики ТвГУ, доктор хим. наук, профессор Орлов Ю.Д.; доцент кафедры общей физики ТвГУ кандидат физ.-мат. наук Новоселов А.Р.

Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. Вып. 13. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2020. 112 с.

Первая часть сборника включает статьи теоретического и прикладного характера, посвященные физическим, химическим, механическим процессам контактного взаимодействия твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Во вторую часть включены материалы Всероссийской научно-технической конференции «Инновационное развитие машиностроения России», состоявшейся 20 января 2020 г. в Тверском государственном техническом университете.

Предназначен для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов, студентов.

Подготовлен на кафедре прикладной физики Тверского государственного технического университета.

Электронная версия сборника размещена в сети Интернет:
<http://physics.tstu.tver.ru/sbornik>

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук профессор А.Н. Болотов;
доктор техн. наук профессор Г.Б. Бурдо;
академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор И.Г. Горячева;
доктор техн. наук профессор В.В. Измайлов (отв. редактор);
доктор техн. наук профессор В.В. Мешков;
канд. техн. наук доцент В.В. Новиков;
канд. техн. наук доцент М.В. Новоселова (отв. секретарь).

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный выпуск сборника состоит из двух частей. Первая часть традиционно отражает результаты научных исследований сотрудников Тверского государственного технического университета и других образовательных и научных организаций в области механики и физики контактного взаимодействия деталей машин, трибологии, триботехники, триботехнического материаловедения, других смежных дисциплин. Представлены статьи теоретического и прикладного плана, тематика которых отражает сложную и многостороннюю природу процессов контактного взаимодействия, трения и изнашивания.

Во вторую часть включены научные доклады, представленные на Всероссийскую научно-техническую конференцию «Инновационное развитие машиностроения России», которая состоялась в Тверском государственном техническом университете 20 января 2020 г. В конференции приняли участие ученые и специалисты ведущих научных и учебных заведений России и Тверской области в частности, а также студенты и аспиранты, обучающиеся в ТвГТУ. Помимо вопросов, посвященных изучению процессов трения и изнашивания в современных технических устройствах, рассмотрены инновационные подходы к проблеме автоматизация машиностроения и применению новых материалов в машиностроении. Рассмотрены достижения современного транспортного, горного и строительного машиностроения, проблемы организации, безопасности и экологии в машиностроении.

Материалы сборника отражаются в информационных базах научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU и входят в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Публикуемые материалы предназначены для научных работников и специалистов в области проектирования и эксплуатации современного машиностроительного, энергетического, транспортного оборудования, а также для докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов машиностроительных, энергетических и приборостроительных специальностей.

УДК 620.179.118.2

В.В. Измайлов, Л.Е. Афанасьева, М.В. Новоселова
Тверской государственный технический университет**ТОПОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ
ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Рассмотрены некоторые статистические параметры шероховатости технических поверхностей после лазерной резки в сравнении с аналогичными параметрами поверхностей после традиционных механических методов обработки. Показано, что в целом корреляционные связи топографических параметров, характерные для поверхностей после механической обработки, сохраняются и для топографии поверхностей после лазерной резки.

Ключевые слова: поверхность, топография, шероховатость, высотные параметры, шаговые параметры, корреляционные связи.

STEEL SURFACE TOPOGRAPHY AFTER LASER EXPOSURE

Some statistical parameters of roughness of technical surfaces after laser cutting are considered in comparison with similar parameters of surfaces after traditional mechanical processing. It is shown that, in general, the typical topographic parameters correlations being valid for surfaces after machining continue to be valid for surface topography after laser cutting.

Key words: surface, topography, roughness, height parameters, spacing parameters, correlations.

Топография технических поверхностей играет важную роль в процессах на поверхности и в контакте деталей машин и механизмов. К ним относятся трение, изнашивание, тепло- и электропроводность, адсорбция, отражение электромагнитных волн, утечка через уплотнения и др.

Топография технических поверхностей исследовалась во многих работах [1–5 и др.]. При этом основное внимание уделялось поверхностям после механической обработки. В современном машиностроении широко применяются технологии обработки поверхности концентрированными потоками энергии, например, лазерные. Топография поверхностей, полученных такими методами, менее исследована, чем топография поверхностей после традиционной механической обработки.

Цель данной работы – сравнение некоторых статистических характеристик шероховатости технических поверхностей после лазерной обработки с аналогичными характеристиками шероховатости после традиционной механической обработки.

Образцы для исследования. Исследовались характеристики шероховатости поверхности быстрорежущей стали Р9М4К8, наплавленной на конструкционную сталь 30ХГСА, после газолазерной резки.

Наплавку проводили порошковой проволокой в защитной среде аргона на обратной полярности дугой прямого действия на следующих режимах: сила тока $I = 180...190$ А; напряжение $U_D = 21...22$ В; скорость наплавки $v_H = 12$ м/ч. Затем на ОАО «ТВЗ» с помощью лазерного комплекса Bysprint 2 фирмы Bystronic полученный образец разрезали на полосы шириной 12 мм на следующих режимах: скорость резки $v = 800$ мм/мин; мощность излучения $P = 4\ 400$ Вт; давление газа $F = 14$ атм. Лазерный луч входил в слой наплавленной быстрорежущей стали, а выходил из слоя конструкционной стали.

Структура рельефа по глубине реза однородна несмотря на то, что образец состоит из двух слоев сталей разного химического состава.

Количественную оценку параметров шероховатости поверхности реза выполняли по поперечным профилограммам. Некоторые параметры шероховатости поверхности реза (в соответствии с ГОСТ 2789-73 с изменением от 01.10.2017 г. и ГОСТ 25142-82 с изменением от 30.01.2017 г.) представлены в табл. 1.

Следует отметить, что параметр R_{10z} отсутствует в вышеупомянутых стандартах. Ранее он обозначался R_z и назывался «высота неровностей профиля по десяти точкам». По этому параметру в справочной и научной литературе накоплен большой статистический материал, который используется, в том числе, и в данной статье. К сожалению, в современных редакциях стандартов символом R_z обозначен совсем другой по смыслу и названию параметр. Чтобы избежать путаницы в трактовке смысла этого параметра, мы используем для него обозначение R_{10z} .

Длина оценивания параметров шероховатости поверхности образца в зоне реза составляла в среднем 5 мм.

Параметры шероховатости и их корреляционные связи. С практической точки зрения абсолютные значения параметров шероховатости, приведенные в табл. 1, безусловно, важны. Но с научной точки зрения больший интерес представляют корреляционные связи представленных параметров. Именно они несут важную информацию о характере шероховатости и влиянии ее на качество поверхности.

Выполним анализ некоторых корреляционных соотношений параметров шероховатости поверхности после лазерной обработки подобно тому, как это сделано в работах [6, 7] для шероховатости механически обработанных поверхностей.

Таблица 1. Диапазоны значений параметров шероховатости исследованных поверхностей

Параметры	Значение
Полная высота профиля R_{max} , мкм	27...36
Высота наибольшего выступа профиля R_p , мкм	11...19
Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм	3,4...4,6
Высота неровностей профиля по десяти точкам R_{10z} , мкм	19...28
Средний шаг неровностей профиля S_m , мкм	226...486
Шаг местных выступов профиля S , мкм	116...267

Соотношение шаговых параметров профиля $\psi = S/S_m$. Данный параметр характеризует ширину спектра профиля [6]. Значения ψ , близкие к 1, соответствуют узкополосному процессу (значение $\psi = 1$ соответствует синусоидальному профилю), значения ψ , существенно меньшие единицы, соответствуют широкополосному процессу (случайной шероховатости). Сравнение значений параметра ψ для поверхностей после лазерной и механической обработки представлено в табл. 2.

Высотные параметры профиля и их соотношения. Соотношения R_{\max}/R_a , R_p/R_a и R_{10z}/R_a . Параметры R_{\max} и R_p по своей природе статистически гораздо менее надежны, более изменчивы, чем параметр R_a . Это очевидно, поскольку параметры R_{\max} и R_p представляют собой экстремальные оценки, тогда как параметр R_a получается в результате статистического усреднения.

В связи с этим представляет практический интерес установление корреляционных связей, например, между статистически надежным параметром R_a и менее надежными параметрами R_{\max} , R_{10z} или R_p .

Для шероховатости механически обработанных поверхностей на очень большом статистическом материале для очень широкого спектра технологических способов обработки поверхностей, начиная от доводки и кончая обработкой напильником или абразивной бумагой, экспериментально получены следующие корреляционные соотношения $R_{\max} = (5...7)R_a$ и $R_{10z} = (4,0...5,5)R_a$ [8, 9]. Для симметричного профиля, соответственно, $R_p = (2,5...3,5)R_a$.

Для модели профиля поверхности в виде нормального стационарного случайного процесса связь между параметрами R_p и R_a выражается формулой [2]

$$E\{R_p\} \approx E\{R_a\} \sqrt{\pi \ln \frac{E\{n_0\}}{2}}, \quad (1)$$

где n_0 – среднее число пересечений профилем своей средней линии; символ E означает математическое ожидание соответствующего параметра на длине оценки. Для исследованных нами поверхностей расчет по формуле (1) приводит к результату $E\{R_p\} \approx 3E\{R_a\}$, экспериментально полученное значение $E\{R_p\}/E\{R_a\} \approx 3,7$.

Полученные экспериментально для поверхностей после лазерной обработки соотношения высотных параметров приведены в табл. 2. Они в целом неплохо соответствуют приведенным в той же таблице статистическим данным, относящимся к механически обработанным поверхностям, превышая их тем не менее на 12...16 % (за исключением отношения R_{\max}/R_{10z}). Это превышение можно объяснить наличием на поверхности

Таблица 2. Соотношения параметров шероховатости технических поверхностей на различных масштабных уровнях

Параметры и их соотношения	Обработка поверхности	
	Лазерная	Механическая [6, 8, 9]
$\psi = S/S_m$	0,59±0,09	0,4...0,7
R_{\max}/R_p	2,11±0,20	1,5...2,5
R_{\max}/R_a	7,92±0,55	5...7
R_p/R_a	3,80±0,49	2,8...3,4
R_{10z}/R_a	5,68±0,40	4,0...5,5
R_{\max}/R_{10z}	1,40±0,10	1,3...1,4

единичных высоких выступов и глубоких впадин, увеличивающих значения экстремальных параметров (R_{\max} , R_p и R_{10z}) и мало влияющих на значения усредненных параметров (R_a). Поэтому соотношения двух экстремальных параметров R_{\max}/R_{10z} практически одинаковы для поверхностей после лазерной обработки и механически обработанных. То же самое можно сказать про отношение R_{\max}/R_p : для всех видов обработки средняя величина этого отношения близка к очевидному значению $R_{\max}/R_p = 2$, хотя возможны и довольно значительные отклонения (см. табл. 2).

Соотношение величины параметра R_{\max} и длины оценивания. Как уже отмечалось, параметр R_{\max} обладает невысокой статистической надежностью, поскольку определяется одним единственным значением на длине оценивания. Очевидно, с ростом длины оценивания должна увеличиваться и величина R_{\max} . Это увеличение описывается следующей формулой [10]

$$R_{\max}^{(mL)} = R_{\max}^{(L)} \sqrt{1 + \frac{\ln m}{\ln\left(\frac{L}{1,25R_a}\right)}}, \quad (2)$$

где $R_{\max}^{(L)}$ – значение параметра, определенное на длине оценивания L ; $R_{\max}^{(mL)}$ – то же на длине оценивания в m раз больше. Аппаратные возможности и размеры поверхности не всегда позволяют существенно увеличивать длину оценивания. Если профиль поверхности обладает свойством эргодичности (что не всегда выполняется), то увеличение длины оценивания в m раз эквивалентно увеличению во столько же раз числа коротких длин оценивания (базовых длин), на которых производится оценка того или иного параметра.

Для исследованных поверхностей после лазерной обработки при $m = 8$ отношение $R_{\max}^{(mL)}/R_{\max}^{(L)}$ равно $1,17 \pm 0,12$. Расчет по формуле (2) дает соответственно величину указанного отношения 1,14, что в пределах погрешности совпадает с экспериментальным значением.

Рассмотренные выше дискретные характеристики топографии технических поверхностей удобны, прежде всего, для применения в нормативных документах, конструкторско-технологической документации и т. п. Но их информативность иногда оказывается недостаточной. Например, специалистам по качеству поверхности хорошо известно, что две поверхности с одинаковыми величинами дискретных параметров шероховатости, например, R_a , могут обладать существенно различными эксплуатационными свойствами. Более информативными характеристиками топографии поверхностей являются параметры-функции [4]. К ним относятся, например, интегральные и дифференциальные функции распределения случайных величин, характеризующих топографию поверхности. Под случайными величинами понимаются, например, ординаты профиля поверхности, высоты выступов шероховатости, радиусы кривизны их вершин, углы наклона боковых сторон выступов и т. п. Рассмотрим некоторые из таких параметров-функций.

Опорные кривые. Опорная кривая, или кривая Аббота-Файрстоуна, описывает распределение материала в шероховатом слое. Примеры таких кривых для поверхностей после лазерной обработки приведены на рис. 1. В соответствии с ГОСТ 25142-82, опорные кривые построены в координатах $t_p = f(p)$, где t_p – относительная опорная длина профиля; p – уровень сечения профиля (ГОСТ 25142-82) и расположены так, что область ниже кривой соответствует объему материала детали.

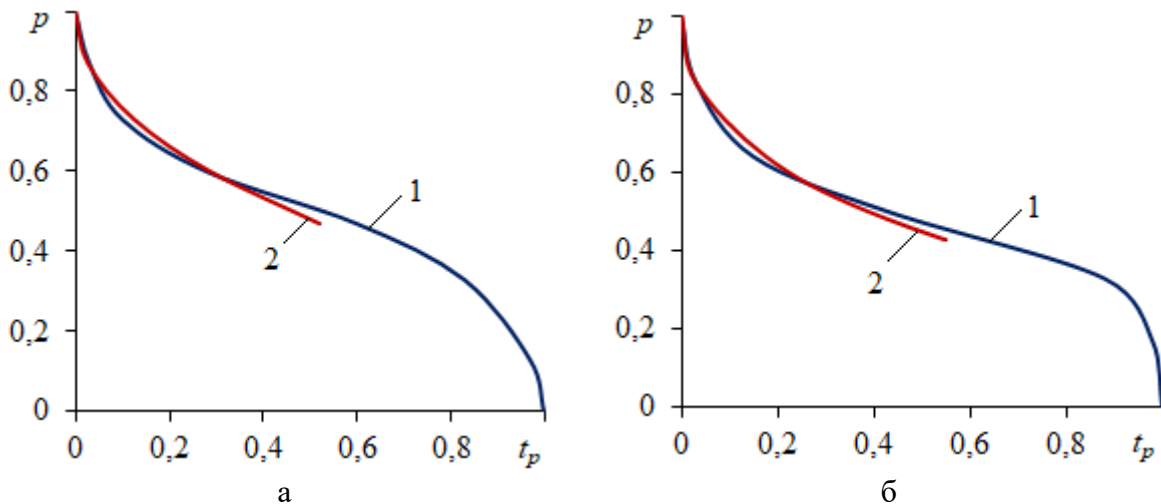


Рис. 1. Примеры относительных опорных кривых поверхностей лазерного реза. Линии 1 – экспериментальные кривые; линии 2 – степенные аппроксимации по формуле (3) с параметрами: а – $v = 2,1$, $t_m = 0,43$; б – $v = 2,4$, $t_m = 0,44$

Как известно, для механически обработанных поверхностей начальные участки опорных кривых (до средней линии) хорошо описываются степенной функцией

$$t_p = t_m \left(\frac{y}{R_p} \right)^v, \quad (3)$$

где y – вертикальная координата, отсчитанная от линии выступов; t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; v – показатель степени. Применимость степенной аппроксимации начального участка опорной кривой к поверхности после лазерной обработки подтверждается рис. 1, где приведены параметры степенной аппроксимации. Усредненные значения этих параметров для всех исследованных поверхностей следующие: $v = 2,3 \pm 0,3$; $t_m = 0,44 \pm 0,05$, что хорошо согласуется с величинами, характерными для механически обработанных поверхностей.

Распределение выступов шероховатости по высоте. Другим важным параметром-функцией, характеризующим качество поверхности, является плотность вероятности высот выступов шероховатости. Важное значение этого параметра для механики контактного взаимодействия объясняется тем, что классические модели дискретного контакта шероховатых поверхностей основаны на использовании двух функций – функции формы выступов шероховатости и функции плотности вероятности высот высту-

пов [11]. При этом последняя для механически обработанных поверхностей хорошо описывается универсальным бета-распределением

$$f(x) = \frac{1}{B(\xi, \omega)} x^{\xi-1} (1-x)^{\omega-1}, \quad (4)$$

где случайная величина x в данном случае – относительная высота выступа, равная отношению абсолютной высоты к величине R_p ; ξ и ω – параметры формы бета-распределения.

Возможность применения бета-распределения к описанию плотности вероятности высот выступов поверхности после лазерной обработки иллюстрируется рис. 2. Параметры бета распределения, рассчитанные по величине матожидания и дисперсии случайной величины, следующие: $\xi = 0,82$; $\omega = 1,22$. Проверка соответствия теоретического и экспериментального распределений по критерию χ^2 показала, что на уровне значимости $\alpha = 0,03$ гипотеза о бета-распределении высот выступов шероховатости не противоречит экспериментальным данным, поэтому нет оснований для ее отклонения.

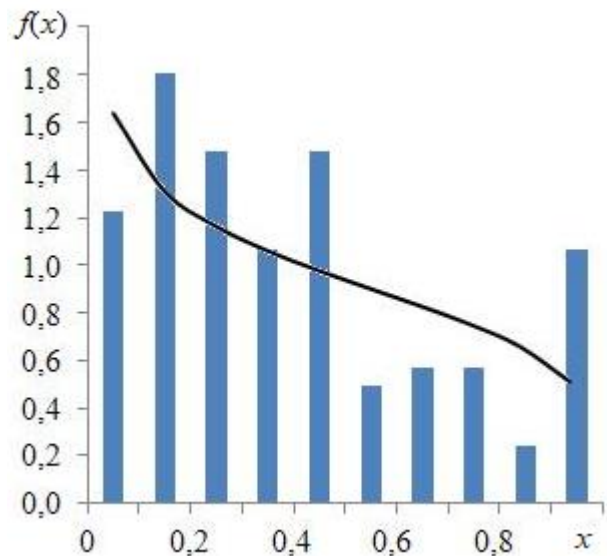


Рис. 2. Плотность вероятности высот выступов шероховатости поверхности лазерного реза: гистограмма – экспериментальные значения; линия – теоретическая функция бета-распределения

Заключение. Проведенный анализ параметров топографии стальных поверхностей после лазерной резки показал, что теоретические и эмпирические корреляционные зависимости, характерные для топографии поверхностей после механической обработки, выполняются и применительно к исследованным поверхностям. Это объясняется статистической природой шероховатости поверхности, не зависящей от способа ее обработки.

Библиографический список

1. Дунин-Барковский, И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
2. Рудзит, Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей / Я.А. Рудзит. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.
3. Григорьев, А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А.Я. Григорьев. Минск: Беларуская навука, 2016. 247 с.
4. Уайтхауз, Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы / Д. Уайтхауз. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 472 с.
5. Thomas, T.R. Rough surfaces / T.R. Thomas. London: Imperial College Press, 1999. 278 p.

6. Экслер, Л.И. Экспериментальные соотношения для высотных и шаговых параметров шероховатости / Л.И. Экслер // Метрологические и технологические исследования качества поверхности. Рига: Зинатне, 1976. С. 37–42.

7. Измайлов, В.В. О параметрах нанотопографии технической поверхности и ее профиля / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2018. Вып. 10. С. 313–321.

8. Дьяченко, П.Е. О разработке проекта международного стандарта на шероховатость поверхности / П.Е. Дьяченко, В.Э. Вайнштейн, Т.М. Карпова // Качество поверхности. М.: Изд. АН СССР, 1959. № 4. С. 3–12.

9. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.

10. Харац, Г.М. Об определении характеристик микрогеометрии поверхности со случайной шероховатостью при расчетах трения и износа / Г.М. Харац, Л.И. Экслер // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. М.: Наука. 1971. С. 169–175.

11. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.

УДК 621.892

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков
Тверской государственный технический университет

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 3. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ НАНОДИСПЕРСНЫХ МАСЕЛ

Показаны некоторые технологические особенности получения магнитных смазочных масел на основе диэфиров и силоксановых жидкостей. Особое внимание уделено технологии получения диэфирных магнитных масел методом синтеза в эмульсии. Показаны преимущества технологии получения магнитных силоксановых масел, в которых стабилизатором выступает присадка 3Н2ТЭ, изначально предназначенная для снижения трения и износа.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитное масло, дисперсная фаза, стабилизатор, дисперсионная среда, трение, износ.

ENGINEERING PRINCIPLES OF MAGNETIC LUBRICANT SYNTHESIS. PART 3. PRODUCTION FEATURES OF MAGNETIC NANODISPERSED OILS

Some technological features of production of magnetic lubricants based on diesters and siloxane fluids are shown. Particular attention is paid to the production technology of diester magnetic oils by the synthesis method in emulsion. The advantages of the production technology of magnetic siloxane oils are shown, which uses the additive 3H2TE as the stabilizer, though originally this additive was designed to friction and wear reduce.

Key words: magnetic fluid, magnetic oil, dispersed phase, stabilizer, dispersion medium, friction, wear.

Магнитные жидкости, относящиеся к классу гибридных наноматериалов, созданы более тридцати лет назад, но научный и практический интерес к ним остается очень высоким. Большое внимание уделяется проблемам применения магнитных жидкостей для смазывания триботехнических узлов [1–3].

Принципиальной отличительной особенностью магнитных масел, обуславливающей их уникальные триботехнические свойства, является высокая намагниченность насыщения. Но область применения рассматриваемых материалов ограничивается экономическими причинами – достаточно высокой стоимостью масла, магнитной системы и т. д. В связи с этим наиболее востребованы магнитные смазочные масла в космической и авиационной технике, робототехнике и химическом машиностроении, для смазки трибоузлов, работающих при граничном или смешанном трении, смазываемых дискретно через значительные промежутки времени, причем ограниченным объемом масла [4–10].

Представление о магнитных смазочных материалах (маслах) как о традиционных трехкомпонентных магнитных жидкостях, адаптированных к условиям граничного трения (например, с помощью присадок), является совершенно неверным. Именно потому, что в магнитожидкостных трибоузлах пытались использовать стандартные магнитные жидкости, а не специально созданные магнитные смазочные масла, эти узлы не показали убедительных преимуществ и научный интерес к ним стал угасать. Стало понятно, что магнитные смазочные масла изначально должны синтезироваться с учетом специфических требований, предъявляемых к их структуре и свойствам с опорой на обширный технологический опыт получения магнитных жидкостей [5, 6].

В первой части настоящего обзора [11] рассматривался трибологический анализ перспективных жидкостей для дисперсионной среды магнитных масел. Во второй части [12] сформулированы основные требования к ПАВ-стабилизатору коллоидных частиц магнитных масел. Показан новый подход к выбору ПАВ-стабилизаторов коллоидной структуры масел с учетом их диэлектрических свойств и особенностей влияния на трение. Предложены ПАВ-стабилизаторы различной химической структуры для масел на основе диэфиров и некоторых кремнийорганических жидкостей.

Остановимся на описании некоторых основных технологических процессов получения магнитных смазочных масел на основе различных по физико-химическим свойствам дисперсионных сред.

Технология синтеза масел на основе диэфиров. Стандартная технология синтеза магнитного коллоида [11], включает следующие этапы: получение магнетита химической конденсацией (метод Элмора); отмывка магнетита от солей аммиака; пептизация; разбавление дисперсионной средой; удаление следов воды.

Однако этот технологический процесс имеет ряд существенных недостатков. Осажденный магнетит должен тщательно отмываться от солей, а для промывки высокодисперсного осадка требуется сложное аппаратное оформление процесса. Длительный контакт частиц, не защищенных адсорбционными оболочками, ведет к образованию конгломератов (конденсации частиц) и ухудшению коллоидной стабильности магнитной жидкости.

Поэтому для получения магнитных масел на основе диэфиров использован метод синтеза в эмульсии. Суть метода заключается в следующем. В эмульсию, образованную диэфиром карбоновой кислоты, ПАВ-стабилизатором (жирной кислотой РК) и водой при перемешивании и температуре 70...90 °С вводятся последовательно аммиак (водн.) и раствор солей железа (II и III валентных). На поверхности образующихся частиц магнетита адсорбируется ПАВ-стабилизатор и переводит его в органическую фазу. Затем полученный коллоид декантируют и промывают несколькими порциями дистиллированной воды. Захваченная вода удаляется выпариванием при перемешивании. Для удаления крупных агрегатов из магнитных частиц коллоид загружают в центрифугу и выдерживают в поле центробежных сил при 5600g в течение двух часов.

После отработки технологических параметров процесса синтеза получены магнитные масла со свойствами, приведенными в таблице. Исследования проводились на оборудовании, описанном в [13–15]. Указанная устойчивость магнитных масел характеризуется численным значением, равным относительному увеличению намагниченности масла после нахождения в неоднородном магнитном поле из-за коагуляционной и седиментационной неустойчивости коллоида (измерения проводятся в области максимальной напряженности поля).

Некоторые характеристики синтезированных магнитных масел
(η – вязкость; H – напряженность магнитного поля; J – намагниченность)

Марка ММ	Основа ММ	η , Па·с (20 °С, $H = 2 \cdot 10^5$ А/м)	J , кА/м	Испаряемость (100 °С, 10^{-7} кг/см ² ч)	Устойчивость ($\nabla H = 5 \cdot 10^7$ А/м ²)
ММ1-ДОС	Деоктил-себацинат	0,08	30	0,9	1,73
ММ2-ДОС	Деоктил-себацинат	0,2...0,5	23	0,65	1,45
ММ1-ДОФ	Диоктил-фталат	0,2	34	0,8	1,5
ММ1-ДБС	Дибутил-себацинат	0,07	31	1,7	1,72
ММ1-ПЭС	ПЭС-5	2...4	23	0,6	1,65

На заключительном этапе в магнитную жидкость для получения магнитного масла вводят присадки при температуре 40...50 °С и тщательном перемешивании. Необходимым условием сохранения структуры масла

является не только хорошая совместимость присадки с дисперсной средой, но и достаточно высокое сродство ПАВ-присадки с углеводородной частью ПАВ-стабилизатора.

Для всех синтезированных магнитных масел агрегативная устойчивость нарушается, когда градиент магнитного поля составляет $\nabla H \geq 1,5 \cdot 10^8$ А/м². Если неоднородность поля в узле трения меньше указанного, образование агломератов из магнитных частиц затруднено, и абразивная составляющая изнашивания поверхностей трения не выступает определяющей.

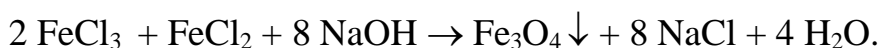
Из научной литературы известно [10], что наиболее устойчивыми являются магнитные коллоиды, стабилизированные полимерами. Однако их недостаток заключается в низкой равновесной концентрации дисперсных частиц из-за стерических затруднений при адсорбции молекул полимеров. Для повышения устойчивости магнитных масел в магнитных полях предложено в качестве стабилизатора используется олигоэфир.

Преимущество разработанного способа состоит в том, что синтез стабилизатора ведется непосредственно на магнитных частицах, что практически исключает стерические затруднения при образовании защитных оболочек. Кроме того, использование такого технологического фактора, как концентрация мономера, позволяет регулировать вязкость магнитного масла в широких пределах в зависимости от его назначения. На первой стадии синтеза магнитного масла применяется вышеописанная технология. В качестве первичного стабилизатора используются гидроксикислоты, например, 12-оксистеариновая кислота или 12-гидрокси-9-цис-октадеценовая. На второй стадии процесса в реакционную смесь вводят дополнительное количество мономера (гидроксикислоты) и проводят окончательную стабилизацию путем синтеза олигоэфира. Вода, выделяемая в ходе реакции поликонденсации гидроксикислоты, конденсируется в холодильнике. Ход процесса синтеза оболочек контролируется по объему выделившейся воды. Процесс синтеза оболочек продолжается в течение нескольких десятков часов. Для уменьшения содержания стабилизатора, растворенного в основе масла (при необходимости), применяется технология замены дисперсионной среды методом обратимой флокуляции дисперсной фазы.

Характерные свойства диоктилсебацинатового магнитного масла ММ2-ДОС, стабилизированного олигоэфиром ОЭ-3 на основе 12-гидрокси-9-цис-октадеценовой кислоты, приведены в таблице. Это масло, по сравнению с маслом ММ1-ДОС, более устойчиво в магнитных полях, менее летучее, но имеет повышенную вязкость.

Некоторые особенности получения магнитных масел на основе кремнийорганических жидкостей. Магнитное масло на основе ПЭС-5 получали по методу замены основы, который включает несколько этапов.

Вначале получают высокодисперсный магнетит по реакции химической конденсации, предложенной Элмором [8]:



После промывки магнетита от солей и аммиака до $pH = 7$ проводят его пептизацию раствором жирной кислоты в углеводородном растворителе и удаляют воду. Далее суспензию вводят в смешанный растворитель, состоящий из ПЭС-5 и маловязкого летучего углеводорода. При этом объемное соотношение углеводорода к объему кремнийорганической жидкости должно быть 1:2, при уменьшении количества углеводорода происходит снижение концентрации магнетита в конечном продукте. Полученную суспензию перемешивают при температуре 50°C в течение 2...3 часов, после завершения пептизации удаляют остатки воды и низкокипящие компоненты в вакууме.

Далее в магнитную жидкость при температуре $40...50^\circ\text{C}$ и перемешивании вводят присадки. Экспериментальные исследования зависимости смазочных свойств от содержания присадки показали, что присадки достаточно эффективны лишь при высокой концентрации – 15...20 масс.%. Одновременно, существенно изменяется состав дисперсионной среды, что может сказаться на коллоидной устойчивости магнитных масел и, соответственно, на других функциональных свойствах. Для магнитных масел на основе кремнийорганических жидкостей, аналогично маслам на основе диэфиров, должно соблюдаться условие агрегативной устойчивости.

Для устранения недостатков монофункциональных ПАВ, применяемых при синтезе магнитных масел, была исследована возможность стабилизации магнитных наноразмерных частиц посредством присадки ЗН2ТЭ, предназначенной исходно для снижения трения и износа. Для облегчения адсорбции ПАВ ЗН2ТЭ магнетит отмывался от воды ацетоном. Пептизация велась в силоксане при температуре 100°C в течение 90 часов. Наблюдалось заметное диспергирующее воздействие ПАВ ЗН2ТЭ на коллоидный магнетит. После окончания пептизации и удаления следов воды было получено магнитное масло со следующими свойствами: намагниченность насыщения – 15...30 кА/м; вязкость – 0,3...0,6 Па·с в зависимости от выбранного соотношения компонентов. Здесь и далее имеется в виду пластическая вязкость магнитного масла, определенная без наложения на масло магнитного поля. Именно от пластической вязкости в значительной мере зависит режим трения и теплонагруженность современных трибосистем.

Получение магнитного масла, стабилизированного синтезированным ПАВ-силоксаном (МХС) [12], производилось следующим образом. Магнетит, отмывтый от воды ацетоном, обрабатывали раствором ПАВ с кислотным числом около 60 в олигохлорсилоксане (15...20 %). Содержание ПАВ составляло 35 масс.% от веса магнетита. Пептизация велась при 80°C в вакууме. Отмечено высокое диспергирующее действие синтезированного

ПАВ. После сепарации магнитного коллоида в центрифуге получается магнитное масло с намагниченностью насыщения ≈ 25 кА/м и вязкостью около 0,45 Па·с. Изменяя соотношения компонентов, можно получить масло с намагниченностью до 40 кА/м, но при этом одновременно вязкость возрастает от 0,4 до 0,6 Па·с. Магнитное масло устойчиво к тепловому воздействию до температуры 180...200 °С.

Достоинством предложенной схемы получения магнитного масла является высокое средство ПАВ и дисперсионной среды, что особенно важно для получения устойчивого коллоида с пологой вязкостно-температурной зависимостью.

Таким образом, показаны некоторые технологические особенности получения магнитных смазочных масел на основе диэфиров и силоксановых жидкостей. Следует выделить технологию получения диэфирных магнитных масел методом синтеза в эмульсии. Представляет интерес технология получения магнитных силоксановых масел, в которых стабилизатором выступает присадка ЗН2ТЭ, предназначенная исходно для снижения трения и износа. Магнитные масла на основе диэфиров имеют относительно низкую вязкость и могут применяться гидродинамических узлах трения при температуре до ≈ 180 °С. Магнитные масла на основе силоксанов отличаются хорошими смазочными свойствами при низких температурах и предназначены для работы в условиях высоких контактных давлений.

Библиографический список

1. Орлов, Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К.Мышкин. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
2. Болотов, А.Н. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография / А.Н. Болотов, В.Л. Хренов. Тверь: ТГТУ, 2008. 124 с.
3. Болотов, А.Н. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. Тверь: ТвГТУ, 2013. 123 с.
4. Болотов, А.Н. Исследование упругопластического контакта сферического индентора с металлами и твердосмазочными покрытиями. Часть 1: Критические нагрузки / А.Н. Болотов, В.В. Мешков, О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 1. С. 5–10.
5. Курапов, П.А. Трение и работоспособность сопряжений в условиях использования микрогетерогенных смазочных композиций: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / Курапов П.А. М.: 2011. 39 с.
6. Болотов, А.Н. Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 2. С. 107–113.
7. Болотов, А.Н. Магнитные масла триботехнического назначения / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Тверь: ТГУ, 2009. № 1. С. 5–9.
8. Фертман, В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие / В.Е. Фертман. Минск: Вышэйш. шк., 1988. 184 с.
9. Сутягин, О.В. Контакт шероховатых тел с твердосмазочными покрытиями: монография / О.В. Сутягин, А. Н. Болотов, М. В. Васильев. Тверь: ТвГТУ, 2014. 124 с.

10. Байбуртский, Ф. С. Магнитные жидкости: способы получения и области применения. URL: [http://magneticliquid.narod.ru/ authority/008.htm](http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm)

11. Болотов, А.Н. Технологические основы синтеза магнитных смазочных материалов. Часть 1. Трибологический анализ перспективных жидкостей для дисперсионной среды магнитных масел / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, А.В. Новиков // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2018. Вып. 11. С. 128–133.

12. Болотов, А.Н. Технологические основы синтеза магнитных смазочных материалов. Часть 2. Дисперсная фаза и ПАВ-стабилизатор магнитных масел / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, А.В. Новиков, Г.Б. Бурдо // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2019. Вып. 12. С. 59–67.

13. Болотов, А.Н. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 1 / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.В. Мардян // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2013. Вып. 6. С. 68–74.

14. Болотов, А.Н. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 2 / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, Д.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2014. Вып. 7. С. 85–89.

15. Болотов, А.Н. Влияние присадок на триботехнические характеристики наноструктурных смазочных магнитных масел / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 9. С. 43–47.

УДК 531.43

В.В. Измайлов, Т.В. Иванова, В.А. Рябов
Тверской государственной технической университет

ВЛИЯНИЕ МИКРОТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

С помощью численной модели дискретного контакта технических поверхностей рассмотрено влияние параметров их микро топографии на эксплуатационные характеристики контакта. Проанализировано влияние на характеристики контакта безразмерного параметра формы выступов шероховатости и плотности вероятности высот и радиусов кривизны вершин выступов. Результаты исследования могут быть полезными при выборе технологии обработки поверхности контактирующих деталей в зависимости от назначения контактного соединения.

Ключевые слова: поверхность, микро топография, контакт, численная модель.

INFLUENCE OF SURFACE MICRO TOPOGRAPHY ON CHARACTERISTICS OF THE MACHINE PARTS CONTACT

The numerical model of the discrete contact of engineering surfaces was used for the consideration of the influence of the surface microtopography parameters on the operational characteristics of the contact. The influence of the dimensionless shape parameter of rough-

ness asperities and the probability density of the heights and radii of curvature of the asperities vertices on the contact characteristics was analyzed. The results of the study can be useful when choosing a surface treatment technology for contacting parts with relation to the function of the contact joint.

Key words: surface, microtopography, contact, numerical model.

В настоящее время признано, что качество изделий машиностроения определяется в основном не показателями прочности деталей, а трибологическими характеристиками узлов и деталей машин [1–3]. В свою очередь, трибологические показатели определяются качеством поверхностного слоя деталей машин [1, 2], который работает в наиболее тяжелых условиях. Основными показателями качества поверхностного слоя являются его физико-механические характеристики и характеристики рельефа поверхностей контактирующих деталей, в том числе шероховатость [1, 2].

Цель данной работы – на основании численного моделирования контактного взаимодействия технических поверхностей проанализировать влияние параметров шероховатости на основные эксплуатационные характеристики контактных соединений деталей машин. Такой анализ позволяет предварительно выбрать ряд наиболее оптимальных способов и технологических режимов обработки поверхности деталей контактных соединений. Окончательный выбор должен осуществляться на основании натуральных испытаний.

Теоретические предпосылки. Известные теоретические модели контактного взаимодействия технических поверхностей [4, 5] основаны на предпосылках:

выступы шероховатости моделируются сферическими сегментами;
высота выступов является случайной величиной, подчиняющейся некоторому статистическому распределению;

радиус кривизны вершины выступа одинаков для всех выступов или также является случайной величиной, подчиняющейся некоторому статистическому распределению;

нагрузка, воспринимаемая единичным контактом выступов шероховатости, зависит от вида деформации выступа (упругая или пластическая) и от величины этой деформации.

В использованной в данной работе числовой модели контакта шероховатых поверхностей данные предпосылки реализованы следующим образом. Высота и радиус кривизны вершины выступа считаются случайными величинами, подчиняющимися бета-распределению с параметрами формы α и β . Плотность вероятности в этом случае описывается формулой

$$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1},$$

где $B(\alpha, \beta)$ – бета-функция Эйлера, а под случайной величиной x подразумевается высота выступа или радиус кривизны его вершины.

Кроме этого, исходными данными для расчета характеристик контакта являются максимальные значения высоты выступов R_p и радиуса вершин r_{\max} , относительная опорная длина профиля на уровне средней линии t_m , а также механические свойства материалов контактирующих деталей – микротвердость H_μ , модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ .

Результаты моделирования и их обсуждение. В соответствии с поставленной целью, рассмотрим влияние параметров микрошероховатости на основные эксплуатационные характеристики контакта – контактную деформацию (сближение контактирующих поверхностей) и фактическую площадь контакта.

