

Ким К. К., Иванов С. Н.
K. K. Kim, S. N. Ivanov

**МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ СТЕПЕНИ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОПОРЫ**

**THE METHOD OF THE NONDESTRUCTIVE DIAGNOSIS INVESTIGATING
THE RUSTINESS DEGREE OF THE BEAM REINFORCEMENT**

Ким Константин Константинович – член-корреспондент АЭН РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург). 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – member of Russian Academy of electrical engineering, Dr. Sc. (Eng), professor, Head of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg). 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). 681021, Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, 1-60. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). 681021, Komsomolsk-on-Amur, Kotovsky str. 1-60. E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматривается новый метод неразрушающей диагностики степени ржавости железной арматуры железобетонной опоры, основанный на различии значений диэлектрической проницаемости ржавого и «здорового» железа. Поэтому измеряя электрическую емкость участка опоры, можно судить о наличии ржавой железной арматуры и степени ее ржавости. Для повышения достоверности результатов диагностики предлагается на краях рабочих измерительных электродов устанавливать дополнительные электроды, электрически не связанные с измерительными электродами.

Summary. We consider the new method of the nondestructive diagnosis that investigates the rustiness degree of the beam reinforcement. The method is based on the difference of the rusty and "healthy" iron permittivity magnitude. Therefore, we can make conclusions about the presence of a rusty beam and the degree of its rustiness by measuring the electric capacity of the beam reinforcement section. In order to increase the reliability of the diagnosis results we suggest setting the additional electrodes on the edges of the working measuring electrodes. These additional electrodes are not connected with the working measuring electrodes.

Ключевые слова: железобетонная опора, ржавость, арматура, диэлектрическая проницаемость, электрическая емкость.

Key words: beam reinforcement, rustiness, iron beam, permittivity, electric capacity.

УДК 621. 317.39(075.8)

Введение

Россия обладает одной из крупнейших железнодорожных сетей в мире. Эксплуатационная протяженность сети железных дорог общего пользования составляет 86 000 км, из которых электрифицировано 43 400 км (постоянный ток 3 кВ – 19 000 км, переменный ток 25 кВ 50 Гц – 24 400 км). По протяженности электрифицированных дорог РФ занимает второе место в мире, уступая только Китаю. Одними из основных элементов электрифицированных участков являются несущие конструкции контактной сети, к числу которых относятся железобетонные опоры, являющиеся ответственными нерезервируемыми элементами. От надежности работы опор контактной сети зависит бесперебойность и безопасность движения поездов [1]. Поэтому вопросам прочности

железобетонных опорных конструкций как на стадии разработки и проектирования, так и на стадии изготовления и эксплуатации всегда уделялось особое внимание.

У ОАО РЖД как у сложного технического производства возникает ряд проблем, связанных с электрокоррозией железобетонных опор контактной сети. Электрокоррозия неизбежно приводит к изломам и падениям опор, и как следствие, к обрыву проводов контактной сети, нарушению электроснабжения и режима движения поездов.

На 01.01.2016 г. состояние опорного хозяйства можно назвать критическим. Парк опор контактной сети составляет 1,75 млн опор. Количество опор контактной сети со сроком эксплуатации свыше 40 лет за 2015 г. увеличилось на 12,7 тыс. шт. и составляет 612,3 тыс. опор (35 % от общего парка). Количество опор контактной сети со сроком службы свыше 50 лет за 2015 г. увеличилось на 56,5 тыс. шт. и составляет 303,8 тыс. опор (17,3 % от общего парка). В настоящее время в ОАО РЖД эксплуатируется 74 486 дефектных опор контактной сети (4,26 % от общего парка).

Основным элементом железобетонной опоры является железная арматура, на которую воздействуют электрические токи, обусловленные функционированием электрифицированных дорог постоянного тока. Здесь в качестве обратного провода используются рельсы, которые не изолированы от земли, следовательно, через шпалы и балластный слой путевого полотна часть тягового тока «уходит» в землю, а затем в металлические сооружения, находящиеся в земле, например, в металлическую арматуру опоры. Такие токи называют блуждающими, и они могут достигать 50-60 % тягового тока. Их величина зависит от потенциала рельсов относительно земли, сопротивления рельсов и климатических условий. Наибольшее значение блуждающих токов наблюдается на станционных путях, где имеются относительно малые значения переходных сопротивлений между рельсами и землей и большие величины тяговых токов. Так как электрическая проводимость металлов в сотни миллионов раз больше проводимости почв и грунтов, всякая металлическая конструкция, находясь в зоне распространения блуждающих токов, привлекает на себя эти токи, передает их как проводник более низкого омического сопротивления и возвращает их через землю к источнику постоянного тока. Элемент металлической конструкции, из которой ток выходит в землю, является анодом, а часть сооружения, где постоянный ток входит в него, выполняет функции катода. В анодных зонах при условии контакта конструкции с влажной почвой блуждающие токи вызывают электролиз и приводят к коррозионным разрушениям сооружения. В связи с обозначенной проблемой особое звучание приобретает вопрос о возможности диагностирования состояния железной арматуры в опорах контактной сети, не нарушая её целостную структуру с последующими рекомендациями о возможности дальнейшей эксплуатации последних.

Метод диагностики и устройство для его реализации

На кафедре «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения разработан новый метод неразрушающей диагностики степени ржавости железной арматуры железобетонной опоры, основанный на различии значений диэлектрической проницаемости ржавого и «здорового» железа. Если ϵ "чистого железа" составляет ~ 10 , то ϵ ржавого железа ~ 3 . Поэтому, согласно известной прямопропорциональной зависимости электрической емкости от диэлектрической проницаемости, электрическая емкость участка опоры, содержащего ржавую арматуру, будет отличаться от емкости участка, содержащего «здоровую» арматуру.

Для практической реализации метода был создан измеритель электрической емкости [2] на основе функционального генератора [3; 4] (см. рис. 1).

Данный измеритель емкости позволяет существенно расширить область применения емкостных датчиков. Предлагаемый измеритель при малых размерах обладает чувствительностью лабораторных приборов. Имеющиеся образцы прибора при испытаниях показали чувствительность лучше 0,01 пФ. Причем задача добиться наибольшей чувствительности не ставилась, и при уменьшении предела измерений менее 10 пФ чувствительность прибора может быть увеличена.

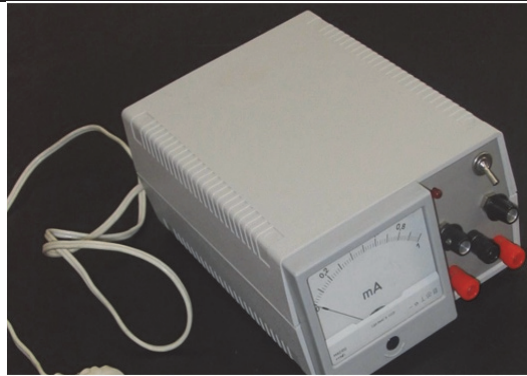


Рис. 1. Измеритель электрической емкости

Технические характеристики измерителя:

– измерительная характеристика	линейная
– диапазон измерений, пФ	0,01...10 ⁶
– рабочая частота, Гц	100...5·10 ⁴
– предел допускаемой погрешности, %	0,5...1,0
– напряжение питания, В	±1,5...±9
– потребляемый ток, мА	2,0...9,0
– масса, кг, не более	0,3.

Следует отметить, что габаритные