Влияние параметров формы выступов на характеристики контакта. Форму выступов будем характеризовать безразмерным параметром $\psi = \sqrt{R_p/r_{\max}}$. Параметр формы выступов входит в критерии, предложенные различными авторами для определения преобладающего механизма деформации контакта – упругой или пластической. Одна из форм записи такого критерия выглядит следующим образом [5]

$$\Psi = \frac{E^*}{H_\mu} \sqrt{\frac{R_a}{r_{\text{cp}}}},$$

где E^* – приведенный (эквивалентный) модуль упругости материалов контактирующих тел; H_μ – микротвердость менее твердого материала; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатой поверхности; r_{cp} – среднее значение радиуса кривизны вершин выступов шероховатости. Поскольку между величинами R_a и R_p также, как между величинами r_{\max} и r_{cp} объективно существует статистическая линейная зависимость, использование параметра ψ для характеристики формы выступов шероховатости вполне правомерно.

Параметры исследованных модельных поверхностей приведены в табл. 1.

При указанных в табл. 1 параметрах α и β распределение случайных величин близко к равномерному (прямоугольному), при котором значения случайной величины в заданном диапазоне равновероятны. Механические свойства материалов, приведенные в табл. 1, соответствуют типичным значениям для распространенных марок латуней.

Результаты моделирования представлены на рис.1а и 1б в виде зависимостей от номинального давления p_n основных характеристик контакта: относительной деформации $\varepsilon = \delta/R_p$ и относительной площади фактического контакта $\eta_r = A_r/A_n$, где δ – деформация контакта (сближение контактирующих поверхностей); A_r и A_n – фактическая и номинальная площади контакта соответственно. Очевидно, что параметр ψ существенно влияет

Таблица 1. Параметры модельных поверхностей

№	R_p , мкм	r_{\max} , мкм	ψ	E , ГПа	H_μ , МПа	t_m	α	β
1	4,3	50	0,3	110	1 500	0,45	1,2	1,2
2	4,3	800	0,07					
3	0,27	50	0,07					

на характеристики контакта. Это влияние объясняется прежде всего тем, что при заданных механических характеристиках материалов контактирующих поверхностей от величины параметра ψ зависит характер деформации выступов шероховатости: при малых значениях ψ контакт преимущественно упругий, при больших – преимущественно пластический. Подтверждением этому служит рис. 1в, на котором представлена зависимость от номинального давления относительной доли пластически деформированных выступов $\xi = n_{пл}/n_r$, где $n_{пл}$ – число пластически деформированных выступов; n_r – общее число контактирующих выступов.

Таким образом, если требуется большая жесткость контакта, целесообразно выбирать технологию обработки поверхности, обеспечивающую сравнительно большие значения параметра ψ (рис. 1а). Наоборот, если требуется большая площадь фактического контакта, следует стремиться к малым значениям параметра формы выступов ψ (рис. 1б).

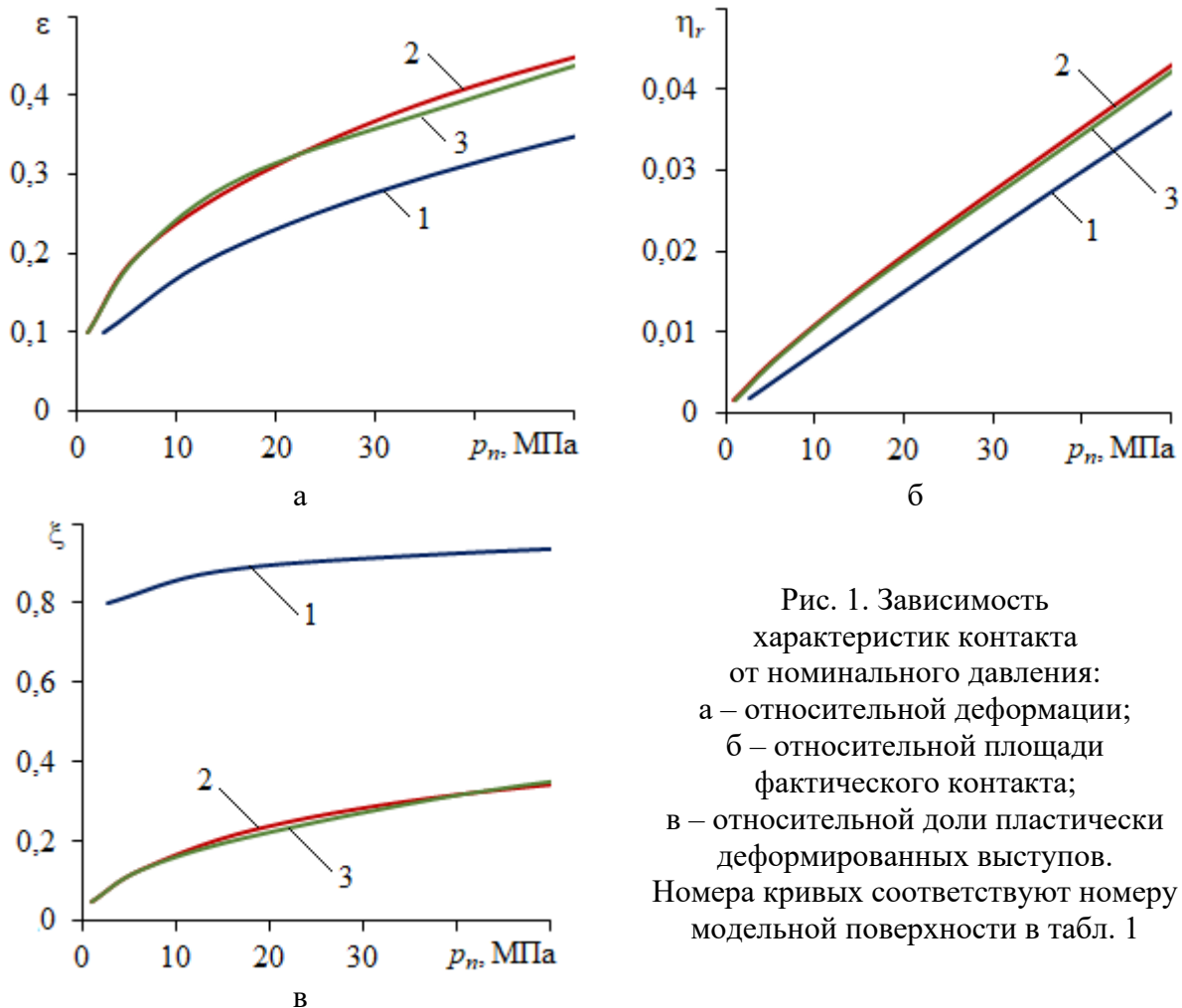


Рис. 1. Зависимость характеристик контакта от номинального давления: а – относительной деформации; б – относительной площади фактического контакта; в – относительной доли пластически деформированных выступов. Номера кривых соответствуют номеру модельной поверхности в табл. 1

Влияние распределения высот и радиусов кривизны вершин выступов шероховатости на характеристики контакта. Параметры исследованных модельных поверхностей приведены в табл. 2.

Механические свойства поверхностей 1 и 2 соответствуют алюминиевому сплаву, поверхностей 3 и 4 – термообработанной стали. В контакте поверхностей 1 и 2 контактирующие выступы деформируются преимущественно пластически, в контакте поверхностей 3 и 4 – преимущественно упруго.

Таблица 2. Параметры модельных поверхностей

№	R_p , мкм	r_{max} , мкм	ψ	E , ГПа	H_μ , МПа	t_m	α	β
1	3,4	80	0,2	70	750	0,55	1,2	3
2							3	1,2
3				200	6 000		1,2	3
4							3	1,2

Плотность вероятности случайных величин – высот выступов и радиусов кривизны их вершин – иллюстрируется рис. 2а. В первом случае шероховатость поверхности характеризуется наличием небольшого числа отдельных высоких выступов с преобладанием выступов небольшой высоты, во втором – наоборот, преобладанием выступов, вершины которых расположены в верхних участках шероховатого слоя. Соответствующие опорные кривые имеют вид, представленный на рис. 2б. Очевидно, что в первом случае контакт поверхностей будет обладать малой жесткостью, во втором – гораздо большей.

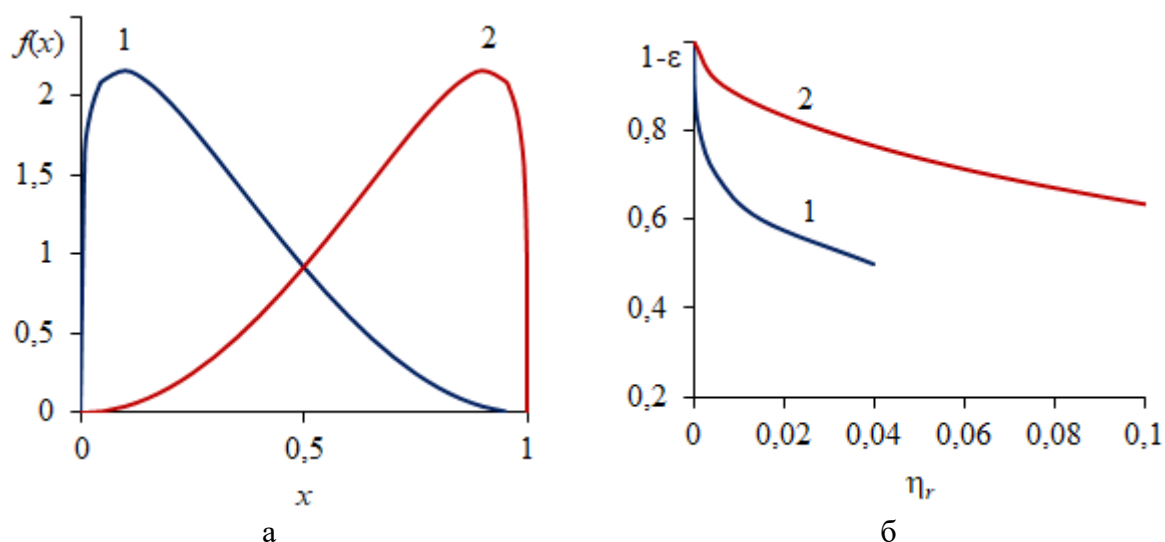


Рис. 2. Статистические функции, характеризующие топографию модельных поверхностей:
а – кривые распределения высот и радиусов кривизны вершин выступов;
б – опорные кривые. Линии 1 – $\alpha = 1,2$; $\beta = 3$; линии 2 – $\alpha = 3$; $\beta = 1,2$

Действительно, рис. 3а подтверждает это предположение в случае преимущественно упругого характера контакта шероховатых поверхностей. При одинаковом номинальном давлении деформация шероховатого слоя с параметрами бета-распределения $\alpha = 3$ и $\beta = 1,2$ (кривая 2) в несколько раз меньше, чем при обратном соотношении параметров α и β (кривая 1).

Для площади фактического контакта соотношение обратное (рис. 3б): при одинаковых величинах номинального контактного давления

площадь фактического контакта больше у поверхностей с преобладанием выступов в верхних участках шероховатого слоя (кривая 2, соответствующая значениям $\alpha = 3$ и $\beta = 1,2$).

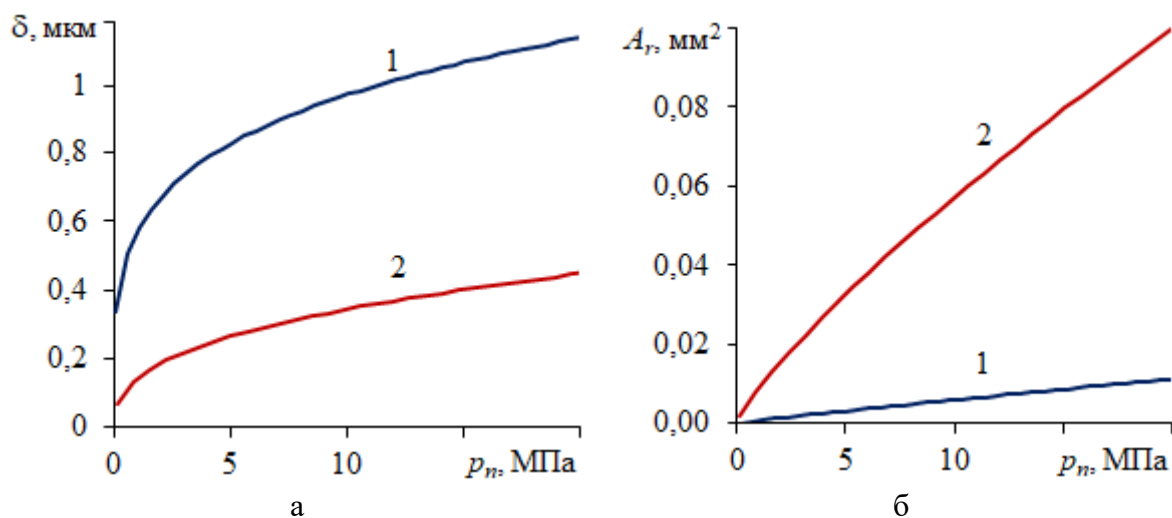


Рис. 3. Зависимости характеристик контакта от номинального давления для модельных поверхностей 3 и 4: а – деформации контакта; б – фактической площади контакта. Линии 1 – $\alpha = 1,2$; $\beta = 3$, линии 2 – $\alpha = 3$; $\beta = 1,2$

Аналогичные выводы можно сделать и для контакта деталей из алюминиевого сплава (рис. 4), в котором деформация выступов шероховатости носит преимущественно упругопластический характер. Деформация контакта шероховатых поверхностей с преобладанием выступов, вершины которых расположены в верхних участках шероховатого слоя (кривая 2) в несколько раз меньше, чем в случае преобладания в шероховатом слое выступов небольшой высоты (кривая 1).

Таким образом, для обеспечения большой жесткости контакта шероховатых поверхностей (малой контактной деформации) и большой площади фактического контакта (большой плотности стыка) следует выбирать технологию обработки, обеспечивающую большое число выступов в верхних участках шероховатого слоя. Для этого можно рекомендовать, например, известный в трибологии прием – предварительное обжатие стыка нагрузкой, немного превосходящей максимальное значение эксплуатационной нагрузки. При этом отдельные случайные высокие

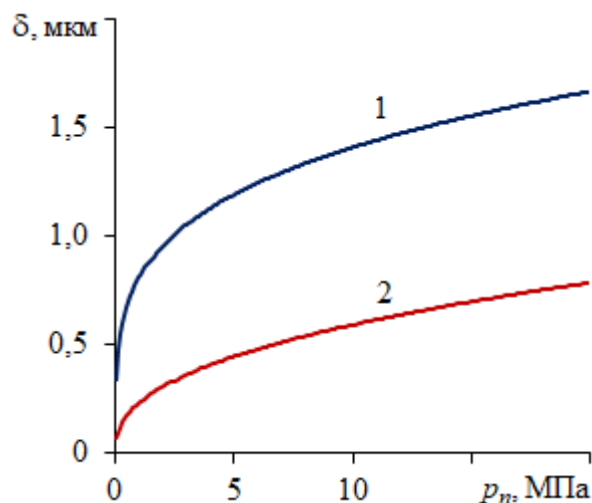


Рис. 4. Зависимость деформации контакта от номинального давления для модельных поверхностей 1 и 2: линия 1 – $\alpha = 1,2$; $\beta = 3$; линия 2 – $\alpha = 3$; $\beta = 1,2$

выступы сминаются, и опорная кривая приобретает вид, близкий к кривой 2 на рис. 2б. Аналогичный вид опорной кривой обработанной поверхности характерен для технологий, основанных на поверхностном пластическом деформировании деталей, таких, например, как виброобкатывание или алмазное выглаживание. Опорные кривые, аналогичные кривой 1 на рис. 2б, характерны для обработки поверхности лезвийным инструментом (точение, строгание и т. п.).

Заключение. Современные технологии предоставляют широкий выбор способов и режимов обработки контактирующих поверхностей деталей машин. Выбирая оптимальную технологию и режимы обработки, можно обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики контакта деталей машин в соответствии с назначением технического устройства.

Библиографический список

1. Клепиков, В.В. Качество изделий: учебное пособие / В.В. Клепиков, В.В. Порошин, В.А. Голов. М.: МГИУ, 2008. 288 с.
2. Горленко, О.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин / О.А. Горленко, В.П. Тихомиров, Г.А. Бишутин. М.: Издательство Юрайт, 2017. 264 с.
3. Горленко, А.О. Триботехнология / А.О. Горленко, О.А. Горленко, А.С. Проскурин. М.: Издательство Юрайт, 2017. 187 с.
4. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.
5. Болотов, А.Н. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография / А.Н. Болотов, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.

УДК 62-192: 622.331.002.5

И.В. Горлов¹, А.Н. Болотов¹, М.Г. Рахутин²

¹Тверской государственной технической университет,

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОРФЯНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Представлены исследования потока отказов торфяных технологических машин. Установлены зависимости параметров безотказности от наработки и количества элементов торфяных машин, в наибольшей степени влияющих на надежность. Анализ результатов исследования позволил получить зависимости потока отказов от наработки, что дает возможность осуществлять прогнозирование технического состояния рассмотренных машин.

Ключевые слова: прогнозирование, надежность, безотказность, ремонт, исследование, техническое состояние.

FORECASTING OF THE OPERATING STATE OF PEAT MACHINES ON THE BASIS OF FAULTLESSNESS PARAMETERS RESEARCH

A study of the failure flow of peat processing machines is presented. Dependencies of reliability parameters on operating time and the number of elements of peat machines to the greatest extent affecting reliability are established. Analysis of the results of the study enabled to obtain the dependences of the failure flow on the operating time, which makes it possible to predict the operating state of the machines under consideration.

Key words: forecasting, reliability, faultlessness, repair, research, operating state.

В системе мер, направленных на повышение эффективности торфяного производства, наряду с совершенствованием техники особое внимание уделяется наиболее полному использованию производственного времени за счет ликвидации непроизводительных потерь из-за простоев машин в ремонте и обслуживании. Успешное осуществление мероприятий по повышению надежности торфяных машин (ТМ) возможно на основе повышения уровня технической эксплуатации и качества ремонта ТМ.

Мероприятия по поддержанию и восстановлению эксплуатационных свойств торфяных машин регламентируются руководствами по эксплуатации на основе планово-предупредительной системы технического обслуживания и ремонта. Однако эта система в современных условиях и тем более в дальнейшем нуждается в совершенствовании, так как имеет ряд недостатков.

Регламентация межремонтных и доремонтных периодов по системе технического обслуживания и ремонта машин во времени не отражает вероятностных процессов изнашивания элементов машин, а, следовательно, и потребности в восстановлении их работоспособности. Как правило, техническое обслуживание выполняется без учета технического состояния ТМ и осуществляется или преждевременно, или с запозданием, что приводит к большим неоправданным потерям труда и затратам денежных средств [1].

Существенным резервом, позволяющим повысить сезонную производительность ТМ, является предотвращение отказов, которые чаще всего происходят из-за контакта рабочих органов ТМ с древесными включениями, находящимися в торфяной залежи, что в большом количестве случаев связано с повреждениями трибоэлементов (элементов торфяных машин, обладающих триботехническими свойствами). Прогнозирование таких отказов позволяет адаптировать систему ремонта и восстановления торфяных машин, что обеспечит максимальную сезонную производительность.

Выявление основных закономерностей изменения технического состояния было проведено на основе исследования надежности торфяных машин в ОАО «Васильевский мох». Статистические данные получены для бункерных уборочных машин МТФ-43А и МТФ-43А-К, фрезерных барабанов Ф-6,5 и ворошилок ВС-9,6. Машин эксплуатировались на производственных участках, расположенных на верховом типе залежи со средней степенью разложения торфа 25 %, объемной пнистостью 1–2 %, второго года эксплуатации. Условная влажность собираемого торфа 40 %, глубина фрезерования залежи 0,011 м, эксплуатационная влажность 80 %.

После проведения исследований все отказы были классифицированы по сложности и рассчитаны показатели безотказности торфяных машин (табл. 1).

Таблица 1. Показатели безотказности торфяных машин по данным ОАО «Васильевский мох»

Наработка, моточасов	Число машин	Отказы 1-й группы сложности		Отказы 2-й группы сложности		Отказы 3-й группы сложности	
		Среднее число отказов	Поток отказов, 1/моточ.	Среднее число отказов	Поток отказов, 1/моточ.	Среднее число отказов	Поток отказов, 1/моточ.
Бункерные уборочные машины МТФ-43А, МТФ-43А-К							
0...80	8	—	—	—	—	—	—
80...120	8	1,25	0,031	—	—	—	—
120...160	8	—	—	—	—	—	—
160...200	8	1,25	0,031	1,25	0,031	1,25	0,031
200...240	16	0,56	0,014	0,56	0,014	—	—
240...280	16	1,25	0,031	—	—	—	—
280...320	16	1,37	0,034	1,25	0,031	—	—
320...360	16	1,37	0,034	1,37	0,034	0,56	0,014
360...400	16	1,5	0,037	1,5	0,037	1,25	0,031
400...440	16	1,5	0,037	1,5	0,037	—	—
960...1000	8	2,5	0,06	1,25	0,031	1,25	0,031
1000...1040	8	1,5	0,037	1,5	0,037	1,37	0,034
1040...1120	8	1,5	0,037	2,25	0,056	—	—
1120...1160	8	2,25	0,056	2	0,05	1,5	0,037
Фрезерные барабаны Ф-6,5							
0...40	8	—	—	—	—	—	—
40...80	8	1	0,025	—	—	—	—
80...120	8	0,5	0,0125	0,25	0,006	—	—
120...160	8	1,25	0,031	—	—	0,25	0,006
160...200	6	0,5	0,0125	1	0,025	—	—
200...240	6	1	0,025	—	—	—	—
240...280	6	1,33	0,033	1	0,025	1	0,025
280...320	4	1	0,025	1	0,025	—	—
320...360	4	1	0,025	2	0,05	—	—
360...400	4	1,5	0,037	—	—	2	0,05
640...680	4	1,5	0,037	2	0,05	—	—
680...720	4	1,5	0,037	1	0,025	—	—
720...760	4	2,5	0,06	2,5	0,06	2	0,05
Ворошилки ВС-9,6							
0...40	3	—	—	—	—	—	—
40...80	3	—	—	—	—	—	—
80...120	6	0,16	0,004	0,16	0,004	—	—
120...160	6	—	—	—	—	0,16	0,004
160...200	6	0,33	0,008	0,33	0,008	—	—
200...240	6	0,5	0,0125	0,33	0,008	—	—
240...280	6	0,33	0,008	0,33	0,008	0,33	0,008
280...320	4	0,5	0,0125	0,5	0,0125	—	—
320...360	4	—	—	—	—	0,5	0,0125

К первой группе сложности относились отказы, устраняемые операторами технологических машин, имеющие трудоемкость восстановления до двух часов.

Ко второй группе сложности относились отказы, для устранения которых требовалось участие ремонтной бригады с трудоемкостью восстановления до восьми часов.

К третьей группе сложности относились отказы, требующие эвакуации технологических машин для ремонта с месторождения с трудоемкостью восстановления свыше двадцати часов.

Статистическая обработка результатов исследований возникновения отказов начинается с упорядочивания исходных значений, полученных во время испытаний. Вначале значения распределяют в вариационный ряд, затем проверяют однородность результатов наблюдений.

Для выявления закономерности распределения результатов, полученных в процессе исследования, при числе наблюдений $N > 30$ вариационный ряд разбивают на интервалы. В каждом интервале рассматривается не отдельное значение, а их количество n_i .

Для расчетов на практике принимают число интервалов k равным 7...12, а величину интервала определяют по формуле

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,3 \lg N} \text{ или } \Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k}.$$

Основные статистические характеристики распределения определяются по формулам:

математическое ожидание

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^k x_{\text{ср}i} m_i,$$

где $x_{\text{ср}i}$ – среднее значение наработки на i -м интервале;

частость

$$m_i = n_i / N;$$

среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}};$$

коэффициент вариации

$$V = \sigma / \bar{x}.$$

В зависимости от значения коэффициента вариации предполагают, какой-либо закон распределения. При $V < 0,3$ принимают нормальный закон распределения, при $V > 0,5$ можно использовать экспоненциальный или Вейбула – Гнеденко. В интервале $0,3 < V < 0,5$ могут применяться все

три закона. После этого требуется проверить выдвинутую гипотезу по критерию согласия Пирсона, Колмогорова, или Мизеса.

При неизвестных параметрах распределения наиболее удобным для оценки надежности выборки является критерий Пирсона χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - m'_i)^2}{m_i},$$

где m'_i – значения теоретической частоты, полученной по принятому закону распределения случайной величины.

Если значение χ^2 близко к нулю, тогда соответствующие эмпирические и теоретические частоты совпадают. Если значение не близко к нулю, то его нужно сравнивать с критическим значением. Критическое значение χ^2_β требуется выбрать из специальных таблиц в соответствии с уровнем значимости β и числа степеней свободы. Принятое значение числа степеней свободы r определяется:

$$r = k - b,$$

где b – сумма установленных параметров закона, найденных с помощью теоретического распределения. Для нормального закона распределения это три параметра: среднеквадратичное отклонение; математическое ожидание и наработка. Для закона Вейбулла – Гнеденко и экспоненциального – два параметра.

Если значение $\chi^2 < \chi^2_\beta$, то расхождение между эмпирическими и теоретическими частотами можно считать несущественными и предполагаемую гипотезу нужно принять. В обратном случае принятую гипотезу отвергают и проводят повторные исследования. Далее для выявленных значений математического ожидания устанавливают границы доверительного интервала. Доверительный интервал определяет, что с вероятностью β математическое ожидания укладывается в пределах $x_H < \bar{x} < x_B$, где x_H и x_B – нижнее и верхнее предельные значения наработки.

Доверительная вероятность принимается в зависимости от точности исследований, и достоверности выводов, следующих из них. Для определения закономерностей в общем виде допустимо принять $\beta = 0,67$, в том случае, если проводятся исследования, связанные с конструкцией реальных машин $\beta = 0,90$.

Предельные отклонения для средневзвешенного значения определяемой величины определяются:

$$x_H = \bar{x} - \frac{\sigma t_\beta}{\sqrt{N}}, \quad x_B = \bar{x} + \frac{\sigma t_\beta}{\sqrt{N}},$$

где t_β – коэффициент Стьюдента, который для нормального распределения случайной величины с вероятностью $\beta = 0,997$ находится в интервале $\bar{x} \pm 3\sigma$.

Количество машин для установления показателей надежности ТМ определяется в зависимости от выбранного распределения случайной погрешности, рассеяния результатов эксперимента, от необходимой точности и достоверности результатов. В любом случае погрешность исследования всегда меньше при большем объеме выборки, однако это может существенно удорожать и усложнять исследование.

В зависимости от доверительной вероятности, а также частного относительной погрешности и коэффициента вариации, от принятого закона распределения случайного значения устанавливается допустимое минимальное количество наблюдений, а в случае неизвестного распределения рассчитывают по формуле

$$N_{\min} = \frac{\ln(1 - \beta)}{\ln P(t)},$$

где вероятность безотказной работы $P(t)$ и доверительная вероятность β задаются [2].

Показатели надежности ТМ устанавливаются с учетом параметров распределений случайных величин. В этом случае определяется достоверность и точность результатов по выборкам, начиная с закона распределения случайной величины и относительной погрешности, которая сравнивается с эталонной $\varepsilon_{\text{ЭТ}}$:

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{\beta} \sigma}{x \sqrt{N}} \leq \varepsilon_{\text{ЭТ}}.$$

После этого рассчитывается доверительный интервал:

$$x_{\text{Н}} = \bar{x}(1 - \varepsilon), \quad x_{\text{В}} = \bar{x}(1 + \varepsilon).$$

ТМ состоят из большого количества деталей и узлов, поэтому безотказность машины в целом зависит от безотказности каждого ее элемента, причем машину нужно рассматривать как сложную систему, надежность которой можно определить, используя различные структурные схемы.

Был проведен анализ структуры исследуемых машин, выявлены основные элементы, оказывающие влияние на надежность ТМ, и построены зависимости потока отказов от количества таких элементов и наработки [3].

Из данных, представленных на рис. 1, видно, что с ростом наработки поток отказов увеличивается для рассматриваемых машин, и зависит от группы сложности и количества элементов, влияющих на безотказность.

На рис. 2 показано изменение потока отказов первой группы сложности в зависимости от наработки машин в % от интервала до капитального ремонта. Сплошная прямая – обобщенная зависимость изменения потока отказов первой группы сложности от наработки для машин МТФ-43 и фрезерных барабанов Ф-6,5, пунктирная прямая – для ворошилок ВС-9,6.

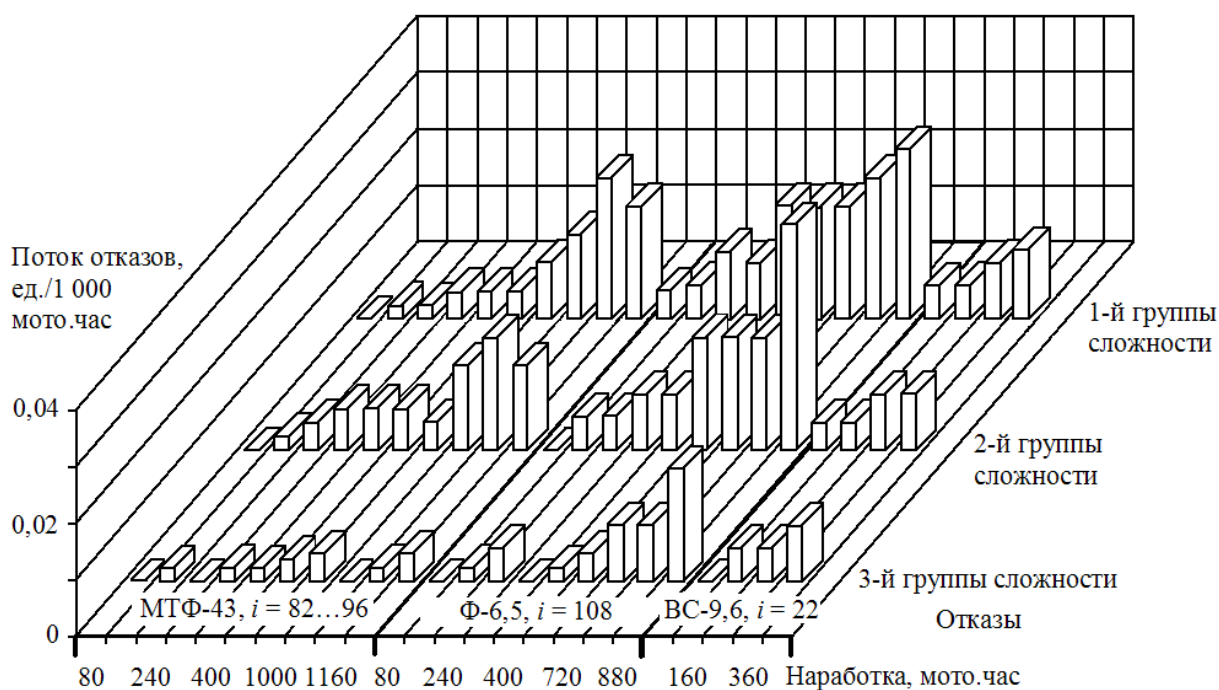


Рис. 1. Изменение потока отказов ТМ от наработки.
i – количество элементов, влияющих на безотказность ТМ

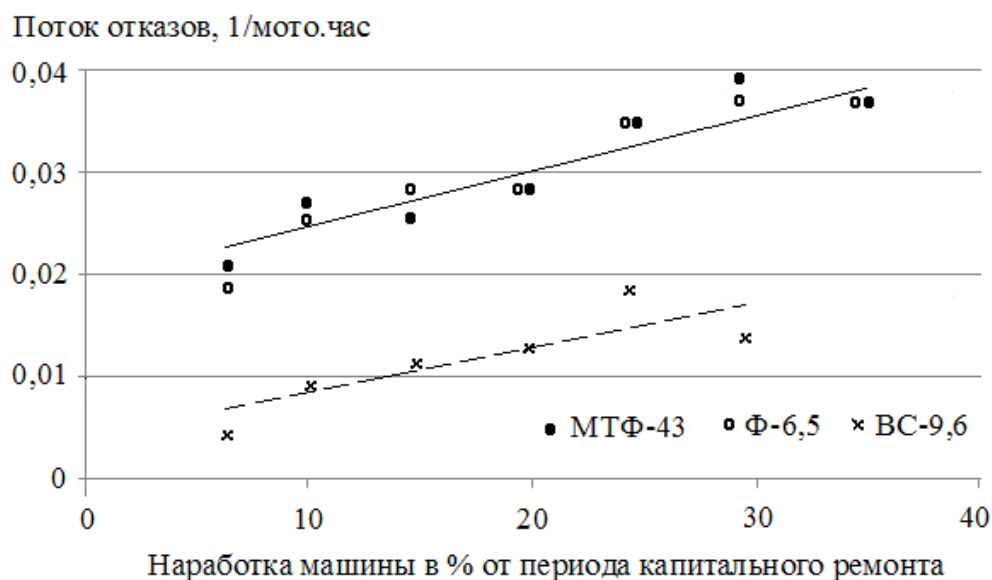


Рис. 2. Изменение потока отказов первой группы сложности ТМ в зависимости от наработки, полученное по результатам исследования в ОАО «Васильевский мох»

На основе анализа эксплуатационных данных была получена зависимость количества отказов от наработки рассматриваемых ТМ

$$n = vi (1 + \omega t / T_{кр}) t,$$

где n – количество отказов; v – коэффициент, связывающий количество основных трибоэлементов и начальный поток отказов в зависимости от группы сложности (для отказов первой группы $v = 2,2 \cdot 10^{-4}$, для отказов

второй группы $\nu = 9 \cdot 10^{-5}$, для отказов третьей группы $\nu = 6 \cdot 10^{-5}$); ω – эмпирический коэффициент изменения потока отказов от наработки ($\omega = 0,45$).

Принятые гипотезы были проверены с помощью критерия Пирсона. При уровне значимости $\beta = 0,95$, при пяти и четырех степенях свободы после объединения интервалов значение критерия $\chi^2_{\text{набл}}$ по результатам наблюдений $5,3 < \chi^2_{\text{набл}} < 8,5$, что меньше $\chi^2_{\text{кр}}$ ($\chi^2_{\text{кр}} = 11,1$ и $\chi^2_{\text{кр}} = 9,5$ соответственно). Это значит, что предлагаемые гипотезы не противоречат опытным данным.

Были получены значения статистических характеристик по результатам эмпирического исследования (таб. 2).

Таблица 2. Статистические характеристики эксплуатации машин, распределенные по сложности

Тип машин	Сложность отказа	Среднее время безотказной работы $t_{\text{ср}}$, ч	Средне-квадратическое отклонение σ	Доверительный интервал, ч	Вариация V	Коэффициент асимметрии A_s	Экцесс E_{xx}	Среднее время восстановления $t_{\text{в}}$, ч	Среднее квадратическое отклонение от среднего времени восстановления $\sigma_{\text{в}}$, ч
МТФ-43	1	36,5	11,7	7,2	0,32	0,73	1,24	1,8	0,64
	2	54,1	16,9	7,9	0,31	0,06	0,9	5,9	1,7
	3	119	95,3	66	0,8	9,8	3	19,2	4,5
Ф-6,5	1	29,6	10,7	7,3	0,36	4,1	1,6	2,2	0,75
	2	31,4	10	8,2	0,31	0,08	0,64	6,3	1,95
	3	76,1	9,4	5,4	0,34	0,7	1,3	21,3	4,3
ВС-9,6	1	119,5	95,6	72	0,8	0,32	1,2	1,75	1,1
	2	194,5	149,6	83	0,8	1,24	1,6	6,1	1,86
	3	168,2	128,5	62,2	0,76	0,39	0,3	19,8	5,1

Был разработан алгоритм имитационной модели, с помощью которой проводилось прогнозирование эксплуатации рассматриваемых торфяных машин [4]. Это позволило проверять различные варианты воздействия на техническое состояние ТМ с учетом метеорологических условий, что обеспечивает выбор оптимального сочетания ТО и ремонтов для конкретных условий эксплуатации.

Определение с помощью специальных исследований индивидуальной периодичности операций по восстановлению работоспособности торфяных машин с учетом технического состояния и внешних факторов воздействия, дает возможность наиболее полно использовать метеоблагоприятные дни для добычи торфа и осуществлять объективный выбор наилучших решений по воздействию на машину для достижения максимальной производительности, что позволит повысить эффективность торфяного производства.

Библиографический список

1. Рахутин, М.Г. Изыскание резервов повышения эффективности эксплуатации оборудования / М.Г. Рахутин // Уголь. 2006. № 5. С. 44–46.
2. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. М.: Наука, 1965. 524 с.
3. Горлов, И.В. Анализ состояния технологического объекта на основе структурной модели / И.В. Горлов, Е.В. Полетаева // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2014. № 1. С. 146–149.
4. Горлов, И.В. Прогнозирование эксплуатации торфяной машины при изменении параметров трибоэлементов / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, М.Г. Рахутин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2015. Вып. 8. С. 70–75.

УДК 621.385.833.2: 620.18

С.М. Слободян, Д.А. Барчуков
Тверской государственный технический университет

УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ ИЗНОСА ИГЛЫ ЗОНДА СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОСКОПА

Описывается устройство, позволяющее компенсировать повышенный износ и повреждение иглы зонда сканирующего микроскопа.

Управление положением иглы позволяет варьировать в широком диапазоне зазор между ней и поверхностью. Техническим результатом является повышение точности и достоверности получаемых результатов исследований.

Ключевые слова: сканирующий микроскоп, нанотрубка, положение иглы, поверхность измерения.

DEVICE FOR CONTROL AND WEAR CORRECT OF NEEDLE OF THE SCANNING MICROSCOPE PROBE

A device is described that makes it possible to compensate heightened wear and damage of a probe needle of a scanning microscope.

By controlling the position of the needle, the gap between it and the surface can be varied over a wide range. The technical result is to increase the accuracy and reliability of the obtained research results.

Key words: scanning microscope, nanotube, needle position, measurement surface.

Зонд сканирующего микроскопа применяется в туннельной, атомно-силовой и других видах сканирующей зондовой микроскопии, а также в автономных системах измерения рельефа поверхностей путем сканирования их зондом, в устройствах диагностики и неразрушающего контроля неравномерности поверхностей, включая динамику их изменения с помощью известных методов, предназначенных для применения в микроскопии [1–4].

Известен зонд для сканирующей емкостной микроскопии, состоящий из консоли с размещенной на одном ее конце иглой, закрепленной на чипе другой стороной, и имеющий проводящий слой, расположенный, по крайней мере, на поверхности зонда со стороны иглы. На поверхности зонда со стороны иглы установлен проводящий экран, отделенный от проводящего слоя первой диэлектрической прослойкой [5].

Недостатком данного устройства является функционально узкая область применения, ограниченная только измерением емкости образцов, покрытых тонким слоем диэлектрика, что затрудняет ее использование в туннельной, атомно-силовой и других видах сканирующей зондовой микроскопии.

Известна конструкция зонда для сканирующего микроскопа, содержащая кварцевый резонатор с иглой, закрепленной на одном его конце, причем другой конец установлен на держателе-платформе [6].

Недостатком устройства является его низкая надежность, связанная с применением кварцевого резонатора и нестабильностью его характеристик, возникающей из-за приклейки его одним концом к держателю-платформе. Это также затрудняет процедуру замены иглы без замены всего дорогостоящего зонда и сужает его функциональные возможности.

Известен также зонд сканирующего микроскопа, состоящий из последовательно соединенных иглы нанозонда, консоли, держателя, датчика частоты собственных колебаний консоли и оптического датчика движения консоли, оптически связанного с консолью [7]. Недостатками данного устройства является то, что во время подвода иглы к образцу возникает жесткий контакт иглы с поверхностью, вызывающий повышенный износ иглы и, часто, ее повреждение, требующее дорогостоящих замен. Кроме того, износ или повреждение иглы меняет случайным образом размер иглы, внося априори неизвестную погрешность измерения, что ухудшает точность, надежность и достоверность результата измерения.

Технической проблемой является создание устройства, позволяющего компенсировать в реальном времени повышенный износ и повреждение игл, требующих их замены. Создание такого устройства позволит повысить точность и надежность зонда сканирующего микроскопа.

Методы проведения исследований. Выполнение иглы из углеродной нанотрубки позволяет в реальном времени перемещать иглу, стабилизировать размер части иглы, вынесенной за пределы свободного конца консоли, и, таким образом, компенсировать ее износ или повреждение, что значительно повышает точность и достоверность измерения сканирующим микроскопом.

За счет обеспечения функциональной связи иглы, зажима и захвата иглы, закрепленной на свободном конце консоли, обеспечивается регулировка зазора между иглой и поверхностью, и создаются наилучшие условия реализации метода измерения, принятого в данном типе зондовой системы.

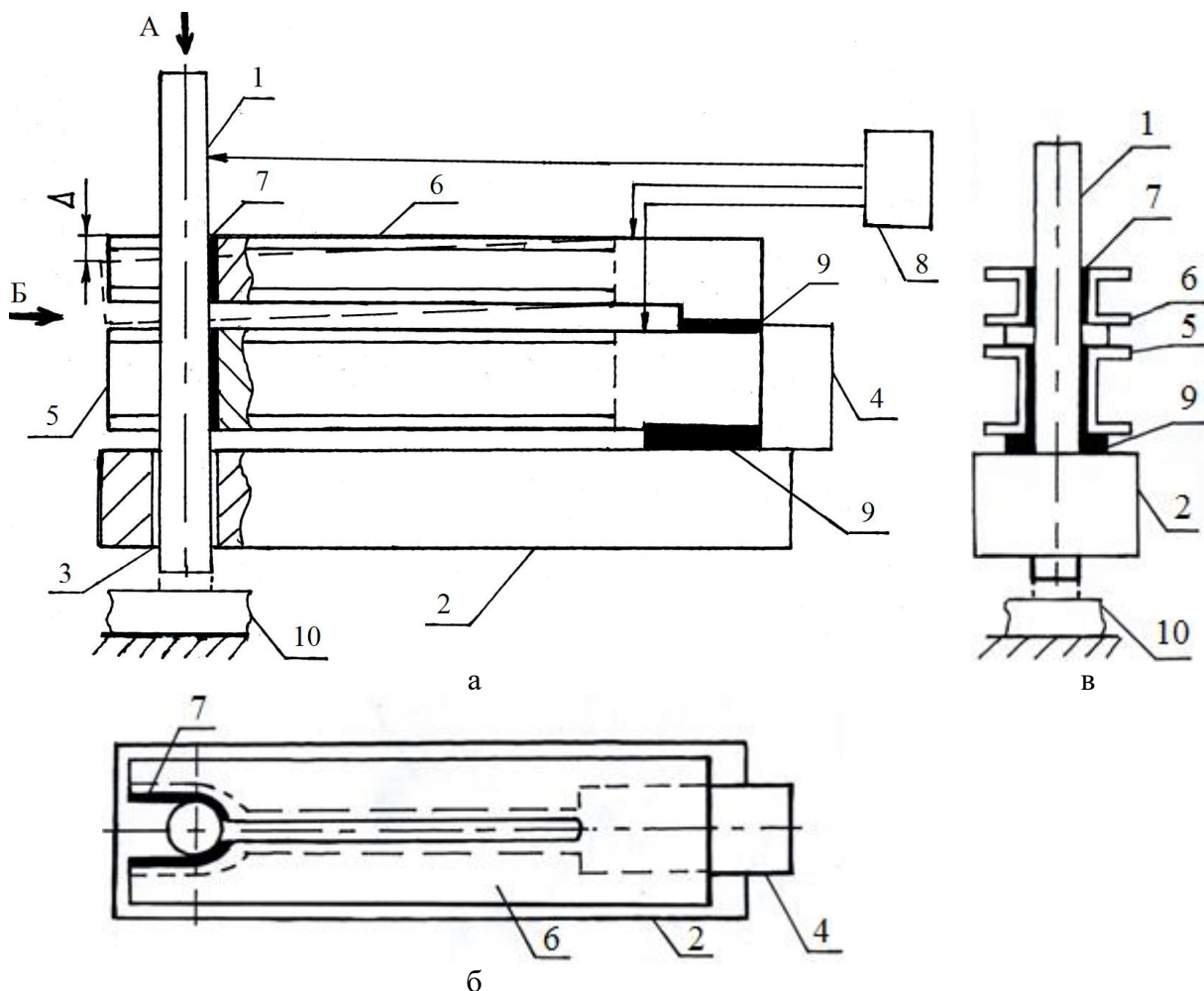
Возможность регулировки сдвига иглы, выполненной из углеродной нанотрубки, для обеспечения постоянства зазора между трубкой и измеря-

емой поверхностью в диапазоне регулирования, соизмеримом с длиной углеродной нанотрубки, позволяет решать проблемы жесткого контакта, контроля состояния иглы при наличии актов ее разрушения или износа при контакте с поверхностью.

Покрытие слоем изолирующего диэлектрика поверхностей обеих пар упругих элементов зажима и захвата и использование электрических входов иглы и обеих пар упругих элементов зажима и захвата иглы путем их подключения к соответствующим выходам источника сигналов управления положением иглы позволяет управлять компенсацией износа иглы в динамике ее функционирования.

Таким образом, зонд с иглой, выполненный из углеродной нанотрубки, позволит повысить надежность и точность измерения [8].

Результаты исследования и их обсуждение. Устройство управления и коррекции износа иглы сканирующего микроскопа [9] представлено на рисунке.



Устройство управления и коррекции износа иглы сканирующего микроскопа:

а – вид спереди; б – вид сверху (вид А); в – вид сбоку (вид Б).

1 – игла; 2 – консоль; 3 – отверстие; 4 – держатель; 5 – зажим; 6 – захват;

7 – слой диэлектрика; 8 – источник сигналов управления; 9 – клеевое соединение;

10 – исследуемая поверхность; Δ – шаг дискретного смещения иглы

Зонд сканирующего микроскопа состоит из иглы 1, выполненной в виде однослойной углеродной нанотрубки, консоли 2, на свободном конце которой выполнено отверстие 3. Консоль жестко закреплена в держателе 4, служащим опорой зонда. На консоли возле отверстия закреплена пара упругих элементов зажима 5, над которыми закреплена пара упругих элементов захвата 6, связанных попарно между собой и являющихся частью одного электрического проводника. Поверхности зажима и захвата покрыты слоем диэлектрика 7, который изолирует их друг от друга и от иглы. Зонд дополнительно содержит источник 8 сигналов управления положением иглы, электрические входы которого связаны с иглой парами элементов зажима и захвата.

Каждая пара элементов зажима и захвата жестко связаны между собой в области держателя и закреплены на нем. Свободные концы упругих элементов зажима и захвата, покрытые слоем диэлектрика, охватывают иглу с возможностью ее свободного прохождения между ними. Зажим и захват жестко, например, клеем 9, скреплены с консолью и друг с другом.

Такое выполнение зажима и захвата обеспечивает возможность раскрытия их свободных концов для упрощения установки или замены углеродной нанотрубки-иглы в зазор между парой упругих элементов зажима и захвата. Источник сигналов управления положением иглы связан соответствующими электрическими линиями с иглой и парой упругих элементов зажима и парой упругих элементов захвата. Если на игле и зажиме создана одинаковая полярность потенциала, то зажим ослаблен или разжат. Так же действуют и упругие элементы захвата.

Зонд сканирующего микроскопа работает следующим образом. При восстановлении параметров зонда сканирующего микроскопа и после поломки уже установленной в нем иглы первоначально осуществляют калибровку, когда положение консоли известно и определено. На этом этапе происходит включение тактируемого перемещения установленной в упругих элементах зажима и захвата углеродной трубки-иглы. Компенсация возросшего среднего значения зазора «игла – поверхность», вызванного текущим износом или разрушением конца углеродной трубки-иглы осуществляется по достаточно простому циклическому алгоритму смещения трубки на шаг Δ , не превышающий расстояние разноса зажима и захвата. Малое расстояние разноса зажима и захвата, установленных на консоли, позволяет исходно корректировать весьма малый износ иглы. Возможность многократного повторения двухтактного процесса перемещения углеродной трубки-иглы позволяет, в случае разрушения иглы, восстанавливать значительно больший, чем исходный, заданный при начальной калибровке, размер свободного конца иглы, без остановки процедуры исследования для замены кантилевера.

При точном сканировании игла в виде углеродной нанотрубки движется над поверхностью 10. Информационный параметр сигнала, снимае-

мого с иглы, определяется типом зондовой микроскопии. Например, в туннельной микроскопии по одной из методик туннельный ток поддерживается стабильным за счет обратной связи. Показания движения консоли меняются в зависимости от топографии поверхности. Эти изменения регистрируют, на их основе строят карту высот поверхности. Возможно также осуществлять движение иглы на фиксированной высоте над исследуемой поверхностью. В этом случае регистрируют изменение тока. Его значения служат основой построения топографии поверхности.

Сила, действующая со стороны исследуемой поверхности, приводит к изгибу консоли с соответствующим смещением нанотрубки-иглы, а вместе с этим зажима с захватом. Появление выступов или впадин на поверхности под иглой вызывает изменение силы, действующей на зонд, и изменяет изгиб консоли. Таким образом, мера изгиба консоли, а значит и величина сигнала, формируемого иглой, функционально связаны с величиной зазора «игла – поверхность». Износ или разрушение иглы при контактном взаимодействии с выступами исследуемой поверхности ведет к возрастанию (при износе – случайного, при разрушении – скачкообразного) зазора «игла – поверхность», следствием которого является увеличение уровня центрирования и рост погрешности измерения смещения сигнала, измерения топографии поверхности. Наличие сигнала смещения при износе или разрушении иглы воспринимается системой микроскопа как «кажущееся» удаление иглы от поверхности. В этом случае система микроскопа, обрабатывая появление сигнала «кажущегося» удаления иглы от среднего значения зазора «игла – поверхность», приближает поверхность к консоли до формирования значения нормы уровня сигнала зонда, установленного при его начальной калибровке. В случае значительного разрушения иглы подобное сближение поверхности ведет к жесткому контакту с поверхностью теперь уже консоли и ее разрушению.

Смена действия вектора силы тяжести при смене направления перемещения иглы учитывается соответствующим изменением напряжения потенциала источника, подаваемого на иглу для увеличения сил кулоновского взаимодействия. Механическое перемещение консоли не действует на электрическое поле, создаваемое разностью потенциалов иглы, зажима и захвата, силовые линии которого относительно места положения устройства перемещения иглы на подвижной консоли не изменяются, сколько бы консоль их не перемещала. Качка консоли и действие данного устройства на этой же консоли – это относительно независимые между собой процессы.

Смещение иглы осуществляется под действием сигналов источника управления положением иглы, совместно с захватом б сквозь пространство зажима и отверстия в консоли. Смещение иглы, производимое совокупно с направленным в сторону более упругих, на данный момент времени разжатых элементов зажима, вызванное изгибом упругих элементов захвата под действием сигналов управления положением иглы от источника, осу-

шествуют силы кулоновского взаимодействия свободно висящих, разноименно заряженных упругих элементов захвата с упругими элементами зажима. Установленный сигналами источника порядок и сила кулоновского взаимодействия потенциалов напряжения обеспечивают тактируемое перемещение иглы под действием изменения электрических потенциалов напряжения сигналов источника, подаваемых на иглу, зажим и захват.

Выработка сигнала о необходимости смещения иглы формируется на этапе калибровки или на основе получения информации об отклонении выходных сигналов координат зонда за пределы диапазона значений, установленных при калибровке сканирующего микроскопа. Зажим и захват нанотрубки-иглы установлены соосно с отверстием в области свободного конца консоли. Отверстие на свободном конце консоли выполнено проходным как направляющая по оси перемещения нанотрубки-иглы, ортогонально расположенной к плоскости консоли. Отверстие на свободном конце консоли вкуче с зажимом и захватом иглы-нанотрубки предотвращает ее смещение в плоскости консоли, одновременно позволяя перемещать нанотрубку-иглу в ортогональной плоскости к поверхности консоли. При изгибе консоли нанотрубка-игла вместе с зажимом и захватом смещаются с областью их крепления совокупно с перемещением свободного конца консоли.

Система обработки сигнала атомно-силового микроскопа непрерывно отслеживает положение нанотрубки-иглы относительно исследуемой поверхности. Формирование включения источника сигналов управления положением иглы и начала процедуры коррекции отклонения положения иглы от принятого при калибровке зазора «игла – поверхность» основано на контроле отклонения луча лазера, отраженного от конца консоли. Координаты положения консоли формирует обычно оптический датчик атомно-силового микроскопа.

Применение предлагаемого зонда позволяет предотвратить поломку консоли при прямом механическом ее взаимодействии с поверхностью при сканировании. Прочность и упругость углеродной нанотрубки способны существенно повысить точность и надежность и продлить живучесть зонда. При износе или поломке углеродной нанотрубки появляется возможность on-line смещения по длине свободного конца углеродной нанотрубки. При изгибе консоли нанотрубка-игла, зажим и захват смещаются совместно с областью их крепления, а именно, с перемещением свободного конца консоли.

Таким образом, зонд сканирующего микроскопа может быть использован в сканирующей микроскопии для управляемого смещения и коррекции износа иглы зонда в широком диапазоне изменения длин, скоростей и мер износа, путем управления положением углеродной нанотрубки-иглы и параметрами режимов сканирования иглой в реальном времени.

Регулировкой зазора между торцом углеродной нанотрубки-иглы и поверхностью создаются наилучшие условия реализации любого метода

измерения, который принят в данном типе зондовой микроскопии. Наличие подвижной, регулируемой по длине углеродной нанотрубки-иглы для управляемого воздействия на размер зазора «нанотрубка – поверхность» с равным длине нанотрубки-иглы размером смещения, позволяет решать основные проблемы, связанные с жесткими контактами, отсутствием контроля состояния кончика нанотрубки-иглы и возникновения актов разрушения и износа иглы [9].

Заключение. Наличие источника сигналов управления положением иглы позволяет повысить точность неразрушающего контроля поверхности за время, необходимое и достаточное для сохранения постоянства параметров зонда в интервале длительности проводимого исследования.

Практическое использование предлагаемого зонда возможно во всех типах сканирующей зондовой микроскопии, обеспечивает восстановление исходных параметров игл зонда сканирующих микроскопов, повышает точность и достоверность получаемых результатов [9].

Библиографический список

1. Liu, L. Three-Dimensional Atomic Force Microscopy for sidewall imaging using torsional resonance mode / L. Liu [et al.] // *Scanning*. 2018. V. 2018. P. 7606037-8.
2. Özer, H.Ö. Atomic resolution force imaging through the static deflection of the cantilever in simultaneous Scanning Tunneling / H.Ö. Özer // *Ultramicroscopy*. 2019. V. 196. P. 54–57.
3. Vikrant, K.S. An AFM tip replacement system compatible with all ambient media and operation modalities / K.S. Vikrant, G.R. Jayanth // *Ultramicroscopy*. 2019. V. 196. P. 136–141.
4. Caplins, B.W. Transmission imaging with a programmable detector in a scanning electron microscope / B.W. Caplins, J.D. Holm, R.R. Keller // *Ultramicroscopy* 2019. V. 196. P. 40–48.
5. Пат. 2289862 Российская Федерация. Зонд для сканирующей емкостной микроскопии / В.А. Быков [и др.]; опубл. 20.12.2006, Бюл. № 35.
6. Franz J. Giessibl. High-speed force sensor for force microscopy and profilometry utilizing a quartz fork / Franz J. Giessibl // *Applied Physics Letters*. 1998. V. 73. № 26. P. 3956–3958.
7. Миронов, В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов. М.: Техносфера, 2004. С. 76–92.
8. Слободян, С.М. Особенности применения однослойной углеродной нанотрубки как иглы сканирующего микроскопа / С.М. Слободян, Д.А. Барчуков // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. Тверь: ТвГТУ, 2019. № 4 (4). С. 40–47.
9. Пат. 2708530 Российская Федерация. Зонд сканирующего микроскопа / С.М. Слободян, Д.А. Барчуков; опубл. 09.12.2019, Бюл. № 34.

УДК 539.4

Д.Г. Громаковский¹, А.Л. Сикиотов², С.В. Шигин¹

¹НТЦ «Надежность» Самарского государственного технического университета,

²Комитет по науке и образованию РСТП, ООО «Волновая биомеханика»

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Дано описание склерометрического программно-аппаратного комплекса, предназначенного для исследования изнашивания, контроля прочности поверхностей деталей узлов трения и прогнозирования остаточного ресурса.

Ключевые слова: склерометр, параметры контактирования, прочность, износостойкость, пластичность, деформация поверхностного слоя, склерометрический программно-аппаратный комплекс.

DEVELOPMENT OF EFFECTIVE MEANS TO ENSURE RELIABILITY AND RESOURCE OF FRICTION UNITS OF MACHINES AND MECHANISMS

A sclerometric software and hardware complex designed to study wear, control the strength of surfaces of parts of friction units and prediction of a residual life is described.

Key words: sclerometer, contact parameters, strength, wear resistance, plasticity, deformation of the surface layer, sclerometric software and hardware complex.

Современное промышленное оборудование, транспорт и машины других технических отраслей насыщены разнообразными узлами трения.

В технической информации содержатся данные об использовании в машинах и механизмах порядка тысячи вариантов устройства узлов трения, что привлекает к проблеме их надежности повышенное внимание.

Создание работоспособных узлов трения технологических, энергетических и транспортных машин является основным профилем научно-технического центра «Надежность» СамГТУ. Среди разработок центра значительное место занимает создание технологий, повышающих износостойкость поверхностей трения; разработка эффективных способов смазки, вариантов смазочных материалов; разработка специальных способов – кавитационного диспергирования смазки при приготовлении смазочных эмульсий, очистки (мойки) поверхностей трения и др., что обеспечивает динамическую устойчивость машин, содержащих узлы трения [1–4].

В ходе проведения этих исследований в НТЦ «Надежность» СамГТУ разработан склерометрический программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий возможность высокопрофессиональной оценки состояния трущихся поверхностей, их прочности, износостойкости и др. характеристик.

Одна из созданных технологий реализует способ образования противозносных пленок на поверхностях трения при ее взаимодействии с фторированным графитом $(CF_x)_n$.

При реализации этого способа упрочняемые детали помещают в технологическую жидкость (масло М-8) с присадкой фторированного графита порядка 5–10 % от объема масла и возбуждают в ней кавитацию при колебаниях в низкочастотном резонансе.

При такой обработке (порядка 3...5 мин) поверхности деталей насыщаются частицами фторированного графита, а на поверхностях узлов трения образуется модифицированный слой, «прошитый» цепочками фторидов металлов, выполняющих роль арматуры рабочего слоя (рис. 1).

Способ апробирован при упрочнении зубчатых зацеплений и подшипников стартера двигателя ракетносителя НК-14Ст в условиях реальных нагрузок и других деталей на ПАО «Кузнецов» в г. Самаре. В результате такой обработки долговечность поверхностного слоя узлов трения повышалась до 30 % от исходного состояния. Также повышались энергия активация разрушения, микротвердость и другие характеристики.

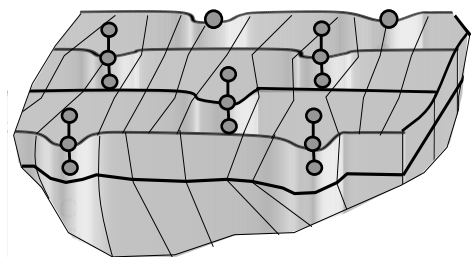


Рис. 1. Схема пассивации поверхностей

Разработанный в НТЦ «Надежность» СамГТУ склерометрический программно-аппаратный комплекс (далее СПАК) содержит блоки питания и управления 1, склерометрирования 2 и компьютер 3 (рис. 2).

Для обеспечения корректного проведения испытаний в режиме склерометрирования в его конструкции (рис. 3) установлен механизм блокировки 13 нагружающего узла 14 и привод перемещения предметного столика 19.

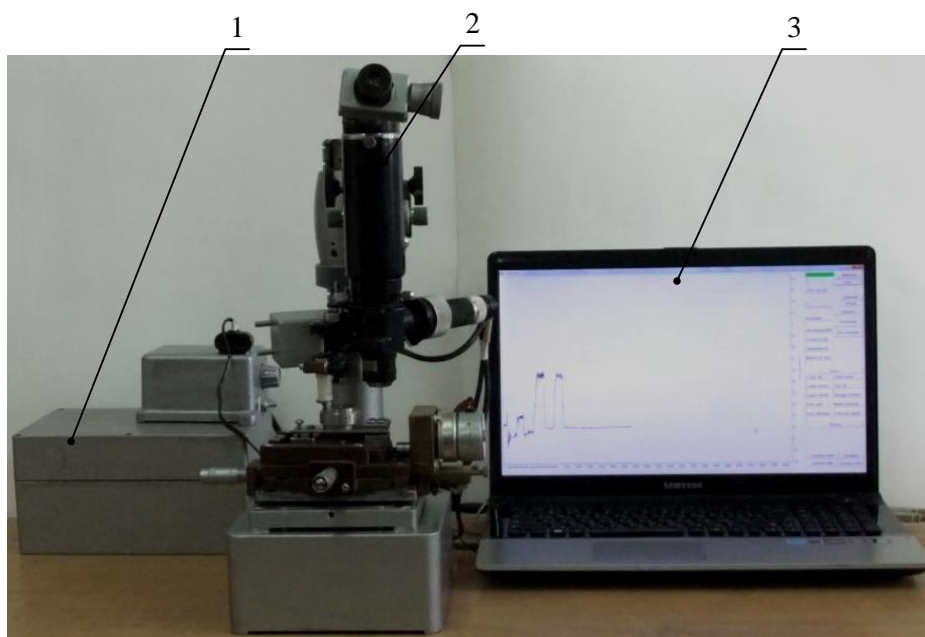


Рис. 2. Склерометрический программно-аппаратный комплекс:
1 – блок питания и управления; 2 – склерометр на базе микротвердомера ПМТ-3;
3 – диалоговое окно управляющей программы

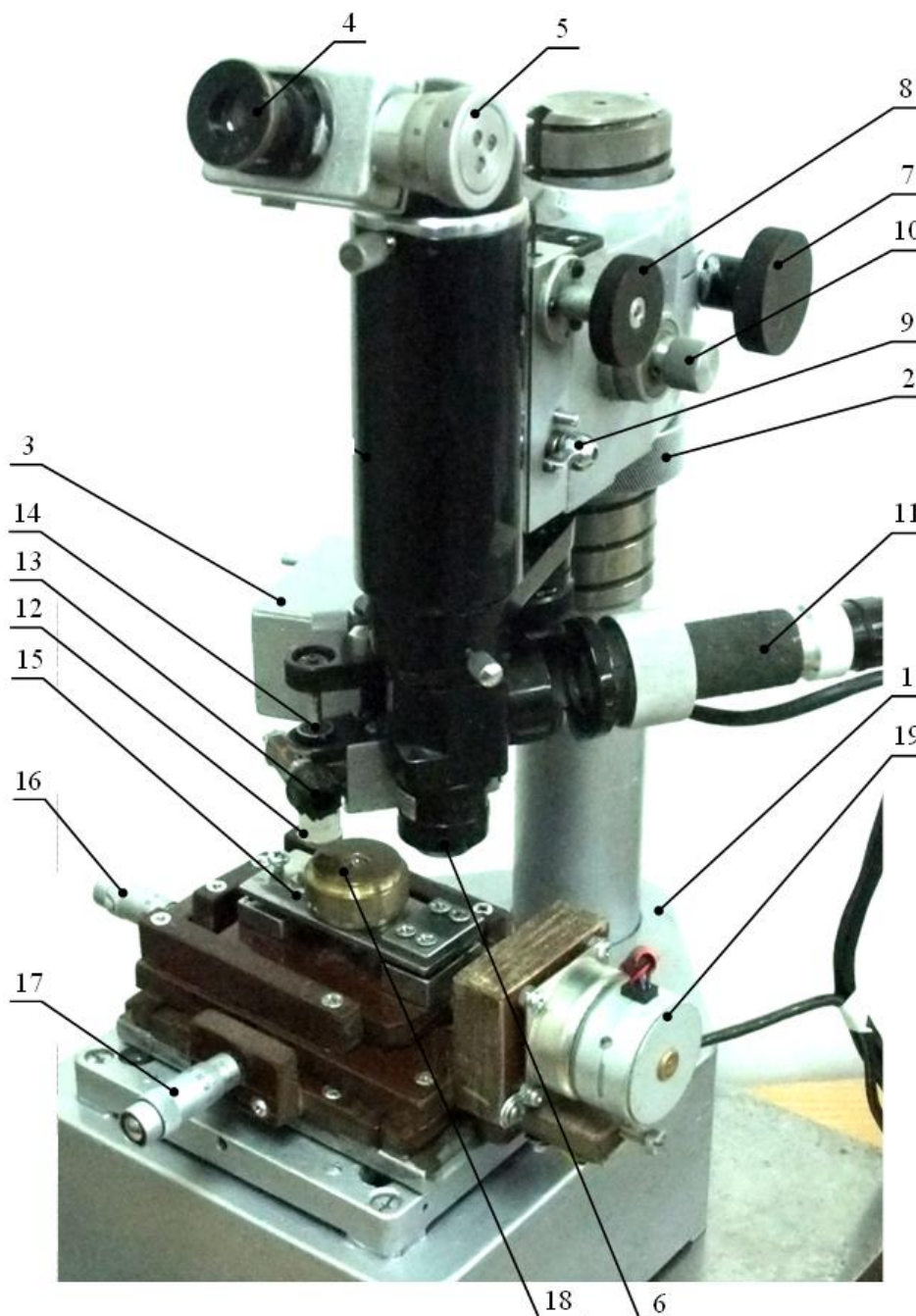


Рис. 3. Основные узлы склерометра: 1 – стойка; 2 – фиксатор высоты; 3 – модуль измерительного усилителя; 4 – окуляр; 5 – измерительный микровинт; 6 – объектив; 7 – фиксатор положения микроскопа; 8 – регулятор высоты; 9 – фиксатор точной фокусировки, 10 – регулятор точной фокусировки («Внедрение»); 11 – подсветка; 12 – индентор; 13 – фиксатор индентора; 14 – узел нагружения индентора; 15 – предметный столик; 16 и 17 – микровинты продольного и поперечного перемещения соответственно; 18 – образец; 19 – привод предметного столика

Комплекс позволяет производить оценку параметров прочности, пластичности и износостойкости материалов.

Наряду с использованием в приборе стандартного метода оценки микротвердости (ГОСТ 9450-76) при испытаниях поверхностей создана возможность в широких пределах варьировать глубину образуемых царапин.

Для этого на базовой стойке склерометра установлен механизм микроиндентирования 14, а в приводе перемещения предметного столика 15 – шаговый микродвигатель постоянного тока 19 (см. рис. 3).

При выполнении склерометрирования исследуемые образцы или детали закрепляют на предметном столике 15 (см. рис. 0), подводят индентор 12 к поверхности исследуемого образца до касания, а затем внедряют на заданную глубину (0,1...5 мкм). После внедрения включают двигатель 19 для перемещения предметного столика 15 и реализуют царапину (рис. 4), образуемую при установленной глубине внедренного индентора.

При испытаниях определяют деформационные характеристики материалов, описанные ниже.

Удельная энергия деформации $U_{\text{деф}}$, представляющая собой отношение работы $A_{\text{деф}}$, затраченной на деформацию материала, к объему образованной царапины $V_{\text{деф}}$:

$$U_{\text{деф}} = A_{\text{деф}}/V_{\text{деф}} \text{ кДж/моль.}$$

Энергия активации пластической деформации U_0 (кДж/моль), оцениваемая путем аппроксимации до нулевого значения характеристики зависимости энергии деформации $U(T)$ от действующего напряжения, как показано на рис. 5.

Накопленная энергия повреждаемости U_e , как сумма начального значения энергии деформации $U_{\text{деф}}$ (после изготовления) и ее приращения $\Delta U_{\text{деф}}(t)$ в результате наработки в течение времени t при конкретных условиях нагружения трением (скорости, температуры, нагрузки и др. параметров испытания)

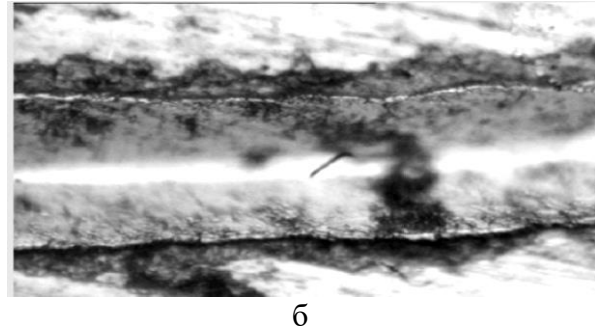
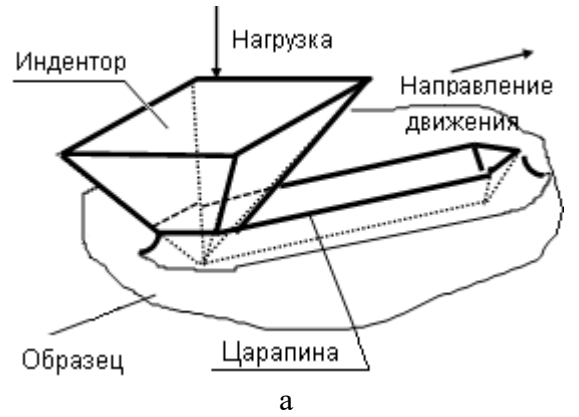


Рис. 4. Реализация царапины: а – схема; б – фотография царапины

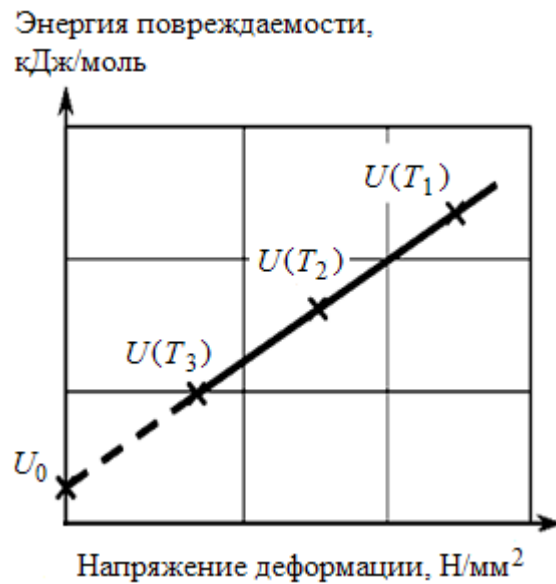


Рис. 5. Методика оценки энергии активации пластической деформации U_0 , аппроксимация значений $U(T_i)$ от напряжения деформации

$$U_e(t) = U_{e0} + \Delta U_{\text{деф}}(t) \text{ кДж/мм}^3.$$

Кинетический структурно-чувствительный коэффициент γ .

$$\gamma = U(T)/\sigma \text{ мм}^3/\text{моль},$$

где $U(T)$ – энергия активации разрушения при температуре испытаний, кДж/моль; σ – касательное напряжение, Н/мм².

Микротвердость H_μ , кГс/мм².

$$H_\mu = U_0/\gamma.$$

Склерометрическая оценка кинетических характеристик повреждаемости в предложенной методике позволяет для любых образцов материалов не только экспериментально определять энергию активации пластической деформации U_0 и структурно-чувствительный коэффициент γ , но и производить теоретическую интерпретацию наблюдаемого разрушения твердых тел на основе кинетической концепции прочности, предложенной академиком РАН С.Н. Журковым [5] и др.

Согласно концепции С.Н. Журкова время до разрушения единичной связи в кристаллической решетке твердого тела может быть представлено отношением

$$\tau = t_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT},$$

где U_0 – энергия активации пластической деформации (разрушения); t_0 – постоянная времени; σ – действующее напряжение; k – постоянная Больцмана; T – температура; γ – кинетический коэффициент.

На базе склерометрической методики, созданной в НТЦ «Надежность» СамГТУ, расчетное уравнение скорости изнашивания при трении I_V (мм³/час) при усталостном механизме разрушения в виде:

$$I_V = \frac{\Delta A_r n_r h}{\xi \zeta \lambda \left(t_0 \exp \frac{U_0 - \psi \gamma \sigma}{RT} \right)} \text{ мм}^3/\text{час},$$

где ΔA_r – площадь пятна фактического контакта (ФПК); n_r – число пятен ФПК на рассчитываемой площади; h – толщина разрушаемого слоя за цикл отделения материала на ступенчатой кривой износа (рис. ба); ψ – коэффициент поглощения; коэффициенты ξ и ζ учитывают повреждаемость поверхностного слоя, накопленную при обработке или трении.

Известно, что механизм изнашивания определяется параметрами контактирования поверхностей [6–9 и др.] Поскольку материал нагружается по вершинам наиболее высоких выступов неровностей, при относительном перемещении особенно высоко нагруженными оказываются наиболее высокие выступы, что реализует преобладание усталостного характера процесса.

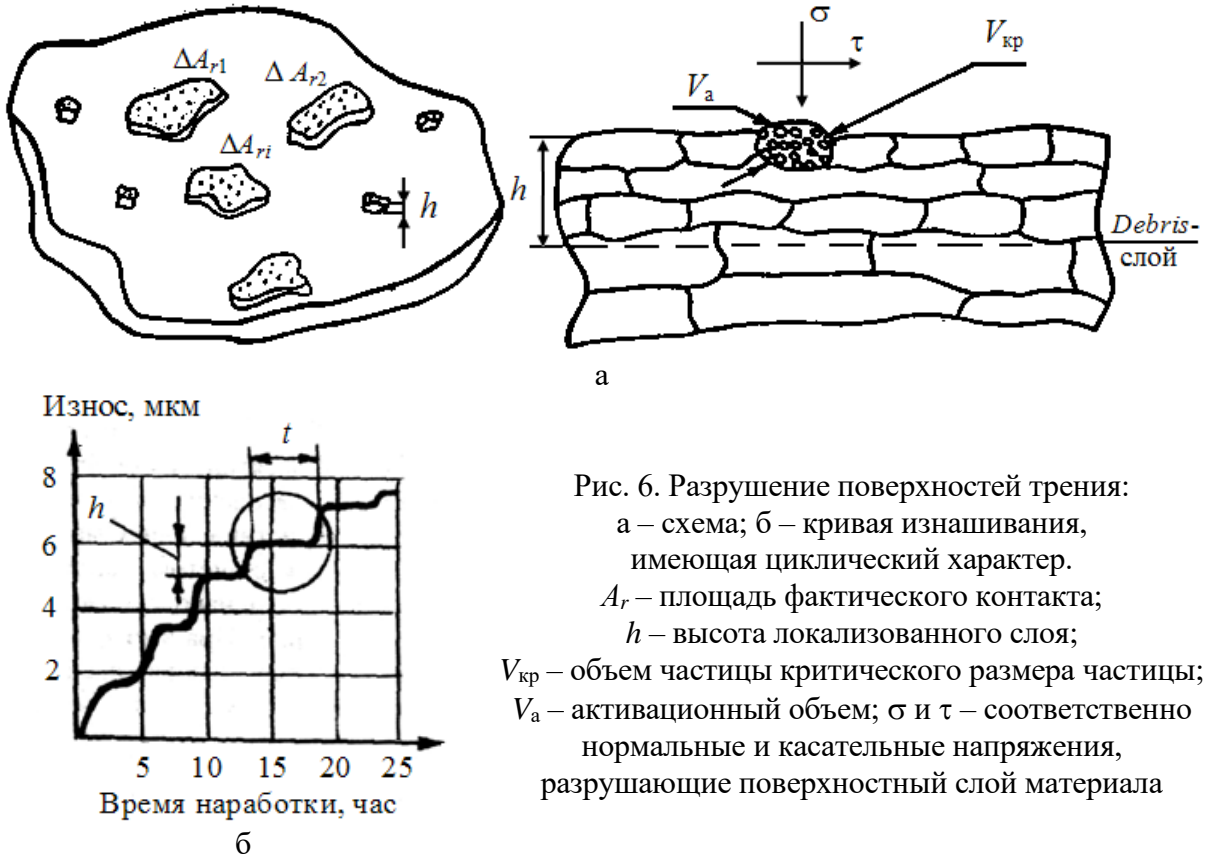


Рис. 6. Разрушение поверхностей трения:
а – схема; б – кривая изнашивания,
имеющая циклический характер.

A_r – площадь фактического контакта;
 h – высота локализованного слоя;

$V_{кр}$ – объем частицы критического размера частицы;
 V_a – активационный объем; σ и τ – соответственно
нормальные и касательные напряжения,
разрушающие поверхностный слой материала

При нагружении фактического контакта (см. рис. 6б) суммарную площадь фактического контакта каждой рассматриваемой пары $A_{r\Sigma}$ рассчитывают как сумму площадок единичных контактов n_r :

$$A_{r\Sigma} = \sum \Delta A_r \cdot n_r.$$

Объем материала, разрушаемого за каждый единичный цикл изнашивания $V_{изн}$, определяют по уравнению

$$V_{изн} = \Delta A_r \cdot n_r \cdot h^3,$$

а скорость изнашивания $I_{ср}$ определяется в зависимости от времени изнашивания t :

$$I_h = V_{изн}/t.$$

Число разрушаемых связей $\lambda_{разр}$ ориентировочно определяют из отношения

$$\lambda_{разр} = \frac{S_{частицы}}{S_{ед.границ}} \cdot n,$$

где $S_{частицы}$ – площадь среднестатистической частицы износа; $S_{ед.границ}$ – площадь единичной грани решетки изнашиваемых материалов; n – число единичных контактов.

Время одного цикла износа деформируемого объема $t_{цикла}$ (см. рис. 6б) оценивается из следующих отношений

$$t_{\text{цикла}} = \lambda \left[t_0 \exp \frac{(U_0 - \gamma\sigma)}{kT} \right].$$

С учетом отмеченного, скорость износа I_V может быть получена из отношения

$$I_V = \frac{3600 \Delta A_r n_r h}{k_p \xi \lambda \left(t_0 \exp \frac{U_0 - \psi \gamma \sigma}{RT} \right)} \text{ мм}^3/\text{час},$$

где ξ – коэффициент, учитывающий релаксацию повреждений; ψ – коэффициент поглощения; k_p – коэффициент, учитывает исходную повреждаемость материалов и отражающий превышение числа актов разрушения связей над числом актов релаксации. Например, $\xi \approx 1,12$ при исходной повреждаемости $k_p \approx 0,85$.

Эквивалентные значения напряжения представляют как

$$\sigma_{\text{эв}\Sigma} = K_{\text{ФПК}} \sigma,$$

где $K_{\text{ФПК}} = A_d/A_r$ – коэффициент концентрации напряжений.

Для учета основных составляющих расчетного напряжения принято выражение:

$$\sigma = \sigma_{\text{эв}\Sigma} K_{\text{масс}} K_{\text{волн}} K_{\text{ФПК}},$$

где коэффициенты $K_{\text{масс}}$ и $K_{\text{волн}}$ учитывают особенности контакта шероховатых поверхностей.

Оценка указанных выше параметров контактирования позволила создать общую схему разрушения поверхностей при трении. Ниже приводится иллюстрация примера оценки износа одной из втулок шлиц-шарнира основной стойки шасси самолета ТУ-134, сопряженной с валом из стали 30ХГСА с покрытием из твердого хрома со смазкой ЦИАТИМ-201 (рис. 7).

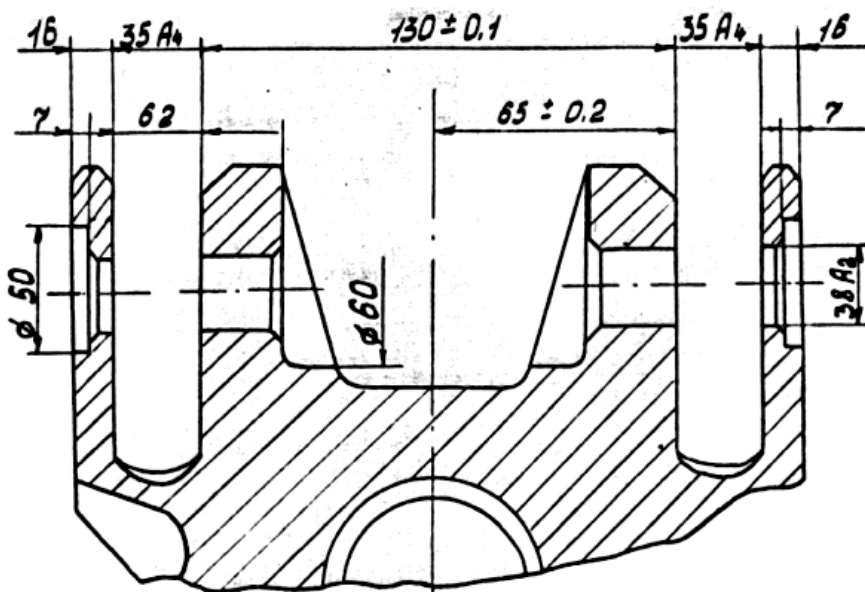


Рис. 7. Эскиз износа узла трения на примере втулки нижнего звена шлиц-шарнира основной стойки самолета ТУ-134

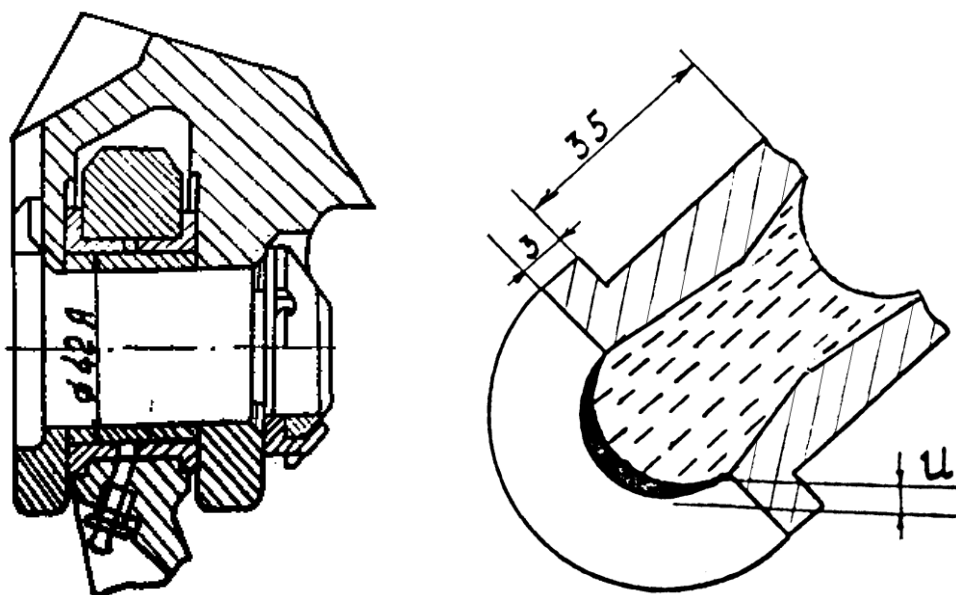


Рис. 7. Продолжение

Общий характер оценки скорости изнашивания втулки в зависимости от величины контактного давления приведен на рис. 8.

Скорость изнашивания, $\text{м}^3/\text{ч}$

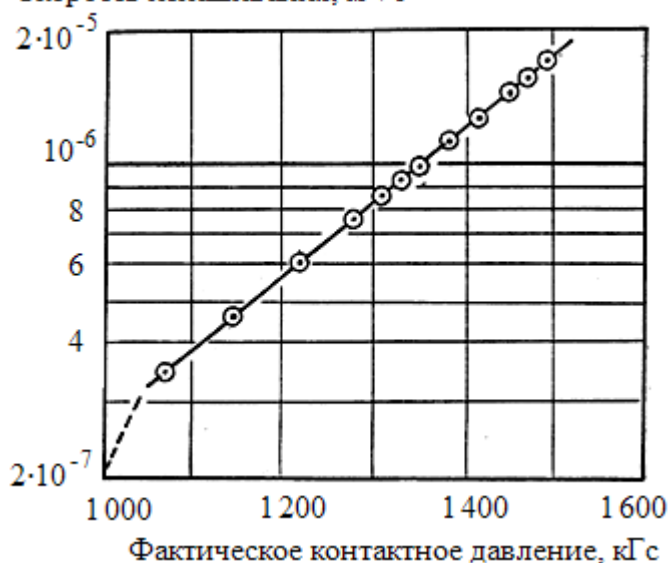


Рис. 8. Результаты расчета скорости изнашивания

Заключение. Поскольку результаты оценки изнашивания, получаемые по предложенной методике, близки к данным экспериментальной оценки изнашивания в производственных условиях, авторы намечают дальнейшую разработку вариантов расчета износостойкости узлов трения машин и приборов на базе склерометрической оценки параметров их работоспособности.

Библиографический список

1. Громаковский, Д.Г. Проблемы разработки термофлуктуационной модели изнашивания поверхности / Д.Г. Громаковский, Б.М. Силаев, Л.М. Логвинов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 6. С. 45–48.
2. Громаковский, Д.Г. Новые технологии упрочнения поверхностей на наномикроуровне. Известия Самарского НЦ РАН. 2014. Т. 17. № 1. С. 18–21.
3. Громаковский, Д.Г. Наноразмерные антифрикционные противоизносные пленки / Д.Г. Громаковский // РИТМ (ремонт, инновации, технологии, модернизация). 2013. № 2 (80). С. 26–30.
4. Громаковский, Д.Г. О системном подходе к обеспечению высокой износостойкости поверхностей узлов трения / Д.Г. Громаковский, С. В. Шигин, Т.А. Бабкова //

Известия Самарского НЦ РАН. Специальный выпуск «Актуальные проблемы машиностроения». 2009. С. 37–42.

5. Журков, С.Н. К вопросу о физической основе прочности / С.Н. Журков // Физика твердого тела. 1980. С. 22.

6. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. М: Машиностроение, 1968. 480 с.

7. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. М.: Наука, 2001. 478 с.

8. Машков, Ю.К. Трибология конструкционных материалов: Учебн. пособ. / Ю.К. Машков. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1996. 304 с.

9. Рыбакова, Л.М. Структура и износостойкость металла / Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова М.: Машиностроение, 1996. 304 с.

УДК 531.43

Д.А. Никуленко¹, М.Д. Шубин¹

Тверской государственной технической университет

МАЯТНИК ОБЕРБЕКА В ЛАБОРАТОРНЫХ ПРАКТИКУМАХ ПО ФИЗИКЕ И ТРИБОЛОГИИ

Теоретически обоснована и экспериментально проверена возможность применения маятника Обербека в лабораторном практикуме для исследования процессов трения. На основании основного закона динамики вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси и закона сохранения энергии рассчитаны момент трения и коэффициент трения в подшипниках и в контакте гибкой ленты (нити) со шкивом.

Ключевые слова: трение, коэффициент трения, момент трения, гибкая лента, маятник Обербека.

OBERBECK'S PENDULUM IN LABORATORY WORKSHOP ON PHYSICS AND TRIBOLOGY

The possibility of the Oberbek's pendulum using in a laboratory workshop to study friction processes is theoretically grounded and experimentally verified. On the grounds of the basic laws of the dynamics of solid rotation about a fixed axis and the energy conservation, the friction torque and the coefficient of friction in bearings and in a contact of a flexible tape (fiber) with a pulley are calculated.

Key words: friction, coefficient of friction, friction torque, flexible tape, Oberbek's pendulum.

Лабораторная установка, известная как маятник Обербека, широко используется в лабораторных практикумах по физике многих учебных заведений [1–3 и др.]. При этом традиционно упор делается на изучение законов вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси и определение момента инерции вращающегося тела. Попутно одной из це-

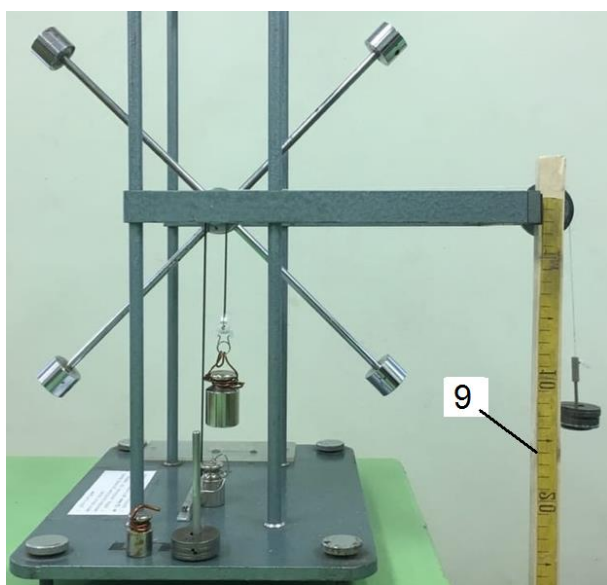
¹ Научный руководитель – В.В. Измайлов, д.т.н., профессор кафедры прикладной физики ТвГТУ.

лей при выполнении лабораторных работ является определение момента трения в опорах. Универсальная конструкция маятника Обербека и его дидактические возможности позволили использовать его целенаправленно для исследования процессов трения [4]. В этом случае маятник Обербека используется для определения коэффициента трения качения в подшипниках маятника с помощью затухающих колебаний.

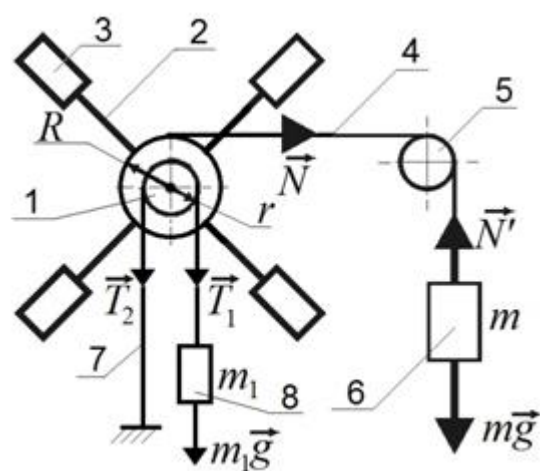
Универсальная конструкция маятника позволяет после небольшой модернизации использовать его для определения момента трения и коэффициента трения в другой распространенной разновидности фрикционной пары – в контакте гибкой ленты (нити) с металлическим шкивом. Примерами таких фрикционных пар могут служить ленточный тормоз или ременная передача.

Цель данной работы заключается в обосновании возможности использования стандартной лабораторной установки «Маятник Обербека» для исследования трения в контакте гибкой ленты и металлического шкива с определением коэффициента трения.

Лабораторная установка. Модернизированная лабораторная установка показана на рис. 1. Втулка 1 с двумя шкивами разных радиусов R и r и крестовиной маятника, образованной четырьмя стержнями 2 с грузами 3 на концах, закреплена на оси, которая вращается в подшипниках. На шкив большего радиуса R намотана нить 4, перекинутая через блок 5. К концу нити привязан подвес с гирями 6 общей массой m . Шкив малого радиуса r охватывается гибкой лентой (нитью) 7. Одним концом лента жестко крепится к основанию установки, к другому концу ленты подвешен груз 8 массой m_1 . Вертикальное положение подвеса с гирями 6 фиксируется с помощью линейки 9.



а



б

Рис. 1. Лабораторная установка: а – общий вид; б – схема

Теоретические предпосылки. Схематически контакт гибкой ленты со шкивом, вращающимся с угловой скоростью ω , показан на рис. 2. Соотношение сил натяжения ленты T_1 и T_2 определяется формулой Эйлера

$$T_2 = T_1 e^{\mu\alpha},$$

где μ – коэффициент трения; α – угол охвата шкива лентой. В описываемой установке $\alpha = \pi$. Для момента трения в контакте ленты со шкивом, очевидно, можно записать

$$M_{\text{тр}} = r(T_2 - T_1) = m_1 g r (e^{\mu\alpha} - 1),$$

где g – ускорение свободного падения.

Выражая из этого уравнения коэффициент трения, получим

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \ln \left(1 + \frac{M_{\text{тр}}}{m_1 g r} \right). \quad (1)$$

Для экспериментального определения момента трения и затем коэффициента трения в контакте ленты со шкивом можно использовать два фундаментальных закона: основной закон динамики вращательного движения и закон сохранения энергии. Рассмотрим обе методики.

Методика 1. Применение основного закона динамики вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси. Уравнение движения маятника согласно основному закону динамики вращательного движения представим в виде

$$J\varepsilon = M - M_{\text{сопр}}, \quad (2)$$

где J – момент инерции маятника; ε – его угловое ускорение; M – момент силы натяжения нити N , приводящей маятник во вращение; $M_{\text{сопр}}$ – суммарный момент сопротивления вращению маятника. Если не учитывать сопротивление воздуха и трение в оси блока 5, можно считать $M_{\text{сопр}} = M_{\text{тр}} + M_0$, где M_0 – момент трения в подшипниках оси маятника.

Считая момент инерции маятника J и момент сопротивления $M_{\text{сопр}}$ постоянными для данной установки, из уравнения (2) получаем линейную зависимость углового ускорения маятника ε от момента M вида

$$\varepsilon = -\frac{1}{J} M_{\text{сопр}} + \frac{1}{J} M, \quad (3)$$

график которой имеет вид прямой линии (рис. 3).

Выражение (3) позволяет определить по построенному графику $\varepsilon(M)$ момент сопротив-

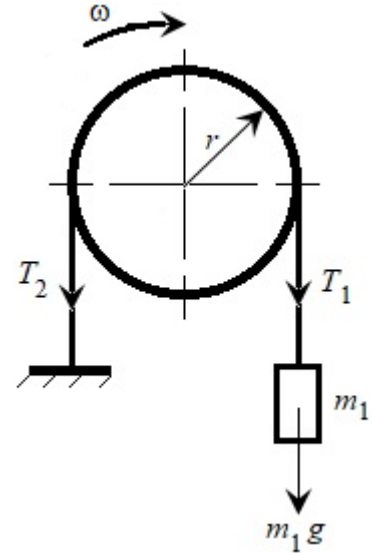


Рис. 2. Схема контакта гибкой ленты со шкивом

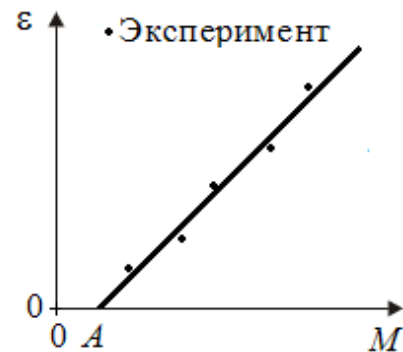


Рис. 3. Методика оценки момента сопротивления

ления $M_{\text{сопр}}$ как отрезок OA , отсекаемый линией графика на оси абсцисс (рис. 3).

Для построения графика $\varepsilon(M)$ необходимо знать угловое ускорение маятника и момент силы натяжения нити. Угловое ускорение может быть найдено через линейное ускорение a подвеса с гирями

$$\varepsilon = \frac{a}{R}, \quad (4)$$

где R – радиус большого шкива.

Величину линейного ускорения подвеса с гирями можно определить из уравнения

$$a = \frac{2h}{R^2}, \quad (5)$$

где h – высота, на которую опускается подвес с гирями b за время t . Величины h и t легко определяются экспериментально.

Момент силы натяжения нити определяется формулой $M = NR$. Если пренебречь моментом инерции блока 5 и моментом сил трения в его опоре, то по третьему закону Ньютона сила N , приводящая маятник во вращение, равна силе N' , действующей на подвес с гирями (см. рис. 1б). Силу N' можно найти из уравнения движения подвеса с гирями. Согласно второму закону Ньютона

$$ma = mg - N'.$$

Отсюда $N = N' = m(g - a)$ и момент силы натяжения нити

$$M = NR = m(g - a)R. \quad (6)$$

Меняя массу m , можно получить несколько точек для построения графика $\varepsilon(M)$ в виде линейной зависимости (см. рис. 3) для определения $M_{\text{сопр}}$. Первую серию экспериментов выполняют при ненагруженной ленте ($m_1 = 0$), при этом $M_{\text{сопр}} = M_0$. Далее повторяют эксперименты с различными значениями массы m_1 , по графику $\varepsilon(M)$ в каждом случае определяют соответствующие значения $M_{\text{сопр}}$, вычисляют $M_{\text{тр}} = M_{\text{сопр}} - M_0$ и по формуле (1) получают несколько значений коэффициента трения μ . Далее вычисляют среднее значение коэффициента трения (считая μ не зависящим от нормальной нагрузки) и соответствующую погрешность результата.

Методика 2. Применение закона сохранения энергии. В этом случае методика проведения экспериментов следующая. Вращая маятник, нить наматывают на шкив радиуса R , поднимая при этом груз m в верхнее (исходное) положение, которое фиксируют по линейке. После освобождения маятника груз m начинает опускаться, раскручивая маятник. Когда груз m опустится в крайнее нижнее положение, которое определяется длиной нити, маятник продолжает по инерции вращаться, нить наматывается на шкив радиусом R и груз m снова поднимается на некоторую высоту, меньшую первоначальной. Конечное положение маятника также фиксируют по линейке. Очевидно, что часть первоначального запаса энергии тратится на преодоление трения в подшипниках оси маятника и в контакте

ленты со шкивом. Зная начальное и конечное положения маятника, можно оценить потери энергии и рассчитать момент трения и коэффициент трения ленты по шкиву.

Считая, что практически все потери энергии обусловлены трением в контакте ленты со шкивом и в подшипниках оси маятника, можно записать

$$mgh_1 - mgh_2 = M_{\text{сопр}} \varphi, \quad (7)$$

где h_1 – расстояние по вертикали, на которое опускается груз m из первоначального положения; $h_2 < h_1$ – расстояние по вертикали, на которое поднимается груз после достижения им нижнего положения; $M_{\text{сопр}} = M_{\text{тр}} + M_0$ – суммарный момент сопротивления; $M_{\text{тр}}$ и M_0 – соответственно моменты трения в контакте ленты со шкивом и в подшипниках оси маятника; $\varphi = (h_1 + h_2)/R$ – полный угол поворота маятника. Из уравнения (7) получаем для момента сопротивления

$$M_{\text{сопр}} = mgR \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}. \quad (8)$$

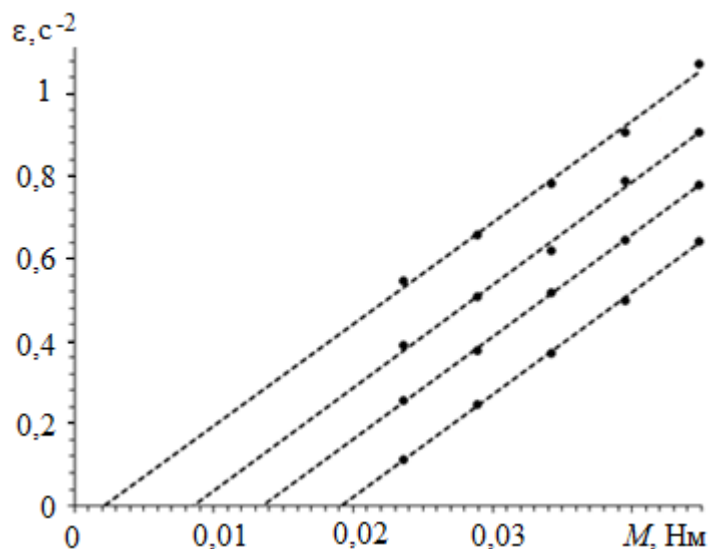


Рис. 4. Зависимость углового ускорения маятника Обербека от момента силы натяжения нити: 1 – $m_1 = 0$; 2 – $m_1 = 0,5$ Н; 3 – $m_1 = 1$ Н; 4 – $m_1 = 1,5$ Н

Таблица 1. Экспериментальные результаты по методике 1

m_1 , Н	0	0,5	1,0	1,5
$M_{\text{сопр}}$, мНм	2,06	8,47	13,5	19,2
$M_{\text{тр}}$, мНм	0	6,41	11,4	17,1
μ	–	0,28	0,26	0,26

Экспериментальные зависимости углового ускорения маятника от момента силы натяжения нити, полученные по методике 1, представлены на рис. 4. Соответствующие значения моментов и коэффициентов трения в контакте ленты со шкивом приведены в табл. 1.

Момент трения в подшипниках оси маятника M_0 рассчитывается по формуле (8) в отсутствие трения ленты по шкиву при массе груза $m_1 = 0$. Затем эксперимент повторяется несколько раз при различных значениях массы груза на ленте m_1 . Значения коэффициента трения в контакте ленты со шкивом рассчитываются по формуле (1) с последующим усреднением результата или с построением графика зависимости $\mu(m_1)$.

Результаты экспериментов и их обсуждение. По описанным выше методикам экспериментально определяли моменты сопротивления и коэффициент трения в контакте гибкой ленты из полиэстера со стальным шкивом.

Как видно из табл. 1, коэффициент трения ленты по шкиву можно считать не зависящим от нагрузки и принять среднее значение $\mu = 0,27 \pm 0,03$.

Результаты экспериментов по методике 2 представлены на рис. 5. Для расчета коэффициента трения гибкой ленты по стальному шкиву по формуле (1) необходимо знать момент трения в контакте ленты со шкивом $M_{\text{тр}}$. В эксперименте же определяется суммарный коэффициент трения $M_{\text{сопр}}$ (см. формулу (8)).

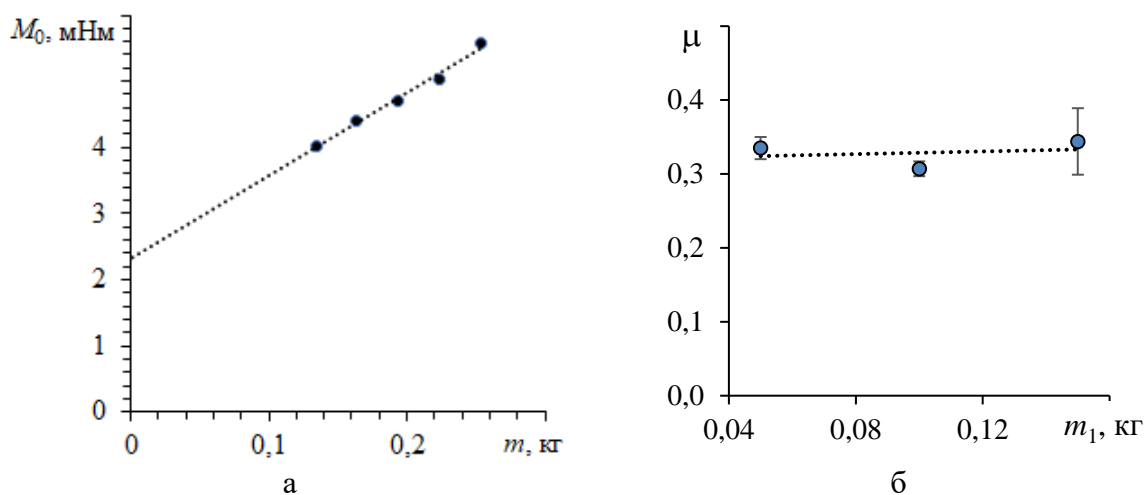


Рис. 5. Результаты экспериментов по методике 2:

а – зависимость момента трения в подшипниках M_0 от массы груза m ;

б – коэффициент трения гибкой ленты по стальному шкиву при различных массах груза m_1

Поэтому в первой серии экспериментов определяли момент трения в подшипниках оси маятника M_0 . Как отмечалось выше, это легко сделать, проводя измерения в отсутствии груза m_1 . Результаты представлены на рис. 2а в виде зависимости момента трения M_0 от массы груза m . Зависимость носит линейный характер и описывается аппроксимирующим выражением

$$M_0 = 12,5m + 2,33, \quad (9)$$

где момент трения M_0 выражен в мНм, а масса m выражена в кг.

В следующей серии экспериментов измеряли суммарный момент $M_{\text{сопр}}$ при трех массах груза m_1 на ленте: 0,5; 1,0; и 1,5 Н (50, 100 и 150 г). При каждом значении массы m_1 определяли пять значений момента $M_{\text{сопр}}$ в соответствии с формулой (8) при различных значениях массы груза m , затем рассчитывали пять значений момента трения в контакте ленты со шкивом $M_{\text{тр}} = M_{\text{сопр}} - M_0$, где M_0 рассчитывали по формуле (9) для данной массы m . По найденным значениям $M_{\text{тр}}$ для каждого из трех значений массы груза m_1 рассчитывали пять значений коэффициента трения μ по формуле (1) с последующим усреднением. В результате получили три значения коэффициента трения μ с доверительными интервалами при 95 % до-

верительной вероятности, представленные на рис. 5б. Как видно из рисунка, коэффициент трения ленты по стальному шкиву в изученном диапазоне нагрузок также практически не зависит от нагрузки на ленту. Среднее значение $\mu = 0,33 \pm 0,05$.

Сравнение значений коэффициента трения, рассчитанных на основании двух описанных методик, показывает, что вторая методика приводит к несколько большему значению μ . Однако, учитывая погрешность результатов, это различие можно считать несущественным.

Заключение. Значения коэффициента трения в контакте гибкой ленты со стальным шкивом, полученные с использованием описанных выше методик, хорошо согласуются с имеющимися в справочной литературе значениями для аналогичных пар трения. Это позволяет рекомендовать описанные выше методики с использованием модернизированного маятника Обербека для исследования процессов трения в учебных целях в лабораторных практикумах по физике (раздел «Механика») и трибологии, а также в исследовательских целях.

Библиографический список

1. Лабораторный практикум «Механика твердого тела»: учеб. пособие / под ред. В.Д. Попова. М.: МИФИ, 2009. 132 с.
2. Салецкий, А.М. Лабораторный практикум по механике твердого тела / А.М. Салецкий, А.И. Слепков. М.: Изд-во физического факультета МГУ, 2005. 100 с.
3. Лабораторные занятия по физике: метод. указ. к лаб. работам по механике и молекулярной физике. Ч. 1 / под ред. В.М. Алексеева. Тверь: ТвГТУ, 2015. 47 с.
4. Турсунметов, К.А. Дидактические возможности маятника Обербека / К.А. Турсунметов, В.Г. Махсудов, Ф.А. Гиясова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. № 1. С. 20–24.

УДК 539.3

В.В. Гараников
Тверской государственный технический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СПЛАВА АМг6 ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Представлены результаты экспериментального исследования ползучести сплава АМг6 при сложном напряженном состоянии. Показано, что наибольшая деформация ползучести возникает при испытаниях образцов на внутреннее давление, а наименьшая – при испытаниях на одноосное растяжение. Промежуточное значение деформаций ползучести соответствует испытаниям на совместное действие растягивающей силы и внутреннего давления.

Ключевые слова: ползучесть, давление, напряженное состояние.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CREEP OF AlMg6 ALLOY AT A COMPLEX STRESS STATE

The results of an experimental study of the creep of the AlMg6 alloy under a complex stress state are presented. It was shown that the greatest creep strain occurs when testing samples for internal pressure, and the smallest – when tested for uniaxial tension. The intermediate value of creep deformations corresponds to tests for the combined action of tensile force and internal pressure.

Key words: creep, pressure, stress state.

Методика исследования ползучести. Целью данной работы являлось исследование ползучести сплава АМг6 при сложном напряженном состоянии. Конкретной задачей данных экспериментов являлось выявление минимального уровня напряжений, при котором обнаруживается ползучесть. При уровнях напряжений $\sigma = 0,1 \cdot \sigma_{0,2}$, $\sigma = 0,2 \cdot \sigma_{0,2}$, $\sigma = 0,3 \cdot \sigma_{0,2}$ деформации ползучести не обнаружены ($\sigma_{0,2}$ – предел текучести). При напряжении $\sigma = 0,3 \cdot \sigma_{0,2}$ время испытания составляло 400 час. Испытания показали, что ползучесть начинает проявляться при напряжениях $\sigma > 0,7 \cdot \sigma_{0,2}$. Ползучесть на данном уровне напряжений носит ограниченный характер, причем с ростом уровня напряжений увеличивается время прекращения ползучести τ . В экспериментах на сплаве АМг6 оно составляло 40...100 час. Отклонения τ в некоторых экспериментах объясняется изменением температуры испытаний.

Разработано устройство для создания внутреннего давления и растягивающего усилия в трубчатом образце [1, 2]. На рис. 1. представлен эскиз данного устройства. Исследование ползучести сплава АМг6 проводилось на трубчатых образцах с толщиной стенки 2,5 мм. Размеры образцов и требования к точности изготовления регламентировались ГОСТ 3248-81, ГОСТ 26007-83, ГОСТ 1493-73. При подготовке образцов к испытанию в трех сечениях рабочей части контролировалась разностенность, которая не превысила 5 %. Для измерения деформаций использованы тензорезисторы типа 5П1-20-400-А-12 с базой 20 мм. Тензорезисторы наклеивались попарно на двух диаметрально противоположных сторонах в продольном и поперечном направлении.

Устройство позволяет создать в трубчатом образце внутреннее давление до 300 атм и приложить растягивающее усилие до 100 кН. Принцип работы устройства состоит в следующем. В образец 1 вставляется компенсатор 2 с присоединенной системой подачи масла. На образец накручиваются резьбовые втулки 3, и он при помощи пальцев 4 устанавливается в вилки 5. Вилки крепятся в захватах испытательной машины. Центрирование образца обеспечивается двумя шаровыми опорами 7 и в одной плоскости пальцами 4. При подаче масла в образец заглушка 8 вывернута до момента появления масла на ее резьбе, после чего заглушка наглухо закручивается. Растягивающее усилие в устройстве создается испытательной ма-

шиной FPZ-100/1 и передается через пальцы 4. Внутреннее давление создается насосом высокого давления испытательной машины ЦДМУ-30, которая расположена рядом. Устройство помещается в термостате (рис. 2).

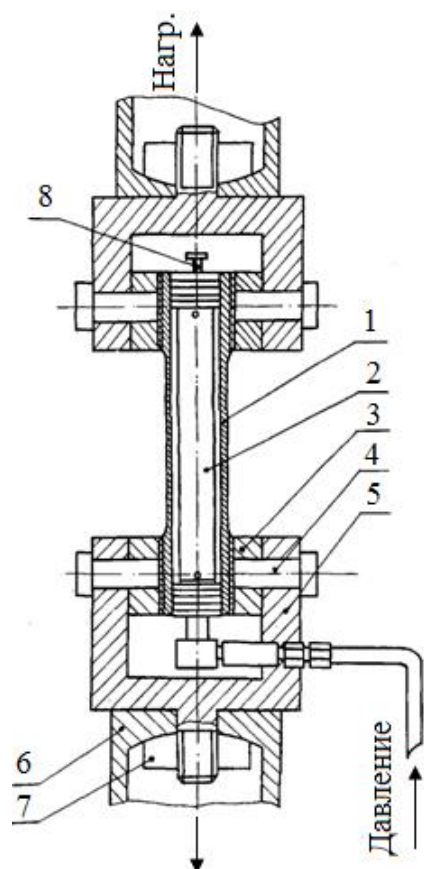


Рис. 1. Схема устройства

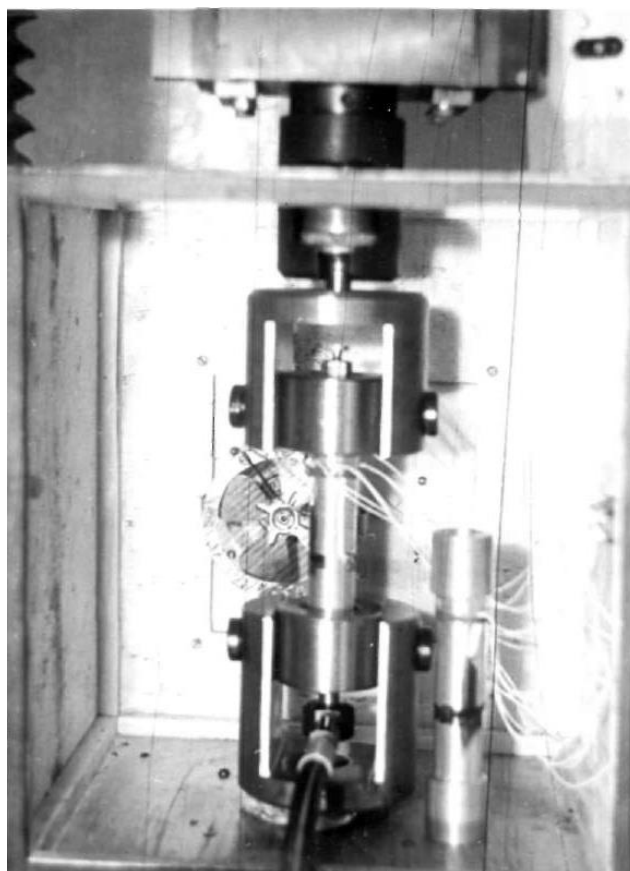


Рис. 2. Общий вид установки для испытаний при сложном напряженном состоянии

Термостат состоит из электронного блока, датчика температуры, электронагревателя и вентилятора. На стенке камеры установлен вентилятор, перед которым укреплен электронагреватель. Таким образом, воздушная струя проходит через нагреватель. Датчик температуры (транзистор) устанавливается вблизи образца. Термостат поддерживает стабильную температуру воздуха во всем объеме камеры.

Регулирование температуры осуществляется путем автоматического включения-отключения электронагревателя. Малая инерционность системы обеспечена интенсивным перемешиванием воздуха вентилятором; применением малоинерционного электронагревателя и датчика температуры; рациональным взаимным расположением вентилятора, нагревателя и датчика температуры. Точность поддержания температуры обеспечивается малой мощностью электронагревателя и чувствительной схемой измерения температуры. Вентилятор собран на электродвигателе ЭДГ-1 с четырехлопастной крыльчаткой, наружный диаметр которой 10 см. Электронагреватель, изготовленный из тонкой нихромовой проволоки диаметром 0,25 мм,

закреплен на вентиляторе. В качестве датчика температуры используется кремниевый транзистор КТ3102В в металлическом корпусе.

Была также разработана и изготовлена система стабилизации давления в трубчатом образце (рис. 3). Она предназначена для автоматического поддержания давления масла в образце при проведении механических испытаний на растяжение и внутреннее давление. Достоинство системы состоит в возможности независимого регулирования внутреннего давления и осевого усилия. Для создания давления использована гидравлическая система испытательной машины ЦДМУ-30. Она состоит из манометра 1, регулятора давления 2, электропривода 3 и редуктора 4.

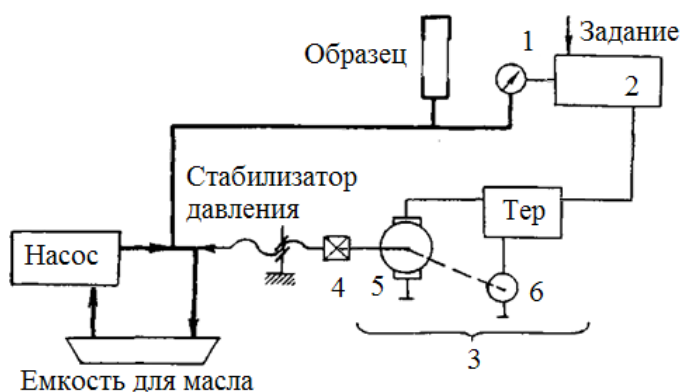


Рис. 3. Схема стабилизации давления

Система содержит масляный насос, емкость для масла и стабилизатор давления. Насос работает с постоянной производительностью. Подаваемое им масло через стабилизатор давления, который представляет собой подпружиненный клапан, возвращается в емкость. Давление масла в гидравлической системе зависит от силы, с которой давит на клапан пружина в стабилизаторе. Изменять давление можно поджимая или ослабляя пружину поджимным винтом. В машине ЦДМУ-30 давление устанавливают, вращая поджимной винт ручным маховиком. В этой системе установленное давление может со временем «уходить» от заданного значения из-за разогрева масла и некоторых других причин.

Диаграммы деформирования сплава АМг6. Диаграммы деформирования снимались на испытательной машине FPZ-100/1 в устройстве для создания внутреннего давления и растягивающего усилия в термошкафу. Температура испытания составляла +50 °С. Проведены две серии опытов: испытание на растяжение; испытание на внутреннее давление. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

Как видно из графиков, данный сплав обладает существенной начальной анизотропией механических свойств [2]. Основные механические характеристики при испытаниях на растяжение и внутреннее давление соответственно получились: модуль упругости $E = 6,944 \cdot 10^4$ МПа и $E = 7,495 \cdot 10^4$ МПа; предел текучести $\sigma_{0,2} = 192$ МПа и $\sigma_{0,2} = 168$ МПа. Разница по пределу текучести составляет 13 %.

Результаты экспериментального исследования ползучести. Испытания программировались по напряжениям и проведены при повышенной температуре (+50°). Осуществлены следующие программы простого нагружения при различных значениях $k = \sigma_1/\sigma_2 = 0; 1; \infty$ (σ_1, σ_2 – нормальные напряжения в направлении осей x и y соответственно). Во всех опытах

соблюдалось условие $\sigma_i = 0,7 \cdot \sigma_{0,2} = \text{const}$. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ в виду анизотропии свойств сплава АМг6 принимался средним по испытаниям на растяжение и внутреннее давление. На рис. 5 представлены усредненные кривые ползучести (по каждой программе испытывались по три образца).

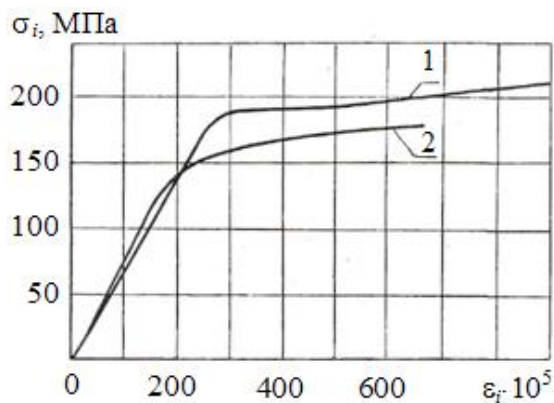


Рис. 4. Диаграммы деформирования сплава АМг6:

- 1 – испытание на растяжение;
2 – испытание на внутреннее давление

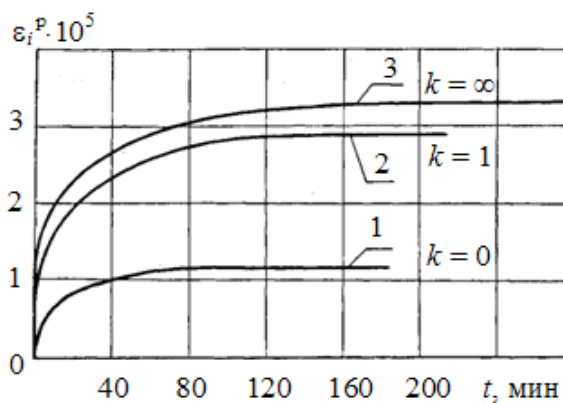


Рис. 5. Результаты испытаний на ползучесть:

- 1 – при одноосном растяжении;
2 – на совместное действие;
3 – на внутреннее давление

Наибольшая деформация ползучести наблюдается при испытаниях на внутреннее давление (кривая 3) и наименьшая – при одноосном растяжении (кривая 1). Промежуточное положение занимает кривая 2, соответствующая испытаниям на совместное действие растягивающей силы и внутреннего давления при условии, что в процессе опыта $k = 1$.

Библиографический список

1. Зубчанинов, В.Г. Модернизация испытательной машины FPZ/100 для исследования кратковременной ползучести / В.Г. Зубчанинов, В.В. Гараников, Ю.А. Котенков // Заводская лаборатория. 1991. № 2. С. 65–66.
2. Гараников, В.В. Экспериментальная пластичность: монография. Книга 2: Процессы сложного нагружения / В.В. Гараников, В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков. Тверь: ТГТУ, 2004. 184 с.

УДК 621.892

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков
Тверской государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Приведены результаты сравнительных трибоиспытаний износостойкости и объемной режущей способности алмазосодержащих материалов с матрицами различных типов. Установлены эксплуатационные преимущества разработанного алмазосодержащего материала с керамической матрицей перед традиционными материалами. Пред-

ложено применять алмазосодержащий керамический материал для прецизионной обработки сверхтвердых материалов.

Ключевые слова: алмазосодержащий керамический материал, прецизионное шлифование, абразивный инструмент, трение, износ.

THE RESEARCH OF TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF DIAMOND-CONTAINING CERAMIC MATERIAL

The results of comparative tribological tests of wear resistance and bulk cutting ability of diamond-containing materials with matrices of various types are presented. The operational advantages of the developed diamond-containing material with a ceramic matrix over traditional materials are established. It is proposed to use diamond-containing ceramic material for the precision processing of superhard materials.

Key words: diamond-containing ceramic material, precision grinding, abrasive tools, friction, wear.

В последние годы область применения алмазно-абразивных материалов, значительно расширилась, что в основном обусловлено разработкой и внедрением новых видов связующих матриц, в которые встраиваются зерна алмазов [1, 2]. Промышленностью изготавливаются инструменты с тремя видами связок: металлические, керамические, и органические, в которые, в зависимости от назначения, вводятся порошковые наполнители из графита, меди, глинозема, электрокорунда или карбида бора [3–5]. Каждый из применяемых материалов имеет свои преимущества, и недостатки. Для достижения высоких технико-экономических показателей абразивной обработки необходимо правильно определить оптимальную область применения каждого инструментального материала [1–6].

Проведенные нами эксперименты позволили получить новый триботехнический алмазосодержащий керамический материал (АКМ) [7, 8], который, как предполагается, должен обладать качественно более высокими фрикционными характеристиками по сравнению с известными материалами. Основной рабочий слой материала формируется методом микродугового оксидирования (МДО) на поверхности спеченной алмазно-алюминиевой заготовки в виде керамического покрытия толщиной до 1,5 мм с дисперсными включениями металлизированного медью алмаза. В связи с этими особенностями материала должна быть определена область его оптимального использования.

Целью настоящего исследования является сравнительная оценка износостойкости и объемной режущей способности АКМ и выработка рекомендаций по его рациональному применению в промышленности.

Используемые материалы и оборудование. Для проведения сравнительных триботехнических испытаний были использованы образцы АКМ, изготовленные методом МДО спеченных заготовок из алмазно-алюминиевой смеси [9]. Концентрация алмазов K в композиционном материале определялась их массовой долей и составляла от 25 % до 150 %.

Зернистость алмазных зерен d варьировалась от 63/50 до 125/100. Образцы АКМ изготавливались в виде стандартных шлифовальных кругов прямого профиля, имеющих форму плоских дисков с алмазосодержащим керамическим слоем на торце.

Триботехнические характеристики испытываемых материалов сравнивались со стандартными алмазосодержащими абразивными кругами на металлической М1 и органической Б1 связке. Испытания проводились на машине трения МТ-2 [10], реализующей схему палец-кольцо. Давление в зоне контакта меняется от 0 до 6 МПа, линейная скорость скольжения 0,1...36 м/с. Величина силы трения лимитировалась значением 50 Н и определялась с погрешностью 2 %. Конструкция машины МТ-2 позволяет применять любые виды смазочных материалов. Виды смазочных материалов выбраны для обеспечения оптимальных режущих свойств абразивных инструментов. Для алмазосодержащих материалов на керамической и органической матрицах в качестве смазки использовалась техническая вода, для металлической матрицы – электролит. Материалом контробразца была выбрана керамика состава BaO-SiO₂-Al₂O₃ (микротвердость $H_{\mu} = 16$ ГПа).

Износ исследуемого образца и контробразца измерялся на лабораторных весах по массе с точностью до 0,005 г. Предварительно образцы подвергались сушке при температуре 200 °С в течение 15...18 мин для удаления влаги, находящейся в материале.

Износостойкость J_a алмазосодержащего композиционного керамического материала определялась как отношение массы алмазов, находившихся в изношенном алмазоносном слое, к массе изношенного материала контртела. Объемная режущая способность исследуемых материалов J_k рассчитывалась как отношение объема изношенного материала контртела к длительности процесса и измерялось в см³/мин.

Металлографические исследования структуры алмазосодержащих керамических материалов проводили с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT.

Результаты сравнительных триботехнических испытаний АКМ. Установлено, что износостойкость алмазосодержащего композиционного материала с керамической матрицей на основе оксида алюминия значительно выше традиционных аналогов при аналогичных условиях трения (рис. 1). Значительную роль в повышении износостойкости АКМ сыграло увеличение твердости матрицы, которая для Al₂O₃ сопоставима с твердостью алмаза и контробразца. Снижение расхода алмазов при применении АКМ, положительно скажется на технико-экономических показателях абразивной обработки.

Объемная режущая способность контробразца для АКМ практически не снижается на всем пути трения (рис. 2). Образцы алмазосодержащих материалов на органической и металлической связке снижают работоспособность примерно в 1,8–2,6 раза уже на половине пути трения и в 2,6–6,7

раз в конце испытаний. Для поддержания изначальной работоспособности абразивным инструментам из традиционных материалов необходима периодическая правка, которая удаляет засаленность инструмента частицами износа, обнажает новые режущие зерна алмаза, но одновременно уменьшает толщину алмазостного слоя. Для предлагаемого материала с керамической матрицей правка не требуется, что можно объяснить наличием достаточного количества пор в структуре материала для размещения стружки, более значительным вылетом алмазных зерен из поверхности и реализацией режима самозатачивания для АКМ.

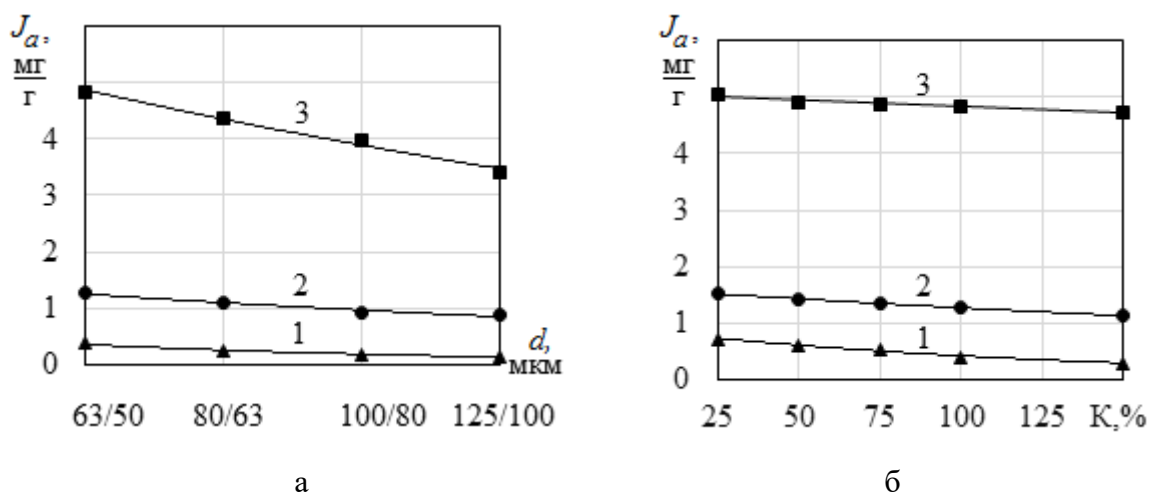


Рис. 1. Износостойкость АКМ с матрицами различных типов:
а – влияние зернистости ($K = 100\%$); б – влияние концентрации алмазов ($d = 63/50$).
1 – керамическая матрица; 2 – матрица М1; 3 – матрица Б1

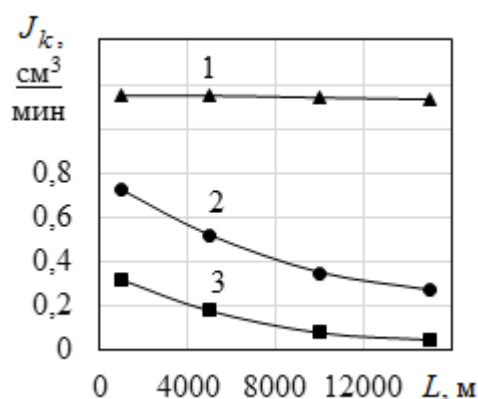


Рис. 2. Зависимость интенсивности объемного износа контробразца от пути трения:
1 – АКМ со связкой на оксидной керамике;
2 – АКМ с металлической связкой;
3 – АКМ с органической связкой

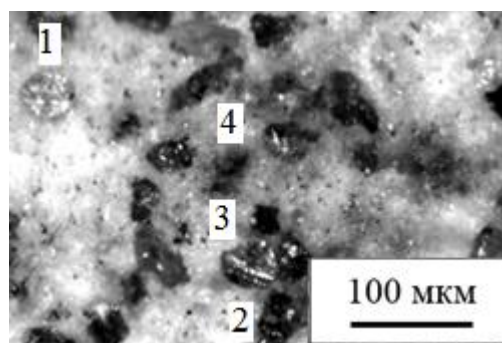


Рис. 3. Расположение дисперсных частиц алмаза $d = 63/50$, концентрацией 100 % и степенью металлизации 75 % [9] в керамической матрице объемной плотностью 85 %

Данные предположения подтверждаются анализом морфологии поверхности АКМ (см. рис. 3), где показаны особенности состояний и расположения алмазных зерен в керамической матрице. Отдельные зерна после процесса микроплазменного оксидирования остаются не подверженными

меднению (1), в отличие от алмазов (2) – (4). Зерна (1) и (3) практически не утоплены в матрицу, однако прочно удерживаются в ней после шлифования образца. Часть алмазов расположены глубже в материале связки (4). Видны четкие режущие грани алмазных зерен.

Заключение. Установленные высокие триботехнические характеристики разработанного алмазосодержащего материала с керамической матрицей показали его эксплуатационные преимущества перед материалами с органической и металлической матрицами. Учитывая геометрические параметры формируемого методом МДО АКМ, его можно рекомендовать для производства абразивного режущего оборудования, применяемого при прецизионной обработке сверхтвердых материалов, в электронной, ювелирной и часовой промышленности, в точном приборостроении. Экологическая чистота АКМ дает возможность применять его в медицине при заточке ножей микротомов, скальпелей и инъекционных игл, а также для лечения и протезировании зубов в стоматологии.

Библиографический список

1. Богатырева, Г.П. Инструменты из сверхтвердых материалов / Г.П. Богатырева, В.В. Бурыйкин, В.В. Гаргин. М.: Машиностроение, 2014. 608 с.
2. Кондратенко, В.С. Новая технология обработки металлических деталей для оптического приборостроения связанным алмазно-абразивным инструментом / В.С. Кондратенко, А.В.Бобков // Приборы. 2007. № 12 (90). С. 47–50.
3. Судник, Л.В. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты / Л.В.Судник, П.А.Витязь, А.Ф. Ильющенко. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.
4. Sachsel, H.G. Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi Superabrasive and Superabrasive / H.G. Sachsel. Xlibris Corp., 2010. 680 p.
5. Витязь, П.А. Синтез и применение наноструктурных сверхтвердых материалов инструментального назначения / П.А. Витязь, В.Т. Сенюць // Весці нацыянальнай акадэміі навук беларусі. серыя фізіка-тэхнічных навук, 2015. № 3. С. 60–76.
6. Болотов, А.Н. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2018. № 10. С. 150–158.
7. Болотов, А.Н. Применение микродугового оксидирования для получения керамического алмазосодержащего материала / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 3. С. 13–16.
8. Болотов, А.Н. Интенсификация формирования износостойкого керамического покрытия на алюминии и его сплавах / / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // Вестник Тверского государственного технического университета. 2013. № 1 (23). С. 60–62.
9. Болотов А.Н. Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2019. № 12. С. 80–87.
10. Болотов, А.Н. Зависимость износа пары трения композиционный алмазосодержащий материал – керамика / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ. 2017. № 10. С. 153–157.

УДК 539.37

А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова
Тверской государственной технической университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ TiN НА ДЕФОРМАЦИЮ В ЛОКАЛЬНОМ СТАТИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ

Описаны результаты сравнительных экспериментальных исследований деформации в статическом контакте сферического индентора с плоской поверхностью металлических образцов без покрытия и с защитным износостойким нитрид-титановым покрытием. Эксперименты проводили на приборе для измерения контактных деформаций по методике, аналогичной методике Н.Б. Демкина. Показано, что в исследованных условиях наличие нитрид-титанового покрытия толщиной 6,5 мкм не оказывает существенного влияния на величину деформации в контакте.

Ключевые слова: упругий контакт, сближение, защитное покрытие, контактная жесткость, герметичность.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF TiN PROTECTIVE COATING ON DEFORMATION IN A LOCAL STATIC CONTACT

The results of comparative experimental studies of deformation in the static contact of a spherical indenter with the flat surface of metal samples without coating and with a protective wear-resistant titanium nitride coating are described. The experiments were carried out on a device for contact deformation measuring according to a technique similar to that of N.B. Demkin. It is shown that, under the studied conditions, the presence of a titanium nitride coating with a thickness of 6.5 μm does not significantly affect the contact deformation.

Keywords: elastic contact, approach, protective coating, contact stiffness, vacuum sealing.

Надежность работы клапанных уплотнительных устройств в основном определяется процессами, протекающими при контактном взаимодействии их рабочих органов. Уплотнения затворов типа «металл-металл» позволяют обеспечивать эффективную функционирование в условиях высоких температур и давлений и при наличии агрессивных сред. Работа в экстремальных условиях – динамические циклические нагрузки, вибрации и микросдвиги – приводят к интенсификации процессов эрозии, усталостного и коррозионного разрушения, и, как следствие, к интенсивному износу рабочих поверхностей уплотнений, что обычно является причиной потери герметичности системы в целом. Задача повышения надежности клапанных устройств приводит к необходимости обеспечения противоречивых требований, предъявляемых к характеристикам контактных поверхностей их рабочих узлов. С одной стороны, это высокие прочностные характеристики, высокая механическая и эрозионная износостойкость, малая склонность к схватыванию, низкий коэффициент трения. С другой стороны, высокая контактная податливость (малая жесткость) и хорошая прира-

бываемость рабочих поверхностей, что необходимо для обеспечения герметичности соединения, то есть минимального зазора в контакте. Распространенным способом решения такого типа задач является модификация контактирующих поверхностей путем нанесения различными методами защитных покрытий с требуемым комплексом эксплуатационных свойств. Современным эффективным направлением в области создания покрытий с заданными свойствами, в том числе многофункциональных, является технология ионно-плазменного осаждения в вакууме методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ). Метод позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики деталей [1, 2] путем нанесения на рабочие поверхности тонких твердых, износостойких и эрозиястойких покрытий на основе как чистых химических элементов, так и их соединений.

Цель данной работы – путем прямого сравнительного эксперимента исследовать, как повлияет нанесение ионно-плазменного покрытия на жесткость статического контакта при нормальном нагружении. Деформация контакта (сближение контактирующих поверхностей) является одним из основных параметров, характеризующих процессы, происходящие при контактировании тел, и напрямую связанных с герметичностью контакта [3]. Также результаты экспериментов могут быть полезными при рассмотрении других контактных задач. Например, от контактной жесткости во многом зависит прочность неподвижных посадок и общая жесткость узлов машин, имеющих стыковые соединения, например, шарниров.

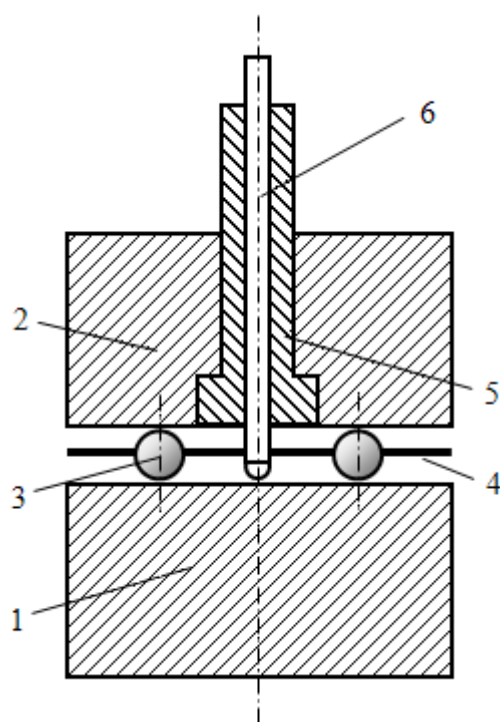


Рис. 1. Принципиальная схема измерения сближения в контакте шар – плоскость

Образцы и методика экспериментов. Для изучения влияния покрытия на процесс контактирования были проведены эксперименты по определению зависимости величины сближения от нормальной нагрузки при внедрении шара в номинально плоскую поверхность стальных образцов: в одном случае без покрытия, в другом случае – с покрытием TiN. Измерение контактной деформации, вследствие ее малости, представляет довольно сложную задачу. В эксперименте был использован прибор и методика измерения, разработанные Н.Б. Демкиным для измерения контактных деформаций плоских шероховатых поверхностей [4]. Принципиальная схема измерения показана на рис. 1.

Между плоскими торцевыми поверхностями двух цилиндрических образцов 1 и 2 размещены на равном угловом расстоянии три шарика 3 из стали ШХ-15 диаметром 8 мм, заключенные в оправку (сепаратор) 4. Верхний образец 2 имеет в центре осевой цилиндрический канал с пазом вблизи нижней торцевой поверхности. В канал вставлена трубка с фланцем 5, которая с натягом прижата к поверхности паза и является основанием для корпуса индикатора малых перемещений (на рис. 1 не показан). Через трубку пропущен толкатель 6, который одним концом упирается в верхнюю торцевую поверхность нижнего образца 1, а другим – в подвижный шток индикатора малых перемещений.

Главным преимуществом описанной схемы является принципиальное исключение из результатов измерений погрешностей, которые могут давать деформации деталей прибора, их соединений, а также упругие объемные деформации самих образцов. Нагрузку контакта осуществляли гириями через рычажную систему и дополнительно контролировали по образцовому динамометру. Величину сближения отсчитывали по шкале индикатора малых перемещений с точностью 0,02 мкм. При этом прироста сближения с увеличением времени контактирования под нагрузкой практически не наблюдали. Предварительно метод был проверен на стабильность показаний, для чего многократно замерялось упругое сближение одной и той же пары образцов с полированными поверхностями. Погрешность измерений не превышала 2...3 %.

Цилиндрические образцы были изготовлены из инструментальной стали. Торцевые поверхности образцов были обработаны шлифованием. В процессе эксперимента вначале исследовали внедрение шаровых инденторов в торцевую поверхность стальных образцов. Затем были проведены сравнительные измерения сближения при внедрении шаровых инденторов в поверхность аналогичных образцов с нитрид-титановым покрытием (TiN). Ионное напыление покрытия проводили на серийной установке «Булат» методом КИБ [1]. Толщина покрытия – 6,5 мкм. Поверхность покрытия имела приблизительно ту же шероховатость, что и поверхность шлифованного стального образца. Измерения проводили при нормальных нагрузках от 10 до 250 Н в расчете на один шаровой индентор.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Результаты экспериментов по измерению величины сближения в контакте шар – плоскость для образцов без покрытия и образцов с покрытием представлены на рис. 2 в виде графика зависимости величины сближения контактирующих тел от величины нормальной нагрузки.

На этом же графике для сравнения показана теоретическая зависимость сближения δ от нормальной нагрузки N , рассчитанная по классической формуле Г. Герца для случая абсолютно упругого контакта сферического индентора с упругим полупространством [4]:

$$\delta = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{N}{E^* r^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где $E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$ – эквивалентный модуль Юнга; E_1 , E_2 и μ_1 , μ_2 – модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих тел; r – радиус шарового индентора.

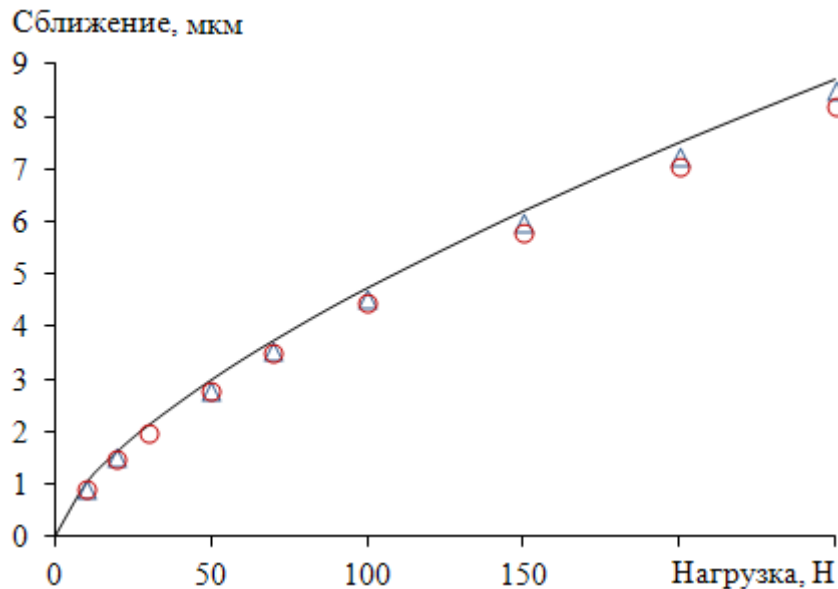


Рис. 2. Зависимость величины сближения в контакте шар – плоскость от нормальной нагрузки. Точки – экспериментальные значения: Δ – стальной образец без покрытия; \circ – образец с нитрид-титановым покрытием; линия – расчет по формуле Герца для контакта сталь/сталь без покрытия

Как видно из рис. 2, величина сближения в контакте шарового индентора с плоским образцом, имеющим покрытие TiN, несколько меньше, чем в контакте с образцом без покрытия, и различие становится более значительным с увеличением нагрузки, но не превышает 2,0...3,5 % в исследованном диапазоне нагрузок. Хорошее совпадение экспериментально измеренных величин сближения с расчетными по формуле Г. Герца, полученной для контакта упругих тел, свидетельствует о практически полностью упругой деформации контакта, к тому же упругие постоянные образца с покрытием незначительно отличаются от упругих постоянных стального образца. Тем не менее, с увеличением нормальной нагрузки, очевидно, начинают возникать небольшие пластические деформации в контакте, чем объясняется превышение расчетных величин сближения над экспериментальными.

Заключение. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что присутствие на поверхности стального образца защитного нитрид-титанового покрытия толщиной 6,5 мкм привело лишь к незначительному уменьшению величины сближения в контакте. Таким образом, можно считать, что данное покрытие несущественно влияет на кон-

тактную жесткость и, следовательно, герметичность контакта, при этом существенно повышая механическую и коррозионно-механическую износостойкость деталей.

Библиографический список

1. Аксенов, И.И. Вакуумно-дуговые покрытия: технологии, материалы, структура, свойства / И.И. Аксенов [и др.]. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2015. 370 с.
2. Гусев, А.Ф. Ионно-плазменное покрытие для повышения износостойкости поверхностей электрических контактов / А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь, 2009. Вып. 2. С. 129–130.
3. Демкин, Н.Б. Качество поверхностей и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
4. Попов, В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В.Л. Попов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.

УДК 621.891

М.М. Матлин, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин
Волгоградский государственный технический университет

ОБЗОР МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Описаны неразрушающие методы определения прочностных и упругих свойств материалов по результатам индентирования.

Ключевые слова: индентор, предел текучести, временное сопротивление, истинное сопротивление разрыву, модуль нормальной упругости.

REVIEW OF NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR THE CONTROL OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS OF TRIBOLOGICAL JOINTS PARTS

Nondestructive methods to determine the strength and elastic properties of materials are described. These methods are based on the results of indentation.

Key words: indenter, yield strength, tensile strength, true tensile strength, normal elastic modulus.

Для расчетов коэффициента трения и интенсивности изнашивания необходимо располагать данными об упругих и прочностных свойствах материалов контактирующих деталей [1]. Традиционные методы определения прочности металла предусматривают отбор проб и последующие испытания образцов, например, на растяжение [2] Эти методы требуют частичного или полного нарушения целостности детали и весьма трудоемки. Согласно национальному стандарту РФ (ГОСТ-Р 56542-2015) неразрушающий контроль в зависимости от физических явлений, положенных в его

основу, подразделяют на следующие виды: акустический, виброакустический, вихретоковый, магнитный, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический и др. Следует подчеркнуть, что эти методы оценивают объемные свойства материала. Для определения прочности материала на поверхности детали широкое распространение получили неразрушающие методы определения прочностных свойств по результатам измерения твердости [3–12].

Основа таких методов была заложена в работах Н.Н. Давиденкова, С.Е. Беляева, М.П. Марковца, А.Ю. Ишлинского. Дальнейшее развитие эти методы получили в работах Ю.К. Абраменко, М.Б. Бакирова, В.А. Борисенко, И.Я. Завьялова, А.Е. Кубарева, В.М. Матюнина, О.В. Бакун, В. Horst, L. Brasche, H. Eckardt, M. Kobayashi, K. Sahachino, M. Sargent, E. Schmeling и др. Среди теоретических и экспериментальных исследований особое место принадлежит работам, в которых элементы упругопластической контактной задачи рассматриваются в связи с испытаниями на твердость. К таким исследованиям относятся работы П.О. Пашкова, Д.Б. Гогоберидзе, Г.П. Зайцева, М.П. Марковца, В.М. Матюнина, М.С. Дрозда, В.К. Григоровича, Ю.И. Славского, Д. Тейбора, К.Л. Джонсона, А.В. Крука, О'Нейля и многих других. В большинстве указанных работ изучаются также функциональные зависимости между твердостью и основными прочностными свойствами материалов.

Возможность определения предела текучести σ_T путем внедрения конуса с углом при вершине 90° показана в работе [13]: $\sigma_T = F / a_0^2$, где F – нагрузка; a_0 – радиус зоны распространения пластической деформации. В то же время граница этой зоны, как правило, нечеткая и поэтому измерение a_0 затруднено. В работе [14] в качестве индентора использована пирамида с углом между гранями 170° , что обеспечило деформацию в контакте, соответствующую условному пределу текучести: $\sigma_{0,2} = cF / d^2$, где c – коэффициент, равный 0,32...0,33; d – размер диагонали отпечатка. В работе [15] использован конус с углом при вершине 160° , при этом деформация в отпечатке 1,5 %, что, по мнению авторов указанной работы, приблизительно соответствует относительному сужению при растяжении на пределе текучести. Предлагается соотношение $\sigma_{0,2} = 0,2H_s$, где H_s – число твердости. В работе [16] показано, что наиболее целесообразно для определения предела текучести применять конус с углом при вершине 136° , поскольку получаемые при этом числа твердости совпадают с результатами измерения твердости HV с помощью пирамиды Виккерса (ГОСТ 2999-75). Для алюминиевых сплавов в работе [17] получена эмпирическая зависимость: $\sigma_{0,2} = 0,25HV$, а в работе [18] – $\sigma_{0,2} = HV / (3 \pm 0,1)$.

В ряде исследований на основе статистической обработки результатов испытаний на растяжение и твердости различных сталей получены эмпирические формулы, например, для стали 40ХН2МА [19]:

$\sigma_{0,2} = 56,8 + 31,7\text{HRC}$ а $\sigma_B = 113,8 + 30,4\text{HRC}$ где σ_B – временное сопротивление; HRC – твердость по Роквеллу.

В работе [20] для широкого круга конструкционных сталей также получены эмпирические формулы: $\sigma_{0,2} = 0,367\text{HB} - 240$ при $\text{HB} > 1\,500$ МПа и $\sigma_{0,2} = 0,2\text{HB}$ при $\text{HB} \leq 1\,500$ МПа; HB – твердость по Бринеллю.

В работе [21] на основе сопоставления напряжений в отпечатке при внедрении сферического индентора и напряжений при растяжении образца получена зависимость (без учета упрочнения материала) $\sigma_T = 0,383\text{HB}$.

В работе [22] с использованием закономерностей теории упругости получена зависимость для предела текучести $\sigma_T = 289(1 - 2\mu_2)^3 \sqrt{P_S E^2 / D^2 (1 - \mu_2^2)}$, где μ_2 и E_2 – коэффициент Пуассона и модуль упругости испытуемого материала; D – диаметр сферического индентора; P_S – условная критическая нагрузка. В связи со сложностью определения P_S предложены эмпирические формулы: $\sigma_T = 0,2\text{НД}$ и $\sigma_T = 0,182\text{НД}$ соответственно для углеродистых и легированных сталей; НД – пластическая твердость (ГОСТ 18835-73).

В работах [20, 23] предложено определять условный предел текучести по твердости по Бринеллю на пределе текучести $\text{HB}_{0,2}$: $\sigma_{0,2} = 0,05\text{HB}_{0,2}^{1,37}$. На этом методе основан ГОСТ 22762-77.

В большом количестве работ [например, 15, 20, 24, 25–29 и др.] показано, что временное сопротивление можно определить по следующей эмпирической формуле $\sigma_B = c \cdot \text{HB}$. Коэффициент c зависит от химического состава материала и изменяется в достаточно широких пределах; поэтому приведенная формула имеет частный характер.

В работе [30] найдена эмпирическая зависимость для ряда цветных сплавов $\sigma_B = \text{HV} / 3$.

Более обоснованным является метод, предложенный в работе [20], согласно которому временное сопротивление можно определить по значению максимальной твердости H_{\max} : $\sigma_B = 0,333H_{\max}$. Основанием для такого подхода служит то, что диаграммы растяжения и твердости похожи. Однако практическое определение H_{\max} , достаточно сложно, так как требует предварительного построения диаграммы твердости.

Испытание на твердость методом царапания инденторами различной формы позволяет довести до разрушения как хрупкий, так и пластичный материал. Это позволяет определять истинное сопротивление разрыву материала при растяжении [20, 31].

В последние годы получили развитие методы испытания путем непрерывного внедрения индентора с записью диаграммы нагружения [например, 20, 32–39 и др.] с последующим определением прочностных свойств.

В работах авторов также были предложены методы [40–42] определения условного предела текучести и временного сопротивления по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора. В работе [43] приведен метод определения истинного сопротивления разрыву по измеренным значениям остаточной и упругой частей полного сближения индентора, радиуса кривизны и истинного давления под нагрузкой на поверхности отпечатка. В работе [44] на основе закона упругой разгрузки разработан метод определения модуля нормальной упругости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00049, и при поддержке РФФИ и Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340002, а также в рамках конкурса СП-2018 (СП-253.2018.1)

Библиографический список

1. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М: Машиностроение, 1978. Кн. 1. 400 с.
2. ГОСТ 1497-84, ИСО 6892-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. Введ. 16.07.1984.
3. Абраменко, Ю.Е. О зависимости между твердостью и механическими свойствами гетерогенных конструкционных сплавов / Ю.Е. Абраменко // Заводская лаборатория. 1988. № 4. С. 86–90.
4. Бакиров, М.Б. Оценка предела текучести и деформационного упрочнения при различных режимах термообработки сталей типа 15Х2МФА по кривым внедрения жесткого сферического индентора / М.Б. Бакиров, Л.М. Левитан // Труды ЦНИИТМАШ. 1991. № 225. С.24–28.
5. Матюнин, В.М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов / В.М. Матюнин. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 288 с.
6. Чукин, М.В. Определение механических свойств высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей по твердости / М.В. Чукин [и др.] // Производство проката. 2016. № 12. С. 37–42.
7. Белослудцев, Т.Н. Оценка механических свойств основного металла и металла сварных соединений трубопроводов неразрушающим (безобразцовым) методом по измерению твердости / Т.Н. Белослудцев [и др.] // Территория «Нефтегаз». 2014. № 8. С. 36–40.
8. Сандомирский, С.Г. Обобщенные корреляционные зависимости между временным сопротивлением сталей и их твердостью / С.Г. Сандомирский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. № 11. С. 52–57.
9. Ma, Qing-yan. Study of the relation between tensile strength and hardness for low-carbon steel based on least squares support vector machine / Qing-yan Ma, Ya Zhang // Zhongbei daxue xuebao. Ziran kexue ban. J. N. University China National Science Education. 2016. № 3. P. 258–261, 278.
10. Ghosh, A. Investigating cube-corner indentation hardness and strength relationship under quasi-static and dynamic testing regimes / A. Ghosh [et al.] // Materials Science and Engineering A. 2016. № 677. P. 534–539.
11. Tiryakioglu, M. On the relationship between Vickers hardness and yield stress in Al-Zn-Mg-Cu Alloys / M. Tiryakioglu // Mater. Sci. and Eng. A. 2015. № 633. P. 17–19.

12. Каток, О.А. К определению механических характеристик сталей по результатам испытаний на твердость / О.А. Каток [и др.] // Проблемы прочности. 2014. № 6. С. 66–70, 163.
13. Tamman G., Muller W. // Zeitschrift fur Metallkunde. 1936. Bd. 28. № 3. S. 19–22.
14. Тихомиров, В.П. Двумерная модель неровностей поверхности твердых тел / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко // Трение и износ. 1986. № 3. С. 527–531.
15. Васаускас, С.С. Диаграмма твердости и ее применение для определения прочности материалов / С.С. Васаускас, В.Ю. Жидонис // Заводская лаборатория. 1962. № 5. С. 605–608.
16. Гудков, А.А. Методы измерения твердости металлов и сплавов / А.А. Гудков, Ю.И. Славский. М.: Металлургия, 1982. 168 с.
17. Головачев, М.Г. К определению зависимости между твердостью и характеристиками прочности алюминиевых сплавов / М.Г. Головачев, О.А. Голосов // Заводская лаборатория. 1991. № 4. С. 67–68.
18. Hawr, J.A. Yield Stress as Determined from Hardness for Mechanically Alloyed Aluminum Base Alloys / J.A. Hawr, R.E. Franck, H.G. Wilsdorf // Met. Trans. A. 1988. № 7-12. P. 2363–2366.
19. Калашников, В.А. Об устойчивости связи между механическими характеристиками и твердостью стали / В.А. Калашников, В.Ф. Кузнецов // Заводская лаборатория. 1982. № 6. С. 85–86.
20. Марковец, М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М.П. Марковец. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.
21. Ишлинский, А.Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бринелля / А.Ю. Ишлинский // Прикладная математика и механика. 1944. Вып 3. № 8. С. 201–223.
22. Дрозд, М.С. Определение механических свойств металла без разрушения / М.С. Дрозд. М.: Металлург, 1965. 171 с.
23. Марковец, М.П. Построение диаграмм истинных напряжений по твердости и технологической пробе / М.П. Марковец // Журнал технической физики. 1949. Вып 3. № 19. С. 371–382.
24. Золотаревский, В. С. Механические свойства металлов / В.С. Золотаревский. М.: МИСиС, 1998. 400 с.
25. Практические вопросы испытания металлов / Ред. О.П. Елютин, пер. с нем. М.: Металлургия, 1979. 280 с.
26. Шапошников, Н.А. Механические испытания металлов / Н.А. Шапошников. М.: Машгиз, 1954. 436 с.
27. Kobayashi, M. Relation Between Tensile Properties and Hardness of Steel Bolts / M. Kobayashi, M. Tanaki, K. Hongo // Reports Kogakuin University. 1990. № 58. P. 20–25.
28. Kogoh, S. Temperature Dependence of Tensile Strength and Hardness for Nodular Cast iron and Their Mutual Correlation / S. Kogoh, T. Sakai, K. Asami // Journal Material Science. 1992. V. 27. № 16. P. 4323–4328.
29. Marakami, Y., Yuan L.P. // Transaction of Japanese Society Mechanical Eng. A. 1991. V. 57. № 533. P. 162–169.
30. Zuhaasz, A. Mechanical Properties of Al-Zn-Mg Alloys Investigated by Microhardness Measurements / A. Zuhaasz, P. Tasnadi, I. Kovacs, T. Ungar // Journal Material Science. 1981. V. 16. № 2. P. 367–372.
31. Давиденков, Н.Н. Получение основных механических характеристик стали с помощью измерений твердости / Н.Н. Давиденков, С.Е. Беляев, М.П. Марковец // Заводская лаборатория. 1945. № 10. С. 964–973.

32. Астановский, Е.Г. Автоматизированная система исследования поверхностных свойств металлов и сплавов / Е.Г. Астановский [и др.] // Заводская лаборатория. 1989. V. 55. № 9. С. 83–85.
33. А.с. 1145273, МКИ⁴ G01N3/42. Способ определения механических характеристик материалов / М.П. Марковец, В.М. Шабанов; опубл. 15.03.85, Бюл. № 10.
34. Бульчев, С.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Бульчев, В.П. Алехин. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
35. Гетман, А.Ф. Новый прибор и методика для определения твердости и механических свойств материалов / А.Ф. Гетман, М.Б. Бакиров, И.А. Таборко // Методы и средства определения твердости материалов и изделий: сб. материалов Всесоюзн. науч.-техн. конф. Иваново, 1990. С. 136–142.
36. Мильман, Ю.В. Теория и методика определения предела текучести и пластичности материалов методом индентирования / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Актуальные проблемы прочности: сб. материалов Междун. науч.-техн. конф. Витебск, Беларусь, 2018. С. 58–60.
37. Gondi, P.A Multipurpose Hardness Test / P. Gondi, A. Sili // Z. Metallk. 1991. V. 82. № 5. P. 377–382.
38. Joslin, D.L. A New Method for Analyzing Aluminum Based Alloys / D.L. Joslin, W.C. Oliver // Met. Trans. A. 1988. V. 19. № 7-12. P. 2363–2366.
39. Underwood, J.H. Analysis of Elastic-plastic Ball Indentation to Measure Strength of High-strength Steels / J.H. Underwood, G.P. Ohara, J.J. Zalinka // Experimental. Mechanics. 1986. V. 26. № 4. P. 379–385.
40. Пат. № 2086947 Российская Федерация. Способ определения предела текучести материалов / Ю.И. Славский, М.М. Матлин; опубл. 10.08.1997, Бюл. № 22.
41. Пат. № 2011182 Российская Федерация. Способ определения предела прочности материала / Ю.И. Славский, М.М. Матлин; опубл. 10.08.1994, Бюл. № 7.
42. Матлин, М.М. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин: монография / М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 247 с.
43. Пат. 2680111 Российская Федерация. Способ определения истинного сопротивления разрыву / М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин; опубл. 15.02.2019, Бюл. № 5.
44. А.с. 1147951 СССР, МКИ⁴ G01N3/42. Способ определения физико-механических свойств материала / М. С. Дрозд, М. М. Матлин; опубл. 30.03.85, Бюл. № 12.

УДК 621.91.01

С.П. Рыков, В.В. Мешков, В.В. Кузьминский
Тверской государственный технический университет

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ

Описана многослойная композиционная структура серийно выпускаемых жидкокристаллических (ЖК)–матриц. Предложен маршрут обработки (разрезки) ЖК–матриц в условиях единичного производства без потери их эксплуатационных качеств. Оптимизированы технологические параметры и проведены натурные испытания матриц для жидкокристаллических дисплеев.

Ключевые слова: ЖК-матрица, многослойная структура, технологические параметры, испытание.

LIQUID CRYSTAL MATRIX PROCESSING TECHNOLOGY

The multilayer composite structure of commercially available liquid crystal (LCD) matrices is described. The route of processing (cutting) of LCD matrix under the conditions of individual production without loss of service quality is proposed. Technological parameters were optimized and full-scale tests of matrices for liquid crystal displays were carried out.

Keywords: LCD-matrix, multilayer structure, technological parameters, test.

Для отображения графической или текстовой информации с электронных устройств (телевизоров, компьютеров, приборных панелей, рекламных вывесок) используются дисплеи на базе серийно выпускаемых ЖК-матриц [1, 2]. ЖК-матрица (рис. 1) представляет собой плоскопанельное электронно-оптическое устройство, которое использует светомодулирующие свойства жидких кристаллических веществ. Оно имеет, как правило, прямоугольную форму и многослойную композиционную структуру.

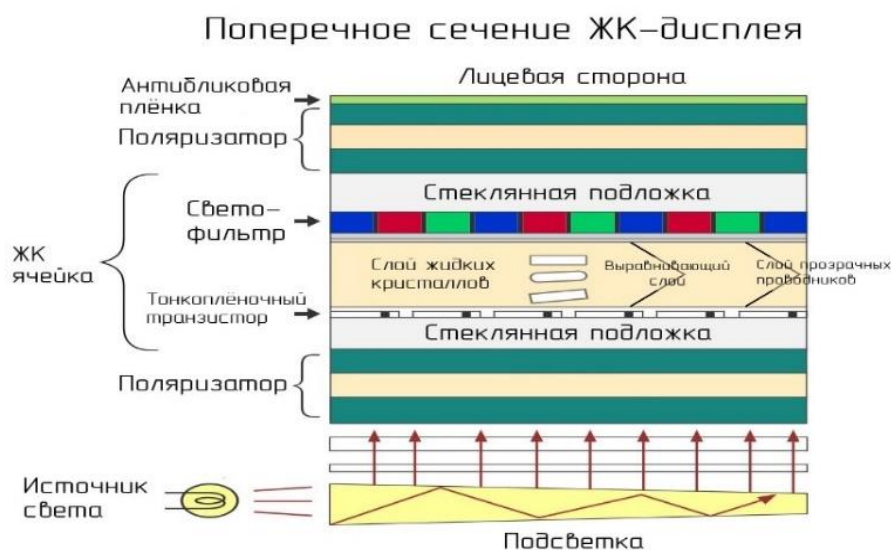


Рис. 1. Схема структуры ЖК-матрицы

Для специализированного применения в приборостроении, на транспорте, в авиастроении, торговле (информация и реклама), где востребован широкоформатный стиль экрана, в условиях единичного производства стоит задача изготовления из серийных дисплеев образцов с измененными габаритными размерами и геометрической формой, в частности, путем их разрезки.

Цель исследования – разработка технологии и оптимизация параметров технологических операций обработки (резки) ЖК-матриц в условиях единичного производства.

Материалы, методы и результаты обработки. Многослойная композиционная структура ЖК-матриц усложняет технологический процесс их разделения на части. Матрица состоит как минимум из двух полимерных пленок толщиной 0,1...0,2 мм, двух стекол толщиной 0,7 мм и медной токопроводящей сетки (диаметр проволоочек около 0,2 мм) в качестве управляющих электродов между ними. Ячейки сетки заполнены жидкокристаллическими веществами.

Технология обработки ЖК-матриц в настоящее время изучена недостаточно и требует новых решений [3–6]. В настоящей работе для обработки ЖК-матриц использован ряд приемов, включающих механическую обработку и воздействие лазерным лучом. Рассмотрим и проанализируем каждый из них.

Процесс **отделения полимерных пленок** (в виде полосок шириной 10 мм (рис. 2) заключался в прорезке пленки скальпелем в двух местах, поддевании полоски пластиковой лопаткой и отделения ее от стекла. Остатки специального вязкого клея удалялись растворителем Нефрас С4-155/200, после чего поверхность обезжиривалась изопропанолом.



Рис. 2. ЖК-матрица с отделенными полимерными пленками

Следует заметить, что ручное отделение полимерной пленки трудоемко, длительно по времени и далеко необязательно как самостоятельная операция.

При фрезеровании (прорезке) стекла с двух сторон, для получения V-образных канавок, матрица подвергалась обработке на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ. Она размещалась на столе (рис. 3а) между двумя торцевым упорами и фиксировалась весом стальных плит с обеих сторон от места реза. Одна из прижимных плит имела заостренную сторону (фаску), что позволяло устанавливать ее ближе к кромке реза. Для исключения неравномерности прижима и повреждения экрана между столом и матрицей, а также между матрицей и прижимной пластиной прокладывались тонкие силиконовые листы.

В качестве режущего инструмента использовался алмазный конический гравер с углом конуса 70° и радиусом скругления при вершине 0,2 мм (рис. 3б).

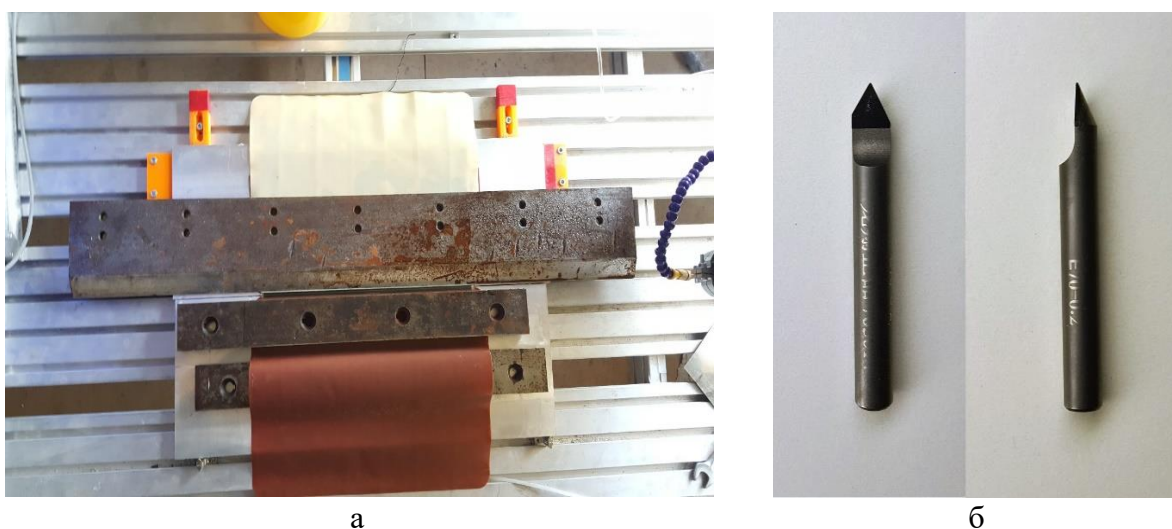


Рис. 3. Обработка матрицы: а – крепление матрицы на столе станка с ЧПУ; б – алмазный конический гравер

Формообразование V-образной канавки (рис. 4) шириной 0,3 мм осуществлялось послойно на проход при глубине резания 0,05 мм. Для обеспечения удовлетворительного качества обработанной поверхности и исключения сколов стекла обработка велась при скорости вращения шпинделя 25 000 об/мин и величине подачи 350 мм/мин. Последний слой (оставшиеся два прохода) обрабатывался при сниженной величине подачи до 200 мм/мин. Аналогично выполнялась совместная обработка слоев из полимерных пленок и стекла до глубины 0,4 мм без нарушения герметичности матрицы. Для удаления отходов резания и охлаждения в зону резания подавалась струя водяного тумана.

Станок с ЧПУ на данной операции обеспечивал точное позиционирование и точное перемещение инструмента в линию симметрии V-образного реза при множественных проходах, а также обеспечивал фасонную траекторию перемещения режущего инструмента.

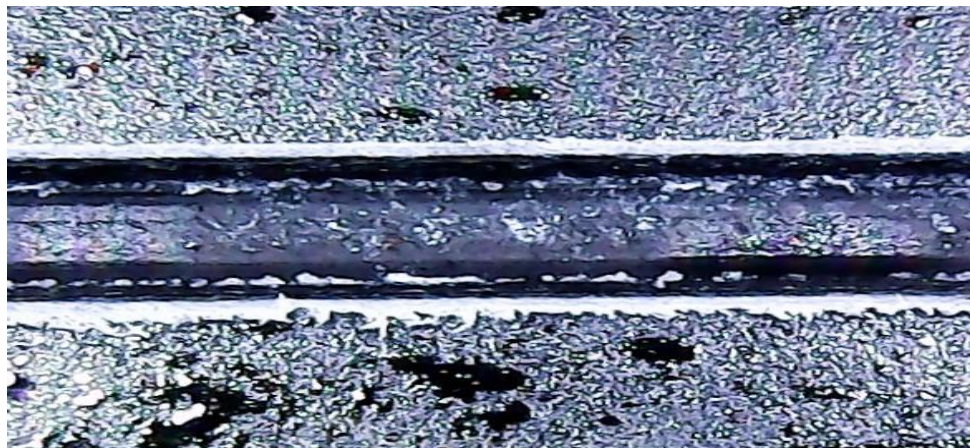


Рис. 4. V-образные канавки после обработки гравером

Отрезка металлических электродов осуществлялась **лазерным лучом**. При разрезании металлической токопроводящей сетки, находящейся между стеклами и залитой жидкокристаллическим веществом, не допускается смещение и вытягивание медных проволочек-электродов, а также формирование на поверхности реза медных пленок, образующихся при высокой температуре в зоне резания. Поэтому использование классических методов для резки стекла с металлическими электродами и жидкокристаллическим веществом невозможно.

Резание медной сетки выполнялась лучом импульсного волоконного лазера модели MFPT-30 (мощностью 30 Вт и длиной волны 1 064 нм) с фокусной линзой Meniscus (диаметр луча 6...9 мм, фокусное расстояние 101 мм). Обработка выполнялась за два прохода для гарантированной отрезки проволочек медной сетки и исключения возможности локального перегрева торцов медных проволочек. Матрица не переустанавливалась с операции фрезерования, что позволило исключить влияние погрешности базирования. Режимы работы лазера выбирались согласно рекомендациям производителя: скорость подачи 300 мм/мин, частота 30 КГц, продолжительность Q-импульса 100 нс. Слой стекла практически полностью прозрачен для данной волны излучения лазера, поэтому влиянием непосредственно луча на стекла можно пренебречь.

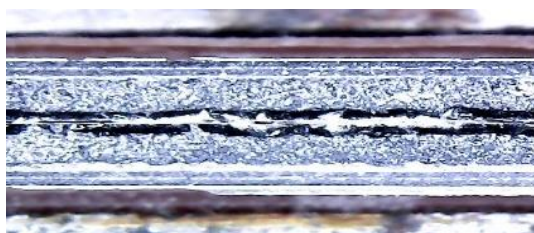
При увеличении скорости резания возникали дефекты резки, которые делали невозможным последующее разделение частей матрицы без повреждений. При снижении скорости резания возникает локальный перегрев композиционного материала из-за плавления и, возможно, кипения меди в слое между стеклами, который вызывает повреждение стекол, расслоение материала с нарушением структуры и образование пор в слое, содержащем жидкокристаллическое вещество.

Отделение надрезанной части матрицы осуществлялось вручную. При соблюдении описанной технологии линия излома частей матрицы получается ровной (без сколов) и отделяется при незначительных физических усилиях (рис. 5).

Партия из 25 образцов ЖК-дисплеев с диагональю 17 дюймов, обработанных по описанной технологии, подвергалась промежуточному контролю. Во время пробного включения для некоторых обработанных матриц был выявлен дефект появления цветных полос на изображении, перпендикулярных направлению реза (рис. 6а). Установлено, что причиной этого являлось замыкание направляющих электродов из-за их деформации и оплавления на операции обработки лазерным лучом. Для устранения этого дефекта была добавлена операция **шлифования торца кромки по линии разделения**.



Рис. 5. Разделение частей матрицы



а



б



в



г

Рис. 6. Результаты дефектоскопии изображения (б, г) в зависимости от качества обработки V-образных торцов кромки (а, в): а, б – до шлифования; в, г – после шлифования

Шлифование осуществлялось гибким абразивным кругом диаметром 125 мм с зернистостью P220 при скорости вращения шпинделя 2 000 об/мин с медленной и равномерной подачей. Установлено, что увеличение зернистости круга повышало производительность, однако, появлялись сколы и трещины, ухудшающие функциональные свойства матрицы. Снижение зернистости значительно увеличивало время обработки и добавляло

необходимость постоянной очистки места реза и шлифовального круга сжатым воздухом от частиц матрицы и круга.

Герметизация кромок матрицы необходима для исключения попадания влаги и воздуха в зазор между стеклами, их надежной фиксации и исключения замыкания электродов. Герметизация осуществлялась диэлектрическими клеями: эпоксидной смолой и термопластичным клеем.

Термопластичный клей, наносимый пистолетом с электронагревом, технологичен, обеспечивал необходимые герметизацию и степень фиксации, но объем шва получался значительным, что увеличивало общую толщину матрицы и затрудняло ее монтаж в рабочий корпус дисплея.

Клей на основе эпоксидной смолы так же обеспечивал надежную фиксацию всех слоев матрицы, но при этом слой клея имел значительно меньшую толщину. Это явилось существенным преимуществом при окончательном выборе клея, несмотря на его высокую текучесть и большую трудоемкость.

К недостаткам предложенной технологии можно отнести невозможность выполнения одноступенчатого процесса резки лазерным лучом и наличие ручных операций.

Заключение. Разработан и оптимизирован маршрутный технологический процесс обработки (разрезки) ЖК-матриц, состоящий из следующих операций:

- совместное фрезерование (прорезка) слоев из полимерных пленок и стекла с двух сторон матрицы с сохранением герметичности;
- отрезка металлических электродов лазерным лучом;
- отделение надрезанной части матрицы;
- шлифование торца V-образной кромки реза;
- герметизация кромок.

К преимуществам предложенной технологии относятся, возможность разделения матрицы на части не только по прямой, но и по кривой линии.

Перспектива улучшения технологии подтверждена положительным результатом оценки изображения на ЖК-матрицах при натуральных испытаниях партии дисплеев.

В дальнейшем целесообразно изучить возможность применения более мощных лазерных лучей для одновременной резки всех составляющих слоев ЖК матрицы, а также исключить или автоматизировать ручные операции. Это повысит качество кромки реза, сократит процесс обработки и, как следствие, повысит экономическую рентабельность единичного производства.

Библиографический список

1. Гаврилюк, Д. Дисплеи на основе жидких кристаллов / Д. Гаврилюк // Рынок микроэлектроники/ 2018. URL: <http://www.gaw.ru/html.cgi/adv/publ/lcd/oled.htm>
2. Самарин, А.В. Жидкокристаллический дисплей. Схемотехника, конструкция и применение / А.В. Самарин. М.: СОЛОН-Р, 2010. 304 с.

3. Вудс, С. Волоконные лазеры средней мощности и их применение / С. Вудс [и др.] // Фотоника. 2008. № 4. С. 6–10.
4. Laser glass cutting in flat panel display production // Industrial laser solutions. 2008. URL: <https://www.industrial-lasers.com/cutting/article/16487813/laser-glass-cutting-in-flat-panel-display-production>
5. Кирсанов С.В. Режущий инструмент: учебник для вузов / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов. М.: Машиностроение, 2005. 528 с.
6. Пат. 2318228 Российская Федерация. Способ изменения размеров жидкокристаллической ячейки / М.Х. Абдулаев [и др.]; заявл. 12.07.2006; опубл. 27.02.2008, Бюл. № 6.

УДК 630.377

С.А. Войнаш, В.А. Соколова, В.А. Марков,
А.В. Чураков, Г.К. Парфенопуло
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический
университет имени С.М.Кирова

АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ МОТОРНО-ТРАНСМИССИОННОЙ УСТАНОВКИ КОЛЕСНОГО ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО ТРАКТОРА

Проведен анализ собственных частот моторно-трансмиссионной установки колесного лесопромышленного трактора. Результаты данного анализа позволяют выявить резонансные зоны работы моторно-трансмиссионной установки колесного лесопромышленного трактора. Определение собственных частот моторно-трансмиссионной установки осуществлялось на основе разработанной математической модели. Полученная информация позволяет произвести выбор оптимальных конструктивных параметров для работы моторно-трансмиссионной установки колесного лесопромышленного трактора в безрезонансном режиме.

Ключевые слова: колесный лесопромышленный трактор, моторно-трансмиссионная установка, резонансные зоны, собственные частоты.

ANALYSIS OF NATURAL FREQUENCIES OF THE MOTOR-TRANSMISSION UNIT OF A WHEELED FORESTRY TRACTOR

The natural frequencies of a motor-transmission unit of a wheeled forestry tractor are analyzed. The results of this analysis enable to identify the resonance zones of the motor-transmission unit of a wheeled forestry tractor. The determination of the natural frequencies of the motor-transmission unit was carried out on the basis of the developed mathematical model. The information obtained enables to select the optimal design parameters for the operation of the motor-transmission unit of a wheeled forestry tractor in a resonant-free mode.

Key words: wheeled forestry tractor, motor-transmission unit, resonance zones, natural frequencies.

Повышение эффективности использования комплекса лесозаготовительных машин в основном сдерживается техническим уровнем парка машин для первичной транспортировки древесины. За рубежом доминирую-

ший объем работ на лесозаготовках выполняют с помощью колесных машин (в Скандинавских странах 90...96 %, в Северной Америке 60...70 %). Они обладают высокими транспортными скоростями движения, хорошей проходимостью, экологической совместимостью с лесной средой, а также более комфортными условиями труда оператора.

Работы по созданию лесотранспортных машин проводятся различными фирмами производителями, как у нас в стране, так и за рубежом. Сокращение сроков их проектирования, производства и доводки, а также выбор оптимальных конструкционных параметров невозможно без совершенствования теории взаимодействия колесных лесопромышленных тракторов с волоком.

Механическая система «двигатель – трансмиссия – колесный трактор – пачка древесины» является одной из очень сложных динамических систем. Она обладает большим числом собственных частот, спектр которых, зависит от передаточных чисел трансмиссии, рейсовой нагрузки, а для колесного лесопромышленного трактора и от давления воздуха в шинах. При движении колесного лесопромышленного трактора, его динамическая система подвержена силовому возмущающему воздействию с различными частотами от изменчивости сил сопротивления движению (прежде всего от микронеровностей волока), а также от внутренних источников системы, возникающих от динамического воздействия двигателя внутреннего сгорания, зубчатых зацеплений, взаимодействия грунтозацепов колес с опорной поверхностью. При этом в динамической системе «двигатель – трансмиссия – колесный трактор – пачка древесины» могут возникать «пиковые» крутящие моменты и резонансные режимы, возникновение которых может создавать в сечениях конструкции машины напряжения, превышающие предел их статической прочности или сопровождаться накоплением усталостных трещин в материале конструкций.

Анализ динамических свойств системы «двигатель – трансмиссия – колесный трактор – пачка древесины» позволит наметить пути снижения нагруженности трансмиссии и обеспечить необходимую надежность динамической системы при изменении применяемых технических решений.

Исследованиям динамической системы «двигатель – трансмиссия – машина» уделяется большое внимание в теории тракторов и автомобилей [1–3].

В динамической системе «двигатель – трансмиссия – колесный трактор – пачка древесины» могут иметь место резонансные крутильные колебания. Особенно вероятно их возникновение на низких частотах вращения коленчатого вала двигателя, под воздействием силовых возмущений ДВС, движителя и микронеровностей волока. Данные резонансные крутильные колебания системы могут создавать опасные перегрузочные напряжения в элементах и сечениях трансмиссии.

Анализ динамических моделей моторно-трансмиссионных установок, применяемых для оценки нагрузочных режимов трансмиссий, частотного анализа и изучения колебательных процессов в условиях резонанса,

показал необходимость учета моментов инерции и жесткостей реактивных элементов трансмиссии, а также демпфирования в них [4, 8]. Необходимо учитывать наличие в трансмиссии колесных трелевочных тракторов гидротрансформатора, свойства которого также оказывают влияние на формирование колебательных процессов трансмиссии колесного лесопромышленного трактора.

Для решения поставленной задачи была разработана математическая модель трансмиссии колесного лесопромышленного трактора, позволяющая определить собственные частоты динамической системы «двигатель – трансмиссия – трактор – пачка древесины» [5, 6].

Собственные частоты системы «двигатель – трансмиссия – колесный трактор – пачка древесины» на различных передачах представлены в табл. 1.

Таблица 1. Собственные частоты крутильных колебаний системы «двигатель – трансмиссия – трактор – пачка древесины»

Передача	Передачное отношение гидро- трансформатора	Собственные частоты, Гц				
		I частота	II частота	III частота	IV частота	V частота
I	1,0	5,01	12,36	12,74	160,76	$1,28 \cdot 10^8$
	0,6	5,01	12,36	12,74	160,74	$9,8 \cdot 10^7$
II	1,0	5,01	7,17	7,52	93,55	$1,28 \cdot 10^8$
	0,6	5,01	7,17	7,52	93,55	$9,8 \cdot 10^7$
III	1,0	4,11	4,11	5,01	180,16	$1,28 \cdot 10^8$
	0,6	4,11	4,11	5,01	180,16	$9,8 \cdot 10^7$
IV	1,0	3,67	3,72	5,01	51,34	$1,28 \cdot 10^8$
	0,6	3,67	3,72	5,01	51,34	$9,8 \cdot 10^7$

Сила трения зависит от скорости закручивания валопровода, следовательно, на низших передачах демпфирующие свойства трансмиссии и пневматических шин колесного трактора значительно больше чем на высших. Поэтому можно утверждать, что на низших передачах трансмиссии колесного трактора резонансных крутильных колебаний не будет.

Воздействие ДВС на трансмиссию возникает от силы действия газов на поршень, которая достигает максимального значения при полной загрузке ДВС по крутящему моменту, и от сил инерции шатунно-поршневой группы. Наибольшая инерционность наблюдается на больших частотах вращения коленчатого вала двигателя. На промежуточных режимах одновременно проявляется силовое инерционное воздействие и воздействие газов [7]. Частоты воздействия двигателя на трансмиссию представлены в табл. 2 [7].

Таблица 2. Частоты воздействия от двигателя на трансмиссию

Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Частоты от давления газов, Гц	Частоты сил инерции, Гц
800	40	27
1 200	60	40
1 800	90	60
2 200	110	73

При анализе табл. 1 и 2 следует иметь ввиду, что наибольший к.п.д. агрегата ДВС – гидротрансформатор наблюдается при частоте вращения коленчатого вала дизельного двигателя около 2000 мин^{-1} , а передаточное отношение гидротрансформатора ориентировочно 0,9. Из табл. 1 и 2 видно, что на рабочих режимах агрегата ДВС – гидротрансформатор частоты возмущающего воздействия ДВС значительно отличаются от собственных частот системы «двигатель – трансмиссия – колесный трактор – пачка древесины».

Проведенный анализ собственных частот динамической системы «двигатель – трансмиссия – колесный трактор – пачка древесины» и силового возмущающего воздействия позволяет определить возможность возникновения резонансных режимов в трансмиссии колесного лесопромышленного трактора, как при трелевке пачки древесины, так и в режиме холостого хода.

Библиографический список

1. Барский, И.Б. Динамика трактора / И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутков. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.
2. Калякин, Л.А. Влияние жесткости привода колесного тягача 4x4 на распределение динамических крутящих моментов / Л.А. Калякин, Н.Ф. Бычаров, В.М. Семенов // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1970. № 3. С. 108–114.
3. Жуков, А.В. Колебания лесотранспортных машин / А.В. Жуков, И.И. Леонович. Минск: Изд. БГУ им. В.И. Ленина, 1973. 240 с.
4. Анисимов, Г.М. Условия эксплуатации и нагруженность трансмиссии трелевочного трактора / Г.М. Анисимов. М.: Лесная промышленность, 1975. 166 с.
5. Каляев, А.В. Расчет переходных процессов в линейных системах методом понижения порядка дифференциального уравнения / А.В. Каляев // Автоматика и телемеханика. 1959. № 9. С. 1173–1179.
6. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. СПб.: Изд-во «Профессия», 2004. 752 с.
7. Попык, К.Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей / К.Г. Попык. М.: Машиностроение, 1965. 258 с.
8. Попов, В.Б. Анализ собственных частот и определение динамических коэффициентов трансмиссии сельскохозяйственной машины / В.Б. Попов, Ю.В. Чупрынин, Д.В. Джасов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. 2017. № 2. С. 32–39.

УДК 621.3

Е.В. Полетаева, Ф.Х. Арсланов, Т.В. Иванова
Тверской государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА ПРОИЗВОДСТВА ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Разработана модель объекта обработки, представляющая собой структуру, которая может легко встраиваться в известные системы автоматизированного проектирования для типовых и групповых технологических процессов. При построении

модели учитываются многие факторы, отражающие конструкторские и технологические свойства деталей.

Ключевые слова: технология машиностроения, автоматизация, структурная модель, моделирование, типовой технологический процесс, групповое производство, модульный принцип.

A PRODUCTION OBJECT MODELING AT AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL DESIGN

A model of the processing object has been developed, which is a structure that can be easily integrated into well-known computer-aided design systems for typical and group technological processes. When constructing a model, many factors are taken into account that reflect the design and technological properties of parts.

Key words: engineering technology, automation, structural model, modeling, typical engineering procedure, group production, modular principle.

Широкое распространение сегодня получило мелкосерийное производство. Это, как правило, многономенклатурное производство, способное быстро перенастраиваться на выпуск новой продукции. Прогрессивными в таких условиях являются типовая и групповая технологии. В основе типовой технологии лежит классификация деталей по типам, представляющим собой группу близких по конструкции деталей [1]. В условиях многономенклатурного производства для каждого типа деталей разрабатывается типовой технологический процесс, а объектом производства служит обобщенная деталь, включающая в себя все элементы деталей, входящих в группу [2, 3]. Для группового технологического процесса разрабатывается комплексная деталь, также содержащая все элементы деталей группы. Для обработки каждого элемента или совокупности элементов обобщенной (комплексной) детали выбирается соответствующее станочное оборудование и технологическая оснастка. Поэтому от структуры модели детали на разных уровнях абстрагирования будет в большой степени зависеть эффективность машиностроительного производства [4].

Для построения модели детали в современных условиях производства подходит модульный принцип. Он позволяет связывать конструктивные элементы деталей с элементами производственной системы и проводить соответствующие оптимизационные расчеты. Модульный принцип – построение различных технических систем с разнообразными характеристиками путем компоновки их из типовых модулей ограниченной номенклатуры [5]. Модульный принцип в машиностроительном производстве заключается в том, что он пронизывает последовательно все основные звенья машиностроительного производства в виде модульного проектирования изделий, технологических процессов, технологических средств и организации производственного процесса. При этом между модулями указанных звеньев существует органичная связь, когда модуль по-

следующего звена является функцией модуля предыдущего звена. Ограниченность номенклатуры модулей поверхностей открывает возможности создания единой элементарной базы на модульном уровне для всего машиностроительного производства. Ее обозримость создает благоприятные предпосылки к управлению развитием машиностроительного комплекса.

Построение модели детали. Деталь, как часть производственной системы состоит из модулей – совокупности поверхностей, обрабатываемых за один установ и обладающих определенными свойствами. При создании классификации на верхнем уровне все модули разделяются по служебному принципу на три группы (рабочие, базирующие и связующие). На нижних уровнях классификации поверхности подразделяются по признакам. Характеризующим их конструктивно-геометрическое оформление (внутренние, наружные, цилиндрические, плоские поверхности и т. д.) [6, 7]. Модель производственной системы, построенная из модулей, должна обладать следующими свойствами: должны быть определены качественные признаки каждого составляющего модуля, выявлено число типов составляющих модулей и принцип объединения модулей в систему [8, 9].

В свете вышесказанного, каждая деталь как объект обработки представляет собой систему модулей. В соответствии с ее назначением деталь может быть представлена совокупностью базирующих, рабочих и связующих модулей. Вся номенклатура деталей может быть представлена в виде единого графа, который содержит как элементарные поверхности, так и модули. При этом деталь описывается подграфом этого графа. Такое построение системы позволяет легко модифицировать ее структуру (рис. 1).

Задача любого модуля базирования – лишить объекта всех степеней свободы в зависимости от схемы базирования и типа базирующих поверхностей, входящих в состав модуля базирующего (МБ). Класс базирующих модулей поверхностей (МПБ) характеризуется наличием у модуля трех базирующих поверхностей, на которых может быть построена прямоугольная система координат с расположением шести опорных точек по схеме 3–2–1. Принимая во внимание возможный набор поверхностей, которые лишают деталь от одной до четырех степеней свободы, можно по конструктивно-геометрическому признаку разделить класс МПБ на пять подклассов.

Для примера рассмотрим фрагмент узла экскаватора (рис. 2). Каждую деталь узла представим в виде системы *модуль-элемент*, используя выше приведенную классификационную схему модулей.

Рассмотрим деталь *полумуфта* как объект модульной классификации и опишем его в терминах системы *модуль-элемент* [10].

Для исследования модульного принципа, был взят экскаватор Э-302Б. В экскаваторе Э-302Б одним из важных элементов привода является полумуфта, передающая крутящий момент и компенсирующая несоосность ведущего и ведомого вала. Муфтой называется устройство для со-

единения валов. Основное назначение муфт является передача вращающего момента между валами без изменения его значения и направления. Кроме передачи момента, некоторые муфты выполняют дополнительные функции [11]. Полумуфта – часть разъемной муфты, соединяемая непосредственно с ведущим или ведомым валом. В рассматриваемом экскаваторе 9 различных конструкций полумуфт.



Рис. 1. Классификационная схема модулей поверхностей детали

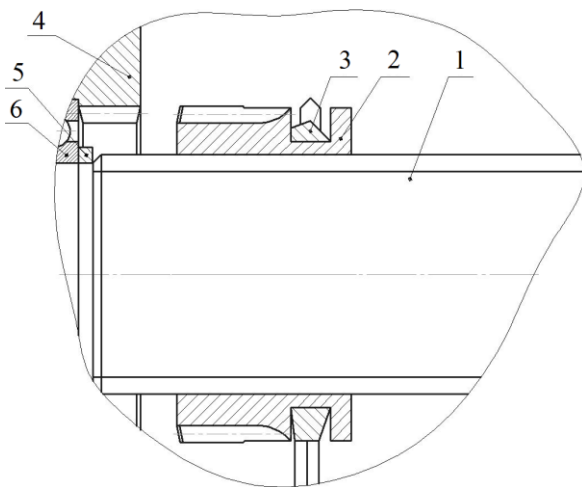


Рис. 2. Фрагмент узла экскаватора:

1 – вал; 2 – полумуфта; 3 – вилка;
4 – ступица; 5 – кольцо; 6 – подшипник

ступательное перемещение вдоль оси. Поверхность 2 является внешней (1)

В онтологической системе полумуфта может быть описана в терминах *род-вид* (рис. 3) [12].

В детали *полумуфта* (рис. 4) рассмотрим совокупность плоскостей 1 и 6 базирующего (1) модуля (М) полученного сочетанием плоской и цилиндрической поверхностей (3), т. е. М13, где поверхность 1 – торец, когда вилка будет перемещать полумуфту по оси, загоняя полумуфту в ступицу, он упрется в подшипник, а поверхность 6 – внутренние шлицы, совершают только поступательное перемещение вдоль оси. Поверхность 2 является внешней (1)

небазирующей (2) по форме (1) рабочей поверхностью (1) т. е. M1211, где 2 – внешний зубчатый венец, который в зацеплении со ступицей будет совершать вращательное движение. Поверхности 3, 4 и 5 являются внешними (1) небазирующими (2) по форме (1) связующими поверхностями (2), т. е. M1212. Так через совокупность модулей можно описать деталь. Все элементы взаимодействуют между собой, поэтому, используя модульный принцип, можно формализовать не только геометрическое описание элементов, но и технологическую функцию каждой поверхности, что упростит конструирование технологической оснастки в машиностроении.

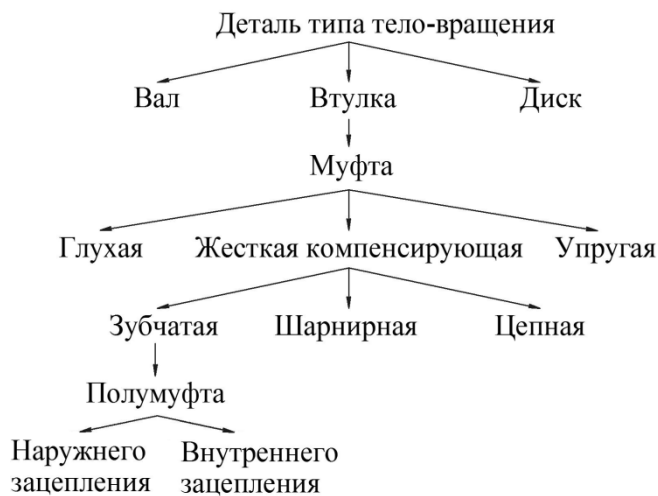


Рис. 3. Фрагмент онтологической системы

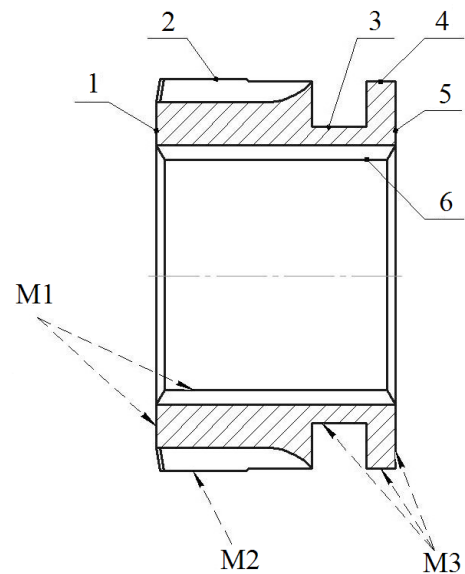


Рис. 4. Эскиз детали *полумуфта*

Рассмотрим более подробно шлицевое соединение. В этом соединении возможны три способа центрирования: по наименьшему диаметру d , по наибольшему диаметру D и по боковым поверхностям шлицев. Поскольку в рассматриваемом случае центрирование – по наибольшему диаметру D , то это соединение можно отнести к модулю MC1, если рассматривать соединяемые детали абсолютно твердыми телами. Тогда контакт шлицев со стенками впадин будет происходить по одному из них. Это объясняется наличием погрешностей расположения шлицев в угловом направлении, однако какой из шлицев войдет в контакт, неизвестно, и носит случайный характер. Таким образом, имеет место частный случай соединения MC1, где у присоединяемой детали оставляется одна степень свободы – поступательное перемещение вдоль оси. В действительности, поскольку детали обладают упругостью, за счет упругих деформаций контакт будет осуществляться по нескольким шлицам.

Последовательность построения модели детали. 1. Построение комплексной детали, содержащей все элементы деталей, входящих в группу.

Для рассмотренного примера это – все детали типа *полумуфта*, входящие в узлы рассматриваемого экскаватора (рис. 5). Выявляются все поверхности, подвергаемые обработке.

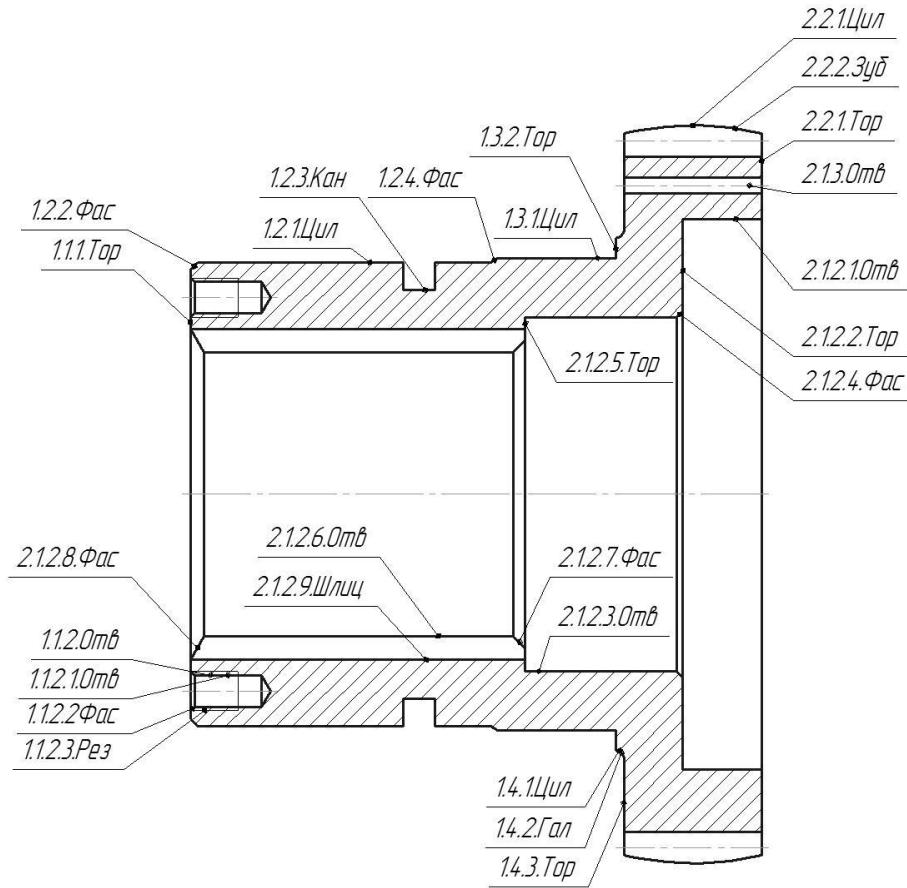


Рис. 5. Комплексная деталь типа полумуфта

2. Для выявленных на предыдущем шаге поверхностей, строится граф конструкторско-технологических элементов (рис. 6) по уже известному принципу, принятом в современных системах автоматизированного проектирования [13].

3. Элементы комплексной детали объединяются в модули (рис. 7) [14].

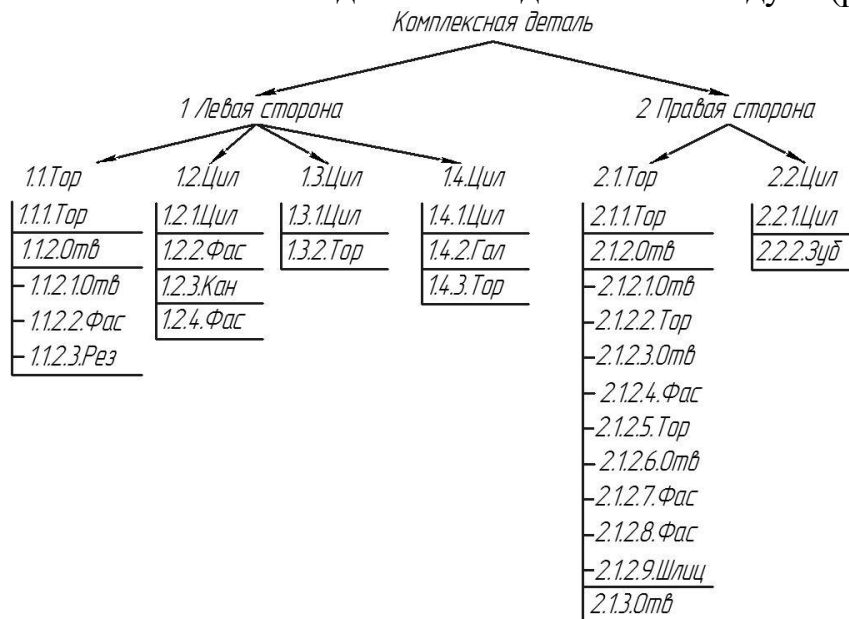


Рис. 6. Граф КТЭ детали типа полумуфта

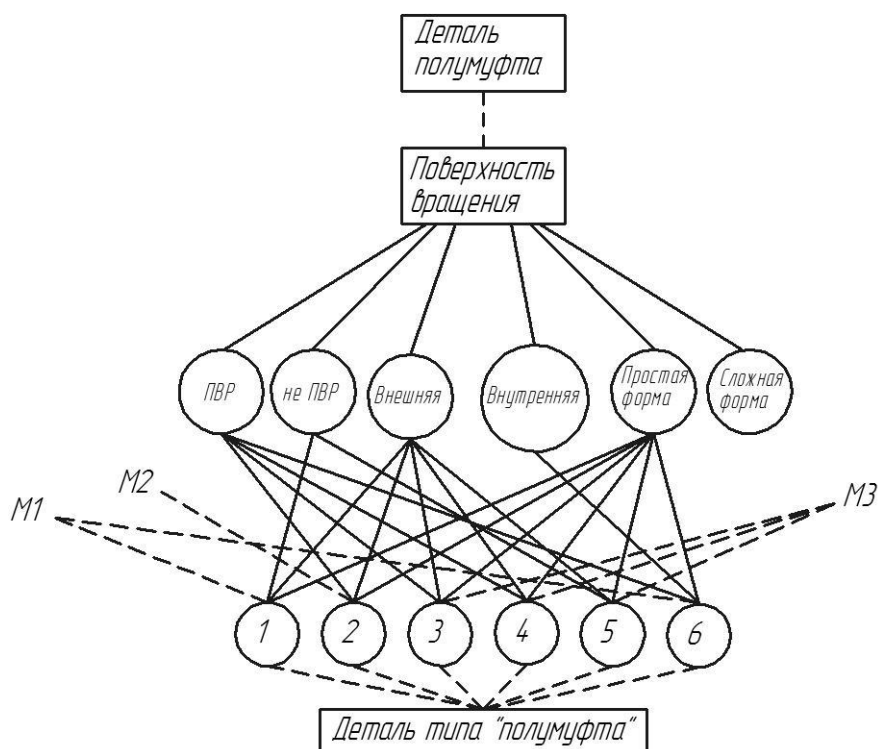


Рис. 7. Граф, описывающий деталь типа «полумуфта»

Заключение. Рассмотренная модель детали позволяет автоматизировать технологическую подготовку в условиях многономенклатурного производства, к которому относятся типовой и групповой технологический процессы [15]. Важно то, что вся номенклатура деталей, относящихся к некоторой машине, может быть представлена в виде единого графа, содержащего элементарные поверхности, модули поверхностей и различные конструкторско-технологические элементы. При этом обеспечивается целостность и гибкость информационной системы. Такая модель может встраиваться в системы автоматизированного проектирования без дополнительной модификации и может быть использована на различных этапах проектирования и производства в интегрированных автоматизированных производственных системах.

Библиографический список

1. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / Б.М. Базров. М.: Машиностроение, 2007. 736 с.
2. Новоселецкий, Б.В. Особенности технологии обработки деталей типа тел вращения на гибких автоматизированных линиях / Б.В. Новоселецкий, Р.Г. Редько, О.И. Редько // Наукові нотатки. 2014. № 47. С. 125–130.
3. Аскалонова Т.А. Организация групповой технологии в гибких производственных системах / Т.А. Аскалонова, С.Л. Леонов, А.А. Ситников // Вестник современных технологий. 2016. № 1 (1). С. 4–9.
4. Базров, Б.М. Типовая технология в условиях конкуренции / Б.М. Базров // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2014. № 1 (47). С. 95–99.
5. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. М.: Машиностроение, 2001. 367 с.

6. Модульная технология. Энциклопедия по машиностроению XXL. URL: <https://mash-xxl.info/info/538037/>

7. Полетаева, Е.В. Использование модульного принципа в технологическом проектировании в условиях многономенклатурного производства / Е.В. Полетаева, А.О. Галанцев // Вестник Тверского государственного технического университета. 2018. Вып. 1 (33). С. 57–60.

8. Мартыненко, О.В. Применение модульного принципа в конструкторско-технологической подготовке производства / О.В. Мартыненко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12-4. С. 605–608.

9. Советов, Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. М.: Высшая школа, 2015. 343 с.

10. Полетаева, Е.В. Построение информационной системы машиностроительного производства на базе предметной онтологии: монография / Е.В. Полетаева. Тверь: ТвГТУ, 2015. 196 с.

11. Детали машин: Учебник / Н.Г. Ку克林, Г.С. Кушлина, В.К. Житков. М.: КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 512 с.

12. Авдошин, С.М. Информационные технологии онтологического инжиниринга / С.М. Авдошин, М.П. Шатилов // Информационные технологии. 2008. № 10. С. 28–37.

13. Горлов И.В. Групповая технология как основа автоматизации широкономенклатурного производства / И.В. Горлов, Е.В. Полетаева, Н.А. Калинин // Вестник Тверского государственного технического университета. 2016. № 1 (29). С. 59–65.

14. Полетаева, Е.В. К вопросу о создании рациональной структуры технологической системы в условиях мелкосерийного производства / Е.В. Полетаева, А.О. Галанцев // Вестник Тверского государственного технического университета. 2017. Вып. 2 (32). С. 68–71.

15. Литовка, Ю.В. Автоматизация технологической подготовки производства / Ю.В. Литовка. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет. 2003. 33 с.

УДК 67.02

Е.В. Полетаева, И.В. Горлов, О.С. Филин
Тверской государственный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЗАПУСКА ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Эффективность машиностроительного производства зависит от многих факторов, одним из которых является определенный порядок выполнения отдельных операций. Представлен программный модуль, реализующий алгоритм расчета оптимальной последовательности обработки групп деталей. Приведен пример построения производственного процесса для деталей типа *вал-шестерня*.

Ключевые слова: технология машиностроения, автоматизация, технологическая подготовка производства, программа запуска, моделирование, групповая технология.

OPTIMIZATION OF THE START-UP SEQUENCE OF GROUP PRODUCTION

The efficiency of machine-building production depends on many factors, one of which is a certain order of execution of individual operations. A software module that implements an

algorithm for calculating the optimal sequence of groups of parts processing is presented. An example of the construction of the production process for *the shaft-gear* type of parts is given.

Key words: engineering technology, automation, technological preparation of production, start-up program, modeling, group technology.

Эффективность производственной системы на машиностроительном производстве в большой степени зависит от ее организации. Организация производственных процессов состоит в объединении людей, орудий и предметов труда в единый процесс производства, а также в обеспечении рационального сочетания в пространстве и во времени всех производственных процессов. Пространственное сочетание элементов производственного процесса и всех его разновидностей реализуется на основе формирования производственной структуры, задачей которого является определение состава парка станочного оборудования, его планировки, размещения. Организация производственных процессов предполагает сочетание их элементов во времени, что обуславливает определенный порядок выполнения отдельных операций, рациональное совмещение времени выполнения различных видов работ, определение календарных плановых нормативов движения предметов труда [1].

Техническое совершенствование производства идет в направлении внедрения новых технологий, использования прогрессивного оборудования и др. Этому способствует внедрение предметно-замкнутых и поддетально-специализированных участков. В условиях многономенклатурного производства такими участками являются автоматизированные линии, организованные по принципу групповой технологии [2–4]. Особенностью групповой технологии является то, что детали, имеющие сходные параметры, даже относящиеся к разным классификационным типам, объединяются в одну группу. Детали, входящие в группу, разбиваются на элементы, которые в совокупности составляют форму комплексной детали. Для комплексной детали разрабатывается маршрутная технология и выбирается станочное оборудование, которое выстраивается в линию, как правило, автоматизированную. Маршрутная технология комплексной детали является основой для разработки операционной технологии всех деталей группы. Результатами расчета являются: маршрут обработки детали и время обработки каждой детали на станках линии. Детали на станки поступают партиями. Партия – количество непрерывно обрабатываемых деталей с однократной затратой подготовительно-заключительного времени. Таким образом, время обработки детали группы на станке станочной линии состоит из времени обработки партии деталей одного наименования и подготовительно-заключительного времени, затрачиваемого на перенастройку станка и технологической оснастки на обработку новой детали группы. На практике вопросы выбора оптимальной партии деталей решается методом эмпирического подбора с проведением проверочных расчетов [5]. Организация произ-

водственных процессов по схеме групповой технологии предполагает не только определенный порядок выполнения отдельных операций обработки деталей группы, но и рациональное течение процессов во времени, что обеспечивается порядком запуска изделий, созданием необходимых запасов и производственных заделов [6].

Производственная программа цеха включает в себя следующие показатели: номенклатуру изделий, программу выпуска товарной продукции и программу запуска. Существуют различные методики расчета оптимальной очередности запуска деталей в производство, но чаще всего для этой цели используют правило приоритетов. Приоритетной может быть деталь с наибольшей трудоемкостью, т. е. наибольшим суммарным временем цикла обработки, являющейся лимитирующей при производстве сборочной единицы. Для остальных деталей при общих равных условиях критериями выбора очередности запуска деталей являются минимизация цикла производства и минимизация времени простоев станочного оборудования или обеспечение наилучшей непрерывности загрузки станков. Проведенные исследования в этой области показывают, что детали с преобладающей трудоемкостью черновых операций, по сравнению с деталями с преобладанием финишных операций, значительно позднее попадают на финишную обработку. При этом время включения в работу всех участков производственной системы затягивается, что удлиняет совокупный цикл изготовления деталей. При обработке деталей с преобладающей трудоемкостью финишных операций время включения всех участвующих в обработке рабочих мест уменьшается, и это соответственно уменьшает цикл изготовления деталей. Существуют еще детали с близкой к симметричной структурой технологического процесса, в которых преобладание стартовых и финишных операций не выявляется.

Задача выбора оптимального движения партии предметов труда по операциям относят к задачам теории расписаний, которая в случае производственной системы формулируется так: требуется отыскать оптимальный порядок запуска партий деталей на участке, где над ними выполняется некоторая последовательность операций, причем, в общем случае, это может быть как предметно-замкнутый, так и технологический участок. Выделяются два случая решения задачи – статистический и динамический. Статическим называется случай, когда список заданий изменяется, все задания поступают в очередь и ожидают следующего цикла решения задачи. В этом случае оптимальной является последовательность выполнения задач, при которой совокупность времени выполнения всех заданий будет минимальной. Динамический случай допускает поступление заданий в систему и оперативное включение их в процедуру составления расписания. Здесь цель – завершение каждого задания к определенному сроку или минимизация совокупного времени ожидания заданий в очереди.

Для статистического случая разработаны алгоритмы (по методу Джонсона, Белмана), позволяющие определить оптимальную последовательность нескольких заданий, проходящих 2–3 рабочих места. Самый сложный – CDS-алгоритм – эвристическая процедура, позволяющая оптимизировать последовательность выполнения нескольких заданий, проходящих в одинаковом порядке несколько рабочих центров. Но так как этот алгоритм – эвристический, он не является гарантированно точным или оптимальным и может дать в некоторых случаях неверное решение. Поэтому задача выбора оптимальной программы запуска в производство сводится, как правило, к диспетчированию – нахождению приоритетов назначения работ на одно рабочее место вместо того, чтобы пытаться точно составить расписание выполнения работ на последовательности рабочих мест.

В результате проведения инженерных расчетов для производства, организованного по принципу групповой технологии, получаем следующие параметры производственной системы: n – количество единиц станочного оборудования, выстроенного в линию; m – количество деталей группы, для каждой из которых рассчитана величина передаточной партии; t_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, m$) – время обработки партии i -й детали на j -м станке линии. Представленных данных достаточно для решения задачи оптимизации последовательности запуска деталей в условиях группового производства, состоящей из m деталей, обрабатываемых на станочной линии, состоящей из n единиц станочного оборудования, при известном времени технологических операций. Необходимо найти такую последовательность запуска деталей в производство, при которой время обработки всех деталей группы будет минимальным. Время технологических операций деталей группы может быть представлено в виде матрицы M размерностью $m \times n$ [7, 8]. Для решения поставленной задачи разработан алгоритм, состоящий из нескольких шагов:

Шаг 1. Формирование матрицы всех возможных вариантов последовательностей запуска деталей в производство.

Шаг 2. Выбор первого варианта последовательности запуска, что соответствует выбору первой строки матрицы.

Шаг 3. Расчет времени обработки всех деталей группы t для текущей последовательности запуска деталей в производство.

Шаг 4. Проверка: если расчет проведен для первого варианта последовательности запуска, то запоминается рассчитанное значение t ($t_0 = t$). В противном случае, если t меньше t_0 , то обновляется значение t_0 ($t_0 = t$) и запоминается текущая строка матрицы, которая содержит вариант последовательности запуска, соответствующий на данном этапе минимальному времени обработки всех деталей группы.

Шаг 5. Проверка: если текущая строка матрицы не является последней, то выбирается следующий вариант последовательности запуска (следующая строка матрицы) и осуществляется переход к шагу 3; в противном случае время обработки всех деталей группы t_0 является минимальным, а соответствующая строка матрицы содержит оптимальный вариант последовательности запуска деталей группы в производство.

Представленный алгоритм реализован на языке программирования *Object Pascal* в среде *Delphi* не ниже 7-й версии и оформлен в виде модуля *PZAP*, в котором ввод, вывод, редактирование данных проводится в диалоговом режиме с использованием персонального компьютера [9, 10]. Для демонстрации работы модуля *PZAP* выбраны детали типа вал-шестерня, объединенные в группу ($n = 5$) (рис. 1).

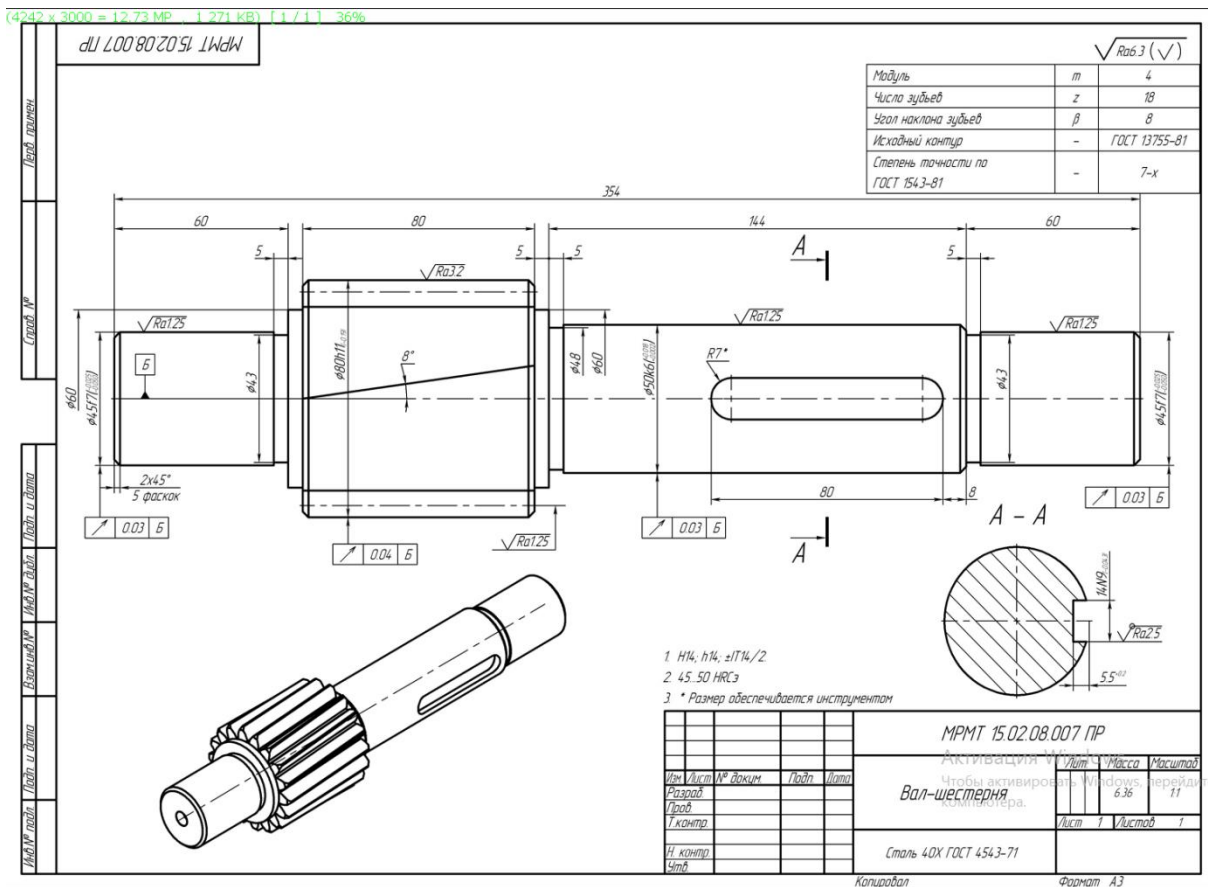


Рис. 1. Деталь типа вал-шестерня

Для комплексной детали, объединяющей элементы всех деталей группы, разработан маршрутный технологический процесс, выбраны станочное оборудование и оснастка. Для механической обработки полученной комплексной детали необходимо выполнить 6 операций: фрезерно-центровальная, токарная, фрезерная, зубофрезерная, шлицефрезерная, круглошлифовальная [11–13]. В общем случае каждая из операций выполняется на отдельном станке. Станки составляют автоматизированную линию, а все детали при обработке движутся вдоль нее, при необходимости пропуская

некоторые операции [14, 15]. При этом возврат не допускается. Результатом проектирования операционной технологии всех деталей группы является время обработки этих деталей на станках линии. При этом расчет проводится для партии деталей с учетом подготовительно-заключительного времени. Все расчеты сводим в одну матрицу V (таблица).

Матрица исходных данных V

Станок	№ детали				
	1	2	3	4	5
1. Фрезерно-центровальный	149	156	91	162	141
2. Токарный	365	202	221	444	268
3. Фрезерный	0	23	251	0	137
4. Зубофрезерный	315	0	0	0	358
5. Шлицефрезерный	106	0	0	207	0
6. Круглошлифовальный	480	200	200	315	84

Результатом работы модуля *PZAP* является оптимальная программа запуска и соответствующее время обработки всех деталей группы (рис. 2). Для проверки эффективности расчетов и проведения исследований в области организации производства выводится и вариант наихудшей программы запуска.

Для рассматриваемого примера результаты работы модуля следующие: минимальное время обработки составляет 2 178 мин (программа запуска: 25 134), максимальное время обработки – 2 694 мин (программа запуска: 53 214). Разница между наихудшим и наилучшим вариантами составляет по времени 516 мин (одна рабочая смена – 480 мин).

Введите исходные данные и нажмите кнопку		Пуск	Выход							
Количество станков	<input type="text" value="6"/>	Минимальное время обработки 2178 мин Программа запуска 25134								
Количество деталей	<input type="text" value="5"/>	Максимальное время обработки 2694 мин Программа запуска 53214								
ст/д	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	150	156	91	162	141					
2	365	202	221	444	268					
3	0	23	251	0	137					
4	315	0	0	0	358					
5	106	0	0	207	0					
6	480	200	200	315	84					
7										
8										
9										
10										

Рис. 2. Результат работы модуля *PZAP*

Разработанный модуль *PZAP* позволяет решить одну из важных организационных задач машиностроения в условиях группового производства – оптимизировать программу запуска. В результате увеличивается и выравнивается загрузка станочного оборудования, уменьшается время пролеживания деталей между операциями, что повышает эффективность работы производственной системы.

Модуль *PZAP* может быть использован при проведении исследований не только групповой технологии с точки зрения оптимизации программы запуска, но и для большего числа деталей и станочного оборудования в условиях многономенклатурного производства; модуль может быть встроен в систему автоматизированного проектирования, как уже существующую, так и разрабатываемую. Он занимает немного места в памяти компьютера, и время, затрачиваемое на его работу, невелико.

Библиографический список

1. Туровец, О.Г. Организация производства и управление предприятием: учебник / О.Г. Туровец [и др.] М.: ИНФРА-М, 2015. 506 с.
2. Горлов, И.В. Групповая технология как основа автоматизации широкономенклатурного производства / И.В. Горлов, Е.В. Полетаева, Н.А. Калинин // Вестник Тверского государственного технического университета. 2016. № 1 (29). С. 59–65.
3. Аскалонова, Т.А. Организация групповой технологии в гибких производственных системах / Т.А. Аскалонова, С.Л. Леонов, А.А. Ситников // Вестник современных технологий. 2016. № 1 (1). С. 4–9.
4. Бухалков, М.И. Особенности проектирования и организации группового производства в машиностроении / М.И. Бухалков, М.А. Кузьмин, В.В. Павлов // Организатор производства. 2010. Т. 47. № 4. С. 27–32.
5. Казанцев, Р.В. Организация и планирование производства / Р.В. Казанцев // Справочник экономиста. 2016. № 10. С. 47–53.
6. Панченко, Е.С. Серийное машиностроение: управление незавершенным производством / Е.С. Панченко // Справочник экономиста. 2016. № 10. С. 68–74.
7. Тымчук, Е.А. Автоматизация расчета времени обработки деталей при оптимизации группового машиностроительного производства / Е.А. Тымчук, Е.В. Полетаева // Теоретические, экспериментальные и прикладные исследования молодых ученых Тверского государственного технического университета: сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2017. С. 413–417.
8. Тымчук, Е.А. Оптимизация последовательности запуска деталей в условиях группового производства / Е.А. Тымчук, Е.В. Полетаева // Вестник Тверского государственного технического университета. 2017. № 32. С. 60–63.
9. Культин, Н.Б. Основы программирования в Delphi / Н.Б. Культин. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 640 с.
10. Карпов, Б. Delphi: специальный справочник / Б. Карпов. СПб.: Питер, 2002. 688 с.
11. Мещерякова, В.Б. Металлорежущие станки с ЧПУ Сер. Бакалавриат: учебное пособие / В.Б. Мещерякова, В.С. Стародубов. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2015. 336 с.
12. Жуков, Э.Л. Технология машиностроения: В 2-х кн. Кн. 2. Производство деталей машин: учебное пособие для вузов / Э.Л. Жуков [и др.]. М.: Высш.шк., 2005. 295 с.
13. Новоселецкий, Б.В. Особенности технологии обработки деталей типа тел вращения на гибких автоматизированных линиях / Б.В. Новоселецкий, Р.Г. Редько, О.И. Редько // Наукові нотатки. 2014. № 47. С. 125–130.
14. Литовка, Ю. В. Автоматизация технологической подготовки производства / Ю.В. Литовка. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2003. 33 с.
15. Чижов, М.И. Разработка подхода к автоматизации технологической подготовки производства в PLM системе Teamcenter / М.И. Чижов, А.В. Бредихин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 12-1. С. 24–26.

УДК 628.517.2

А.Г. Воронина, О.А. Колачинова, В.В. Лебедев, Н.М. Пузырев
Тверской государственный технический университет

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ОТ ШУМОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Приведены источники шума на кузнечно-прессовом производстве. Выявлено вредное воздействие повышенного уровня шума на организм работающего. Разработаны мероприятия по снижению шума на кузнечно-прессовом производстве.

Ключевые слова: шумовое воздействие, кузнечно-прессовое производство, вредный фактор, безопасность.

NOISE IMPACT PROTECTION ON PRESS FORGING

The sources of noise in the forging industry are given. The harmful effects of increased noise levels on the worker organism were revealed. Measures to reduce noise in the forging industry have been developed.

Key words: noise exposure, press forging, harmful factor, safety.

Шум является вредным общебиологическим фактором, так как действует на весь организм человека через нервную систему. Длительное воздействие производственного шума на работающего приводит к резкой потере слуха, тугоухости или к глухоте. Возникающие при этом утомление, ослабление внимания, памяти является причиной травмоопасной обстановки. Ухо человека воспринимает звук в интервале частот 16...20 000 Гц. При частоте до 16 Гц это инфразвуковые колебания, свыше 20 000 Гц – ультразвук [1].

Звуковые колебания, действующие на ухо и черепную коробку, называются костной проводимостью. Она возникает у человека при шуме 120 дБ и выше. Болевое ощущение в ушах возникает при 130 дБ. При 140 дБ разрушаются барабанные перепонки. Шум особенно опасен в ночное время суток. Объективное действие шума выражается в виде ослабления внимания, повышения кровяного давления, снижения остроты слуха, учащенного дыхания и пульса, снижения работоспособности, нарушения координации движения. Субъективное действие шума проявляются в виде головокружения, головной боли, бессонницы, общей слабости. Изменения, возникающие под действием шума в организме человека, классифицируют как шумовые болезни. [2]

Кузнечно-прессовое производство является одним из наиболее шумо- и виброопасным на вагоностроительных и других машиностроительных предприятиях. Уровни шума на рабочих местах кузнецов ручнойковки намного превышают санитарные нормы, что негативно сказывается на состоянии здоровья работающих и производительность труда.

Источниками шума и вибрации являются пневматические молоты, гидравлический пресс, создающие импульсный шум интенсивностью 95...110 дБА, который превышает допустимый уровень, равный 80 дБА. По временным характеристикам это шум непостоянный (импульсный), по характеру спектра – широкополосный, при котором прослушиваются различные звуковые частоты.

Чтобы обезопасить работников на производстве, необходимо выявить основные направления борьбы с шумом, средства и способы защиты от него. Среди них:

- разработка шумобезопасной техники и технологии, т. е. снижение шума в источнике его возникновения;

- снижение шума на пути его распространения, применение средств коллективной защиты (СКЗ) - звукопоглощение, звукоизоляция, применение глушителей шума, искусственное подавление шума (демпфирование);

- проведение организационно-технических мероприятий;

- дистанционное управление;

- рациональный режим труда и отдыха;

- применение средств индивидуальной защиты (СИЗ);

- периодический контроль уровня шума.

В случае если нельзя уменьшить шум до допустимых уровней по техническим или экономическим причинам, применяются средства индивидуальной защиты: противошумные наушники, закрывающие ушную раковину снаружи, вкладыши, перекрывающие наружный слуховой проход, противошумные каски, шлемы и костюмы.

Для снижения уровня шума в зависимости от источника шума могут использоваться различные методы и решения:

- акустические – метод основан на акустическом расчете помещения, при котором рассчитывается требуемое снижение уровня шума и подбираются средства звукоизоляции по принципам их действия;

- строительно-акустические методы, предусматривающие использование экранов, средств звукоизоляции, кабин, уплотнений, кожухов, средств дистанционного управления;

- архитектурно-планировочные решения: рациональное размещение рабочих мест, соблюдение режима труда и отдыха и другие [3].

Наиболее эффективными являются такие звукоизолирующие материалы, как трипласт - композиционный материал с наполнителем из отходов резиновой промышленности, минеральная вата, базальтовое волокно и другие. Наиболее эффективными звукопоглощающими материалами являются бетон, мрамор, кирпич, гранит, древесно-волокнистая и древесно-стружечная плиты, войлок, материалы с щелевой перфорацией.

Для снижения шума эффективнее всего при работе прессов применять глушитель шума отработанного воздуха. На прессах можно применять шумопоглощающую обшивку, специальные ограждения или экраны.

На рабочих местах необходимо пользоваться средствами индивидуальной защиты от шума в соответствии с ГОСТ 12.1.029 – 80 «ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация». Чаще всего используют противошумовые наушники ВЦНИИОТ, ВЦНИИОТ – 1 и ВЦНИИОТ – 2, которые предназначены для защиты органов слуха от воздействия производственных шумов с уровнем звукового давления до 110 дБ. Целесообразнее предложить более современный вариант – это наушники противошумные диэлектрические СОМЗ 3 Пума для защиты органа слуха от шума с уровнем не более 112 дБ. Наушники противошумные СОМЗ 15 Титан защищают от шума и дают возможность различить речь и сигналы опасности при уровне звукового давления до 115 дБ (рис. 1 и 2).



Рис. 1. Наушник СОМЗ 3



Рис. 2. Наушник СОМЗ 15

При работе на прессах предпочтительней пользоваться средствами глушения шума на пути распространения воздушной струи (на пневмоклапанах).

Корпус глушителя представляет собой стаканчик из полиэтилена, выдерживающего высокое давление, со сферическим дном. Отработанный сжатый воздух из пневмоклапанов через клапан последовательного включения поступает в полость глушителя и проходит через 216 отверстий $d = 2$ мм, расположенных друг к другу под углом 60° (рис. 3).

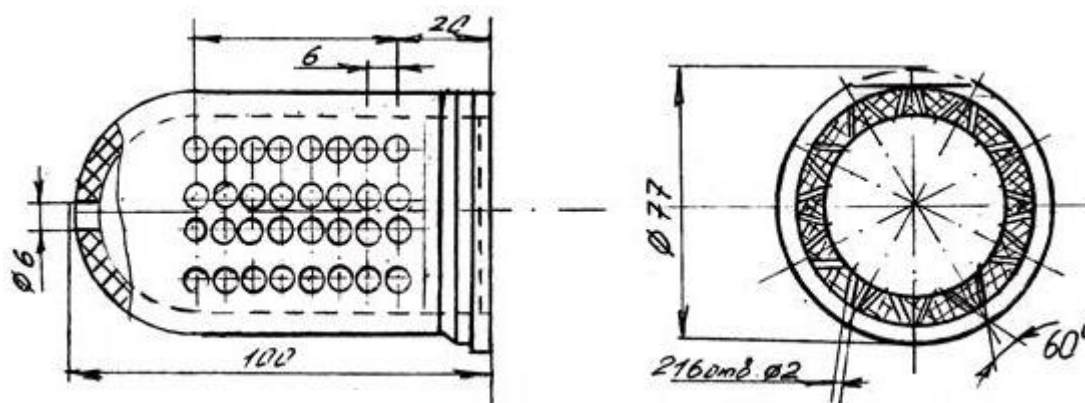


Рис. 3. Глушитель шума

В зонах постоянно пребывания людей лучше всего для снижения шума применять звукопоглощающие конструкции (подвесные потолки, обли-

цовка стен, кулисные и штучные поглотители). Площадь звукопоглощающих облицовок и количество штучных поглотителей определяют расчетом.

Экраны, устанавливаемые между источником шума и рабочими местами персонала, следует применять для защиты рабочих мест от прямого звука. Применение экранов достаточно эффективно только в сочетании со звукопоглощающими конструкциями.

Выгородка представляет собой экран, окружающий источник шума со всех сторон. Выгородки целесообразно применять для источника (источников) шума, уровни звуковой мощности которого на 15 дБ и более выше, чем у остальных источников шума (рис. 4) [5].

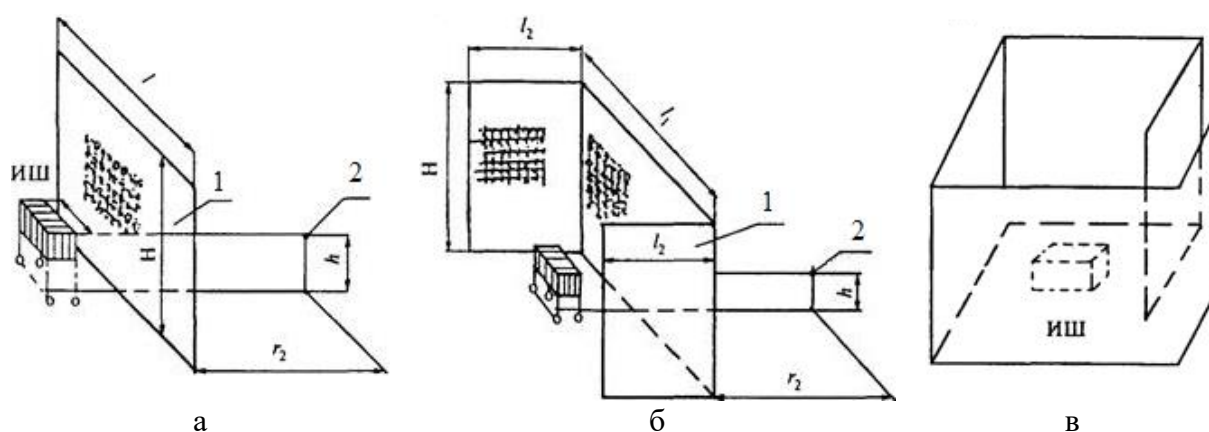


Рис. 4. Варианты экранов и выгородки:
а – плоский; б - П-образный; в – выгородка.
1 – экран; 2 – расчетная точка; ИШ – источник шума

Таким образом, предлагаемые решения по снижению воздействия шума на работающих помогут уменьшить риски возникновения профессиональной тугоухости (неврит слухового нерва) с функциональными расстройствами центральной нервной, риски поражения вегетативной, сердечно-сосудистой и других систем, которые могут рассматриваться как профессиональное заболевание – шумовая болезнь.

Предлагается провести разделение участков, на которых установлены молоты, экранирующими перегородками с нанесенным на них звукопоглощающим покрытием. С целью снижения уровня звукового воздействия прессов предлагается оснащать выпускные пневмоклапаны полиэтиленовыми глушителями высокого давления. Применение глушителей шума является наиболее эффективным способом, оказывающим положительное действие на борьбу с профессиональным заболеванием от шума. С целью уменьшения шума при сдуве окалины целесообразно применять насадок, содержащий сетку и несколько слоев базальтового волокна. Также рекомендовано использовать устройства, демпфирующие вибрации стоек станины, и шумоизолирующие кожухи.

При этом работающие в любом случае должны пользоваться средствами индивидуальной защиты.

Библиографический список

1. Шум. Общие требования безопасности: Система стандартов безопасности труда (ССБТ). ГОСТ 12.1.003-2014. Введ. 2015-11-01. М.: Изд-во стандартов, 2014. 27 с.
2. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки: Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Введ. 1996-10-31. М.: Изд-во, 1996. 47 с.
3. Защита от шума. СНиП 23-03-2003: СП 51.13330.2011. Введ. 2011-05-20. М.: Изд-во, 2010. 32 с.
4. Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях: ГОСТ 12.1.036-81. Введ. 1982-07-01. М.: Изд-во, 1981. 22 с.
5. Средства и методы защиты от шума. Классификация: ГОСТ 12.1.029-80. Введ. 1980-10-31. М.: Изд-во, 1980. 28 с.

УДК 628.517.2

О.А. Колачикова, В.В. Лебедев, Н.А. Филиппова, Н.М. Пузырев
Тверской государственный технический университет

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ГРУЗОПОДЪЕМНЫМИ МАШИНАМИ

Приведена статистика травматизма на опасных производственных объектах, где эксплуатируются грузоподъемные устройства. Выявлены причины травматизма при работе с грузоподъемными машинами. Предложены решения в целях уменьшения влияния «человеческого фактора» при эксплуатации грузоподъемного оборудования.

Ключевые слова: опасные производственные объекты, грузоподъемные устройства, опасный фактор, безопасность.

ANALYSIS OF SAFEGUARDING PROBLEMS AT WORKING WITH LIFTING MACHINES

The statistics of injuries at hazardous production facilities where lifting devices are operated is given. The reasons of traumatism at work with load-lifting machines are revealed. Solutions are proposed in order to reduce the influence of the "human factor" in the operation of lifting equipment.

Key words: hazardous production facility, lifting devices, dangerous factor, security.

Использование грузоподъемных машин широко распространено в цехах машиностроительных предприятий и в строительстве. Данное оборудование позволяет механизировать погрузочно-разгрузочные и транспортные работы, и как следствие увеличивать производительность труда. На сегодняшний день травматизм на опасных производственных объектах, где эксплуатируются грузоподъемные устройства, занимает третье место после угольной и горнорудной отраслей. Поэтому задача снижения производственного травматизма при эксплуатации подъемных устройств (кранового оборудования) является актуальной и имеет большое научно-техническое и социально-экономическое значение.

При оценке состояния парка кранового оборудования в РФ необходимо обратить особое внимание на анализ технического состояния оборудования. Основной исследуемой характеристикой в данном случае является его надежность оборудования. Надежность грузоподъемного оборудования – величина непостоянная, то есть снижается по мере изнашивания механизмов. Уже после 5 лет эксплуатации возникают дефекты крюковой подвески, тормозных устройств, соединительных муфт, приборов и устройств безопасности. К 10 годам эксплуатации появляются дефекты металлоконструкций, в том числе трещины в сварных швах, деформации элементов и коррозионный износ сооружений. Крайне важно вовремя выявить дефекты для предотвращения аварии и гибели людей.

Согласно статистическим данным, более 71 % подъемных кранов на опасных производственных объектах исчерпали нормативные сроки эксплуатации и требуют замены или реконструкции. Обновление парка рассматриваемых машин происходит крайне медленно: не более 1 % кранового оборудования в год при установленной норме 8–10 %. Низкие темпы модернизации ведут к усугублению проблемы – доля эксплуатируемых кранов с истекшим сроком службы ежегодно увеличивается. В рамках анализа статистики и причин смертельного травматизма на опасных производственных объектах применяется показатель, учитывающий как количество погибших, так и число зарегистрированной в Ростехнадзоре эксплуатируемой техники соответствующего вида – коэффициент смертельного травматизма на 1 000 единиц техники. Применение указанного показателя целесообразно в связи с возможностью сделать выводы об уровне относительной угрозы аварии или несчастного случая на опасном производственном объекте в зависимости от эксплуатируемых на нем видов техники. Динамика изменения кранового парка России и коэффициента смертельного травматизма на 1 000 кранов с 2005 по 2016 гг. [1, 2] представлена на рис. 1.

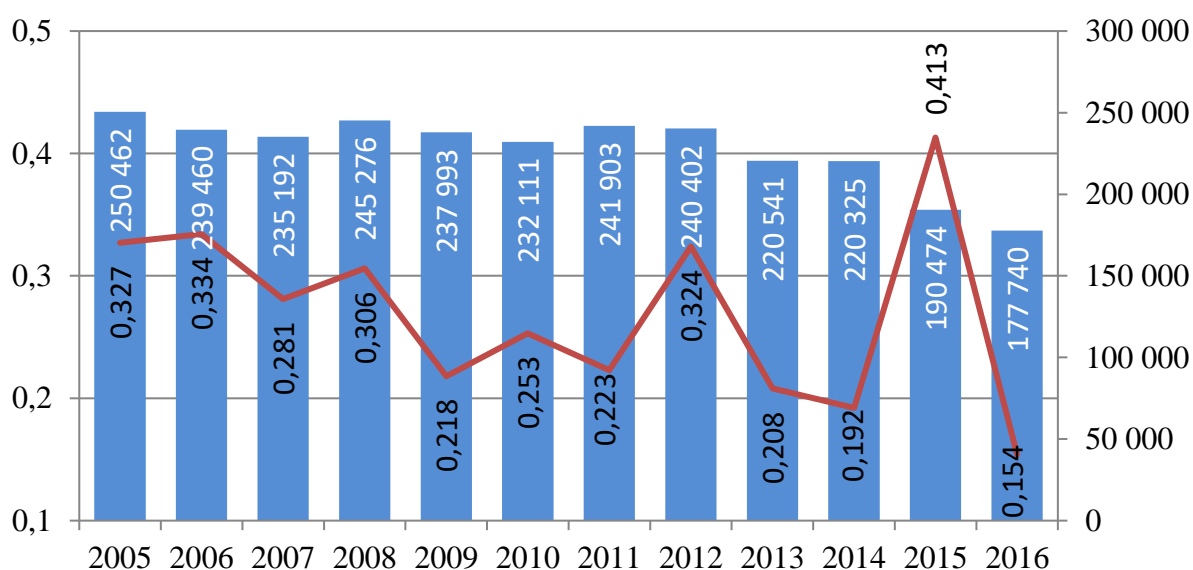


Рис. 1. Данные за период 2005–2016 гг.:

■ – количество грузоподъемных кранов;
 — – коэффициент смертельного травматизма на 1 000 кранов

В период с 2005 по 2007 гг. наблюдается постепенное сокращение парка грузоподъемного оборудования и, следовательно, снижение коэффициента смертельного травматизма. В 2008 г. сохраняется общая тенденция по снижению коэффициента смертельного травматизма. Поскольку данный критерий – отношение количества несчастных случаев со смертельным исходом к каждой 1 000 грузоподъемных машин, рост показателя смертности при работе с грузоподъемными механизмами в 2008 г. на фоне увеличения парка оборудования не привел к значительному скачку коэффициента смертельного травматизма. По итогам четырехлетия среднее значение коэффициента составило 0,312. В 2009–2012 гг. при относительном постоянстве количества грузоподъемных кранов наблюдается пик аварийности и травматизма, в том числе со смертельным исходом в 2012 г. Это связано с увеличением группового травматизма в строительстве и промышленности. Среднее значение коэффициента смертельного травматизма для данного четырехлетия составил 0,251, что меньше, чем в 2005–2008 гг. Снижение данного показателя обусловлено частичным обновлением парка грузоподъемных машин и снижением объемов работы грузоподъемного оборудования. С 2013 по 2016 гг. прослеживается резкое сокращение парка оборудования. Реконструкция и замена, отработавших нормативный срок службы положительно сказались на статистике смертельных исходов при эксплуатации кранового оборудования. В данный период наблюдается уменьшение коэффициента смертельного травматизма. Однако, нельзя не обратить внимание на статистические данные за 2015 г., согласно которым значения данного показателя достигли максимального значения за рассматриваемые 12 лет. Причиной столь высоких значений являются случаи группового смертельного травматизма. По результатам за 2013–2016 гг. среднее значение коэффициента смертельного травматизма составило 0,242, что меньше на 0,07 и 0,009 долей единицы меньше чем в 2005–2008 и 2009–2012 гг. соответственно. Среднее значение данного оценочного параметра за 12 лет составляет 0,269 долей от единицы. Сравнив усредненные значения, можно сделать вывод, что величина изменения коэффициента указывает на снижение уровня смертельного травматизма при эксплуатации кранового оборудования.

В результате несоблюдения установленных в государственном стандарте требований к средствам доступа и ограждениям, применяемых для обеспечения безопасности в процессе эксплуатации кранов, травмы получают не только крановщики и персонал, обслуживающий данное оборудование, но и третьи лица. Статистические данные по категории лиц, погибших при эксплуатации грузоподъемного оборудования в период с 2009 по 2016 гг. представлены на рис. 2.

Согласно данным, представленным на рис. 2, наибольшее число случаев смертельного травматизма зарегистрировано среди работников, не имеющих прямого отношения к обслуживанию кранов. Можно сделать вывод, что одной из основных причин несчастных случаев относится низкий уровень трудовой дисциплины и нарушение технологии производства работ.

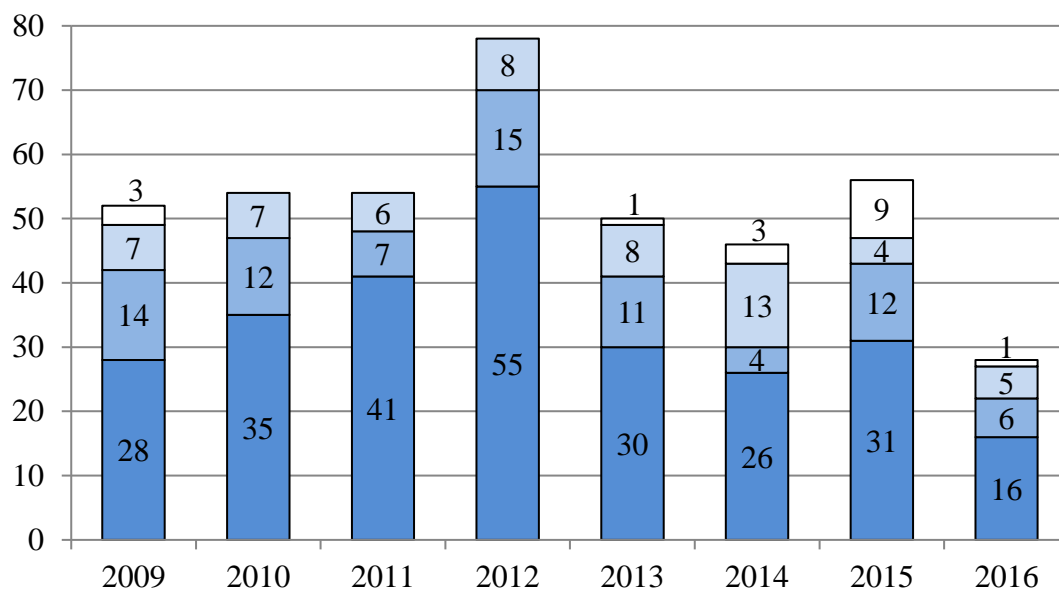


Рис. 2. Категории лиц, погибших

при эксплуатации грузоподъемных кранов в 2009–2016 гг.:

□ – третьи лица (люди, не связанные с производственным процессом на опасном производственном объекте); ■ – стропальщики; ■ – крановщики; ■ – другие работники (монтажники, каменщики и др.)

Зачастую первопричиной аварий и несчастных случаев является не технические неполадки, а нарушения требований промышленной безопасности, которые носят исключительно организационный характер. Большинство цеховых кранов управляются из кабины машинистом-крановщиком. В целях уменьшения влияния «человеческого фактора» при эксплуатации грузоподъемного оборудования целесообразно провести реконструкцию мостового крана с переводом его на напольное управление. Данное техническое решение позволит сократить обслуживающий персонал.

После проведения реконструкции, мостовой кран, имеющий грузоподъемность не более 10 т, возможно снять с регистрации в органах Ростехнадзора, поскольку данное оборудование переходит в разряд нерегистрируемых [3]. При организации напольного управления грузоподъемным оборудованием уменьшаются энергозатраты, поскольку больше нет необходимости поддержания микроклимата в кабине. Данный вид управления фактически лишает кран слепых зон, и, следовательно, значительно снижается опасность преждевременного поднятия груза и выбора неправильной траектории перемещения груза.

Библиографический список

1. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору / Ростехнадзор. URL: http://gosnadzor.ru/about_gosnadzor/press_office/oficialnye_izdania/inform_bulleten/
2. Аварийность и смертельный травматизм при эксплуатации подъемных сооружений. URL: https://ib.safety.ru/assets/pdf/Bull_70/Bull_70_32-47.pdf
3. Анализ причин аварий и несчастных случаев со смертельным исходом на поднадзорных объектах / Ростехнадзор. URL: <http://gosnadzor.ru/industrial/equipment/Analysis/>

УДК 331.45:621-05

А.М. Пузырев, Л.В. Козырева, В.А. Мартемьянов
Тверской государственной технической университет

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ КАЧЕСТВА ОБУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЫ ТРУДА НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В дискуссионной форме обсуждаются актуальные вопросы современного состояния охраны труда на машиностроительных предприятиях. Особое внимание уделено вопросам организации обучения и проведения инструктажей по охране труда на предприятиях машиностроительного комплекса в соответствии с требованиями правовых и нормативных документов.

Ключевые слова: охрана труда, обучение, инструктаж по охране труда, образовательные программы в области охраны труда.

ON THE IMPROVING THE QUALITY OF TRAINING IN THE FIELD OF SAFETY AND LABOR PROTECTION AT MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

The urgent problems of the current state of labor protection at machine-building enterprises are discussed in a discussion form. Particular attention is paid to the organization of training and personnel instruction on labor protection at the enterprises of the machine-building complex in accordance with the requirements of legal and regulatory documents.

Key words: labor protection, training, instruction on labor protection, educational programs in the field of labor protection.

Нормы Трудового кодекса РФ, в частности ст. 212 и ст. 225, обязывают работодателя проводить инструктажи по охране труда, обучение безопасным методам и приемам выполнения работ и оказания первой помощи пострадавшим [1]. Необходимость обучения по безопасности труда не вызывает сомнений при условии, что обучение будет целенаправленным, полноценным, по грамотно разработанным программам, охватывающим все особенности конкретной профессии и вида работ. По окончании обучения проверяются знания работника по всей программе обучения, с последующим оформлением протоколов и удостоверений.

Более того, работодатель обеспечивает обучение лиц, поступающих на работу с вредными и (или) опасными условиями труда, безопасным методам и приемам выполнения работ со стажировкой на рабочем месте и сдачей экзаменов и проведение их периодического обучения по охране труда и проверку знаний требований охраны труда.

С инструктажами по охране труда не все однозначно. На практике инструктаж по охране труда на рабочем месте проводится в лучшем случае только по инструкциям по охране труда по профессии или видам работ для конкретного работника. В журнале регистрации инструктажа по охране труда на рабочем месте в отдельной графе проставляется или вид инструктажа (первичный, повторный) или указываются номера инструкций, по которым инструктируют работника, за что последний и расписывается. При этом, форма журнала регистрации инструктажа носит рекомендательный

характер. Таким образом трудно (или почти невозможно) отследить качество инструктажа по охране труда как первичного, так и повторного на рабочем месте по всем вопросам инструктажа, заявленным в программах инструктажей.

Действительно п. 2.1.4 Порядка обучения по охране труда и проверки знаний требований по охране труда работников организаций, утв. Постановлением Минтруда России и Минобразования России от 13.01.2003 г. № 1/29 (далее Порядок № 1/29) указывает, что первичный инструктаж на рабочем месте проводится руководителями структурных подразделений организации по программам, разработанным и утвержденным в установленном порядке в соответствии с требованиями законодательных и иных нормативных правовых актов по охране труда, локальных нормативных актов организации, инструкций по охране труда, технической и эксплуатационной документации [2].

Объем материалов, например, типовых программ первичного инструктажа, можно сравнить даже с 40-часовой программой обучения по охране труда руководителей и специалистов организаций; кратковременный инструктаж по этим программам неизбежно скажется на его качестве.

В п. 2.1.3 Порядка № 1/29 указано, что проведение инструктажей по охране труда включает в себя ознакомление работников с имеющимися опасными и вредными производственными факторами, изучение требований охраны труда, содержащихся в локальных нормативных актах организации, инструкциях по охране труда, технической, эксплуатационной документации, а также применение безопасных методов и приемов выполнения работ. Из этого следует, что при проведении первичного инструктажа по охране труда на рабочем месте непосредственный руководитель должен добиться изучения работником следующих документов:

инструкций по охране труда по основной профессии и другим видам работ, которые периодически может выполнять работник;

локальных нормативных актов организации (правила внутреннего трудового распорядка, приказы, положения, распоряжения, коллективный договор и др.;

технической, технологической и эксплуатационной документации.

Перечень вопросов и документации при инструктаже на рабочем месте достаточно объемный и никак не вписывается в одну или несколько инструкций по охране труда. Вероятно, именно поэтому п. 2.1.4 Порядка № 1/29 предусматривает, что первичный инструктаж по охране труда на рабочем месте проводится по программам, разработанным в установленном порядке.

Интересным является также то, что инструкции по охране труда могут выдаваться работнику на руки, вывешиваться на видном (рабочем) месте или храниться в любом доступном для работника месте. Но авторы статьи, имея большой практический опыт надзорной деятельности, ни разу не видели, чтобы программы обучения вывешивались или выдавались на руки работникам.

Согласно п. 2.1.3 Порядка №1/29 инструктаж по охране труда должен завершаться устной проверкой знаний и навыков приемов работы лицом, проводившим инструктаж. Трудно представить, что весь перечень вопросов инструктажа, содержащихся в программах, инструктируемый работник способен охватить в относительно кратковременной беседе [2].

В действительности практически на всех предприятиях и в организациях непосредственные руководители при проведении инструктажей ограничиваются только инструкциями по охране труда, которые есть в комплекте, а программы инструктажей (если они вообще есть на предприятии) хранятся в службе охраны труда для возможного предъявления контролирующим и надзорным органам.

При расследовании несчастных случаев на производстве возможное нарушение работником нормативных требований по охране труда рассматривается и оценивается как правило только применительно к инструкциям по охране труда, по которым этот работник инструктировался. Сослаться на нарушение какого-то пункта или темы программы инструктажа практически невозможно, да и выглядеть это будет абсурдным, т.к. программы предназначены прежде всего для инструктирующего руководителя, а не для работника [3].

Так, например, на одном из машиностроительных предприятий в разработанную типовую программу инструктажей на рабочем месте включено следующее:

- вопросы из примерного перечня вопросов, предусмотренных ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ «Организация обучения безопасности труда» и «Обучением мерам пожарной безопасности работников организаций», утв. Приказом МЧС России от 12.12.2007 № 645;

- перечни производственных опасностей и экологических аспектов, применимых для конкретной профессии или должности;

- перечень инструкций по охране труда, пожарной безопасности, безопасности дорожного движения, охране окружающей среды, эксплуатации оборудования, а также производственных инструкций, применимых для конкретной профессии или должности;

- инструкции по оказанию первой помощи;

- инструкции по испытанию и применению средств, используемых при обслуживании электроустановок;

- межотраслевые правила обеспечения работников спецодеждой, спецобувью и другими средствами индивидуальной защиты (СИЗ);

- инструкции заводов-изготовителей по применению СИЗ [4].

Как видим, объем программы весьма значительный. Если такие типовые программы (судя по названию) являются своего рода единым алгоритмом порядка проведения инструктажа по охране труда на рабочем месте в организации, то это является логичным и объяснимым. Но если инструктаж на рабочих местах работников каждой профессии проводить по отдельным программам, то инструктирующий и инструктируемый скорее

всего придут в замешательство. Фактически приведенная выше программа является программой обучения, а не инструктажа.

На деле получается, что программы первичного инструктажа по охране труда, содержащие достаточно большой объем информации и вопросов, носят «воздушный» характер и качество инструктажа, проведенного якобы по программам, практически невозможно проверить должностным лицам, осуществляющим контроль. Кстати, это никогда и не проверяется. И тем более трудно возложить ответственность инструктируемого работника за несоблюдение (невыполнение) отдельных обязывающих норм и мероприятий по безопасности труда, содержащихся в программах.

На первый взгляд благая мысль повысить качество инструктажа по охране труда на рабочем месте путем проведения его по разработанным программам фактически обернулась бюрократизацией этой процедуры и возможностью ограничения (если не исключения) ответственности работодателей за качество проведения инструктажей.

Таким образом формируются, а вернее уже сформировались, формализм и практическое упрощение при проведении инструктажей по охране труда на рабочем месте на большинстве предприятий и организаций во всех отраслях.

Следует отметить, что форма и методы проведения инструктажа в сфере промышленной безопасности при подготовке работников, обслуживающих опасные производственные объекты, значительно отличаются от общих инструктажей по охране труда на рабочем месте. Эти работники инструктируются по конкретным правилам и производственным инструкциям, которые, кстати, после проведения инструктажа выдаются им на руки под роспись. Именно этим обеспечивается эффективность, конкретика и полнота инструктажа и повышается ответственность работников за результаты своей деятельности. Никаких программ проведения инструктажа по производственной безопасности не предусмотрено.

Вместе с тем эти работники, обслуживающие опасные производственные объекты, дополнительно инструктируются по охране труда на рабочем месте обычным порядком. Но практика показывает и авторы за долгие годы работы в сфере охраны труда и в надзорных органах неоднократно убеждались, что эти работники производственную инструкцию и специальные правила применительно к их профессии помнят и знают, а остальные вопросы, предусмотренные программами инструктажей, нет.

В связи с изложенным представляется целесообразным конкретизировать п. 2.1.4 Порядка №1/29 с тем, чтобы внести ясность: работодатель разрабатывает программы инструктажа на рабочем месте для каждой профессии или достаточно разработать единый порядок (программу) проведения инструктажей, как локальный нормативный акт организации?

Необходимо сместить акценты обучения безопасности труда работников от формального проведения инструктажа по охране труда к полноценному и эффективному обучению по профессиональной подготовке в вопросах охраны труда. Нужно каким-то образом стимулировать работода-

телей на проведение качественного обучения (а не только инструктажа) по охране труда по профессиям в первый месяц трудовой деятельности на предприятии, как того требует п. 2.2.1 Порядка №1/29. До окончания обучения и проверки комиссией знаний требований охраны труда работник должен стажироваться под руководством опытного наставника. Более того, за происшедшие с работником несчастные случаи и возникшие инциденты в вопросах безопасности труда должен отвечать и наставник.

Важную роль в подготовке и обучении по охране труда работников играет качество и полнота программы обучения применительно к их профессиям, должностям и видам выполняемых работ. Несомненно, что круг вопросов по охране труда в программах должен быть значительно шире, чем в инструкциях. Это повышает заинтересованность самих работников в получении знаний, повышает их кругозор в сфере безопасности труда и позволяет им принимать более взвешенные и правильные решения при выполнении работ и исполнении производственных и должностных обязанностей. Глубоким заблуждением является расхожее мнение, что рабочие не хотят проходить инструктаж и обучаться безопасности труда.

Содержание отдельных и конкретных программ обучения необходимо весьма обдуманно сориентировать для каждой профессии или группы профессий исходя их специфики производства и действующих нормативных правовых актов, а не слепо переписывать какие-либо типовые программы.

Представляется, что примерное содержание программы обучения может быть таким:

- обязанности по охране труда работодателей и работников;
- общественный и административный контроль за состоянием условий и охраны труда, социальное партнерство;
- условия труда на рабочих местах, специальная оценка условий труда;
- социальная защита пострадавших в результате несчастных случаев на производстве и профзаболеваний;
- порядок расследования и учета несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- обеспечение работников СИЗ и средствами коллективной защиты;
- основы электробезопасности и пожарной безопасности;
- проведение медицинских осмотров.

Кроме того, в программах должны быть в обязательном порядке и специальные вопросы, связанные обеспечением безопасности труда работников конкретных профессий, специальностей и должностей, в том числе:

- правила безопасности при эксплуатации инструментов, приспособлений и оборудования, в том числе и опасных производственных объектов (краны, сосуды, работающие под давлением, газовое оборудование и др.);
- правила безопасного производства работ на высоте, погрузочно-разгрузочных работ, строительного-монтажных работ и др.

На первый взгляд может показаться, что такое количество вопросов излишне для подготовки по охране труда работников рабочих профессий.

Но это ошибочное мнение. Ведь обучать нужно людей, которые непосредственно контактируют с технологическим оборудованием и процессами, инструментами, приборами и приспособлениями и в первую очередь подвергаются различным опасностям.

В связи с этим характерен следующий случай. Один из авторов при осуществлении надзорно-контрольной деятельности проводил проверку на одном из машиностроительных предприятий г. Твери. В ходе проверки и во время непринужденных бесед с рабочими выяснилось, что инструктаж по охране труда с ними проводился, с инструкциями они в общих чертах знакомы, но обучение фактически не проводилось. Руководители ограничились только оформлением протоколов проверки знаний требований охраны труда. Проверяющий попросил главного инженера организовать в конце рабочей смены краткое обучение рабочих на данном объекте в течение одного-двух часов 2–3 дня (естественно без последующего оформления протоколов и тем более без оплаты). Такое обучение было проведено примерно по тем вопросам, которые приведены выше в данной статье. Следует отметить, что собравшиеся проявили неподдельный интерес к тематике обучения, задавали огромное количество вопросов по трудовому законодательству, по безопасности труда, социальному страхованию и др. Этот пример показывает, что рабочие стремятся больше узнать о безопасности труда, ведь речь идет о их здоровье и жизни, иметь представление о нормах трудового законодательства применительно к их профессии и работе, о специальных вопросах охраны труда и производственной безопасности, но работодатели в силу различных, чаще субъективных, причин не стремятся проводить обучение по охране труда.

Таким образом, именно программы обучения (а не программы инструктажа) по охране труда, ориентированные в первую очередь на приобретение знаний о безопасном ведении трудовой профессиональной деятельности, позволяют сформировать у работников компетенции, которые в дальнейшем станут хорошей основой для овладения специальностью.

Опыт надзорно-контрольной деятельности и участие в различных совещаниях и конференциях по охране труда показывает, что проблема качественного проведения инструктажей и обучения и эффективности их воздействия весьма актуальна для специалистов по охране труда и для работодателей в любой отрасли и требует всестороннего обсуждения.

Авторы не призывают кардинально менять сложившуюся систему инструктажа по охране труда, но, вероятно, следует согласиться, что вопросы расхождения требований нормативных правовых актов с их практическим применением и исполнением существуют и требуют решения.

Библиографический список

1. Трудовой кодекс Российской Федерации: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 21 дек. 2001 г.: одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 26 дек. 2001 г.: введен Федер. законом Рос. Федерации от 30 дек. 2001 г. № 197-ФЗ // Рос. газ. 2001. 31 дек. № 256.

2. Порядок обучения по охране труда и проверки знаний требований по охране труда работников организаций, утв. Постановлением Минтруда России и Минобразования России от 13.01.2003 г. № 1/29. 23 с. URL: www.base.garant.ru (дата обращения 05.10.2019).

3. Мартемьянов В.А. Проблемы формирования комиссии по расследованию несчастного случая / В.А. Мартемьянов, Л.В. Козырева, А.М. Пузырев // Актуальные проблемы охраны труда: матер. IV Всеросс. науч.-практич. конф. с международ. участием. СПб: СПбГАСУ, 2018. С. 158–161.

4. Обучение мерам пожарной безопасности работников организаций, утв. Приказом МЧС России от 12.12.2007. № 645. 34 с. URL: www.consultant.ru (дата обращения 02.11.2019).

УДК 621.313.13

А.П. Архаров

Тверской государственной технической университет

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАЗА И СТУПИЦЫ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ

Проанализированы известные способы измерения корпусных деталей, содержащих ступицу и несопряженный со ступицей паз. Описан разработанный способ измерения подобных деталей. Приведена конструкция устройства, реализующего разработанный способ. Отмечены преимущества способа и устройства для измерения ширины паз, высоты ступицы и отклонения от симметричности паз.

Ключевые слова: измерение, способ, устройство, деталь, паз, симметричность, производительность.

MEASUREMENT OF THE DIMENSIONAL PARAMETERS OF THE GROOVE AND THE HUB OF THE CASING PART

Measuring methods for casing parts with hub and groove not mated to the hub are analyzed. The new developed method for measuring such parts is described. The design of the device which realize this method is described. Advantages of the developed method and device for measuring groove width, hub height and groove symmetry deviations are revealed.

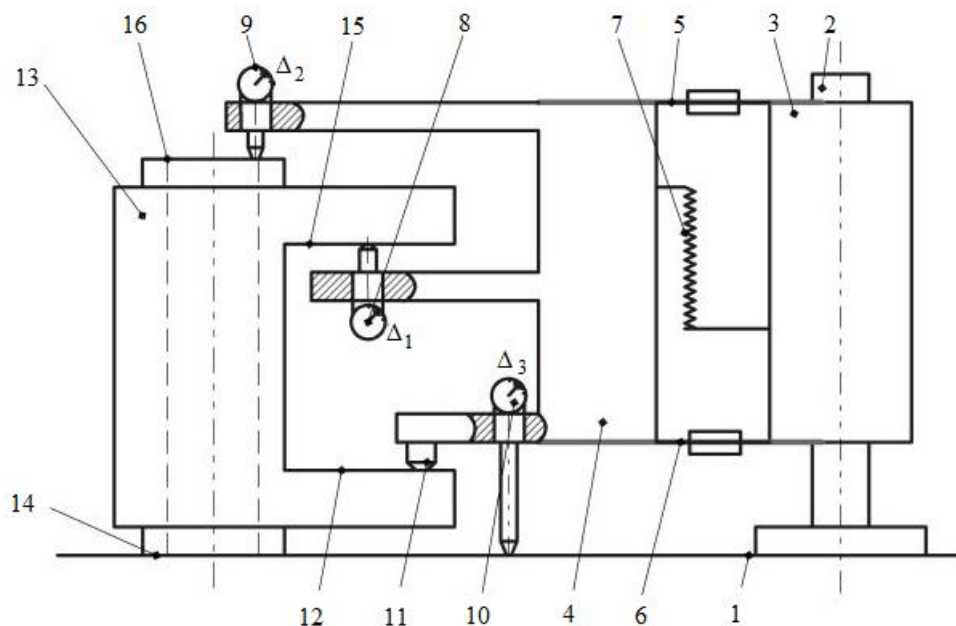
Keywords: measurement, method, device, part, groove, symmetry, performance.

В машиностроении встречаются изделия, содержащие корпусные детали с конструктивными элементами в виде пазов, не сопряженных с отверстием детали. К таким деталям относится, в частности, корпус буксы скоростного вагона. Этот корпус содержит требования не только к точности его конструктивных элементов, таких как отверстие, паз и ступица, но и требования к их зависимому расположению. Одним из способов контроля зависимого допуска расположения является контроль комплексным калибром [1]. Однако таким способом невозможно получить действительное отклонение расположения конструктивных элементов. Этот способ имеет и другой недостаток – пониженную производительность. Он обусловлен отдельным контролем всех параметров, не совмещенным по времени.

Другой способ измерения с помощью координатно-измерительной машины (КИМ) [2] позволяет, по сравнению с вышеупомянутым способом, получать действительные размеры измеряемых параметров. Однако этот способ имеет ограниченное применение из-за высокой стоимости КИМ.

Для измерения параметров паза, не сопряженного с отверстием корпусной детали, известны способ [3] и устройство [4], которые позволяют измерять ширину паза и отклонение его от симметричности относительно базового отверстия. Однако они не позволяют измерять отклонения от симметричности относительно торцов ступицы, а также высоту ступицы. Кроме того, измерение тех параметров, которые могут быть измерены упомянутым способом и устройством, выполняются последовательно. Это снижает производительность измерения.

Вышеупомянутые недостатки устранены в способе измерения ширины паза, высоты ступицы и симметричности паза относительно торцов ступицы [5]. Однако из источников научно-технической информации не было выявлено измерительного средства, реализующего этот способ. Поэтому стояла задача создания такого средства измерения. Результатом решения поставленной задачи является устройство [6], общий вид которого показан на рисунке.



- Общий вид устройства: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – кронштейн; 4 – каретка;
 5 и 6 – плоскопараллельные пружины; 7 – цилиндрическая пружина;
 8, 9 и 10 – первый, второй и третий индикаторы соответственно;
 11 – измерительный щуп; 12 и 15 – боковые поверхности паза объекта измерения;
 13 – объект измерения; 14 и 16 – торцы ступицы

Устройство содержит элементы: основание; установленную на основании стойку с кронштейном; каретку, подвешенную к кронштейну с помощью двух плоскопараллельных пружин с возможностью перемещения вдоль оси стойки с помощью цилиндрической пружины; первый, второй и третий индикаторы и измерительный щуп, закрепленные на каретке. Измерительный щуп размещен с возможностью взаимодействия с одной из бо-

ковых поверхностей 12 паза объекта измерения, установленного одним из торцов 14 ступицы на основании. Индикаторы размещены таким образом, что измерительный стержень первого индикатора 8 имеет возможность взаимодействия с другой боковой поверхностью 15 паза, а измерительные стержни второго 9 и третьего 10 индикаторов соответственно с другим торцом 16 ступицы и с основанием.

Устройство настраивается по образцовой детали.

Устройство работает следующим образом.

Объект измерения одним из торцов 14 ступицы устанавливают на основании. На этом основании размещают стойку в положении, при котором каретка, смещаясь под действием цилиндрической пружины, будет обеспечивать контакт элементов: измерительного щупа с одной из боковых поверхностей 12 паза, измерительного стержня первого индикатора 8 с другой боковой поверхностью 15 паза, измерительного стержня второго индикатора 9 с другим торцом 16 ступицы и измерительного стержня третьего индикатора 10 с основанием. Снимают показания Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 соответственно на первом, втором и третьем индикаторах. Определяют отклонение ширины паза от настроенного значения по показанию Δ_1 первого индикатора. Определяют отклонение симметричности $\Delta_{\text{сим}}$ паза относительно торцов 14 и 16 ступицы по полуразности между показанием Δ_2 второго индикатора и суммой показаний Δ_1 и Δ_3 соответственно первого и третьего индикаторов, т. е. $\Delta_{\text{сим}} = [\Delta_2 - (\Delta_1 + \Delta_3)]/2$.

Разработанное устройство, по сравнению с известным [4], не содержит центрирующий узел и второй кронштейн; снабжено такими дополнительными конструктивными элементами как каретка, плоскопараллельные пружины, измерительный щуп и третий индикатор; имеет ряд иных связей конструктивных элементов и их иных размещений, что позволяет измерять три параметра корпусной детали: отклонения высоты ступицы, ширины паза и его симметричности относительно торцов ступицы. Это расширяет технологические возможности устройства и повышает производительность измерения.

Устройство может быть использовано на машиностроительных предприятиях при измерении параметров корпусных деталей с пазами, например, корпусов буксы вагона.

Библиографический список

1. Палей, М.А. Допуски и посадки: Справочник в 2 ч. / М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. СПб.: Политехника, 2009. Ч. 1. 530 с.
2. Метрологическое обеспечение производства. Каталог компании «ИНТРА ТУЛ». С. 58–59. URL: www.intratool.ru (дата обращения 30.11.2019).
3. Архаров, А.П. Измерение параметров паза, не сопряженного с отверстием детали / А.П. Архаров // Вестник ТвГТУ. 2015. № 1 (27). С. 71–73.
4. Пат. № 2559169 Российская Федерация. Устройство для измерения параметров паза, не сопряженного с отверстием детали / А.П. Архаров, К.С. Любимов; заявл. 20.05.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 22.
5. Пат. № 2693881 Российская Федерация. Способ измерения параметров корпусной детали / А. П. Архаров; заявл. 16.10.2018; опубл. 05.07.2019, Бюл. № 19.
6. Пат. № 2693882 Российская Федерация. Устройство для измерения параметров паза и ступицы корпусной детали / А.П. Архаров; заявл. 15.10.2018; опубл. 05.07.2019, Бюл. № 19.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИКА И ФИЗИКА ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА

В.В. Измайлов, Л.Е. Афанасьева, М.В. Новоселова ТОПОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	4
А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 3. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ НАНОДИСПЕРСНЫХ МАСЕЛ	10
В.В. Измайлов, Т.В. Иванова, В.А. Рябов ВЛИЯНИЕ МИКРОТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН	16
И.В. Горлов, А.Н. Болотов, М.Г. Рахутин ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОРФЯНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОТКАЗНОСТИ	22
С.М. Слободян, Д.А. Барчуков УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ ИЗНОСА ИГЛЫ ЗОНДА СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОСКОПА	30
Д.Г. Громаковский, А.Л. Сикиотов, С.В. Шигин РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ	37
Д.А. Никуленко, М.Д. Шубин (научн. рук-ль В.В. Измайлов) МАЯТНИК ОБЕРБЕКА В ЛАБОРАТОРНЫХ ПРАКТИКУМАХ ПО ФИЗИКЕ И ТРИБОЛОГИИ	45
В.В. Гараников ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СПЛАВА АМг6 ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ	51
А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА	55
А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ TiN НА ДЕФОРМАЦИЮ В ЛОКАЛЬНОМ СТАТИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ	60
М.М. Матлин, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин ОБЗОР МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ	64

ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ

С.П. Рыков, В.В. Мешков В.В., Кузьминский ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ	70
---	----

С.А. Войнаш, В.А. Соколова, В.А. Марков, А.В. Чураков, Г.К. Парфенопуло АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ МОТОРНО-ТРАНСМИССИОННОЙ УСТАНОВКИ КОЛЕСНОГО ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО ТРАКТОРА	76
Е.В. Полетаева, Ф.Х.Арсланов, Т.В.Иванова МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА ПРОИЗВОДСТВА ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	79
Е.В. Полетаева, И.В. Горлов, О.С. Филин ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЗАПУСКА ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА	86
А.Г. Воронина, О.А. Колачикова, В.В. Лебедев, Н.М. Пузырев ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ОТ ШУМОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	93
О.А. Колачикова, В.В. Лебедев, Н.А. Филиппова, Н.М. Пузырев АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ГРУЗОПОДЪЕМНЫМИ МАШИНАМИ	97
А.М. Пузырев, Л.В. Козырева, В.А. Мартемьянов К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ КАЧЕСТВА ОБУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЫ ТРУДА НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	101
А.П.Архаров ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАЗА И СТУПИЦЫ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ	107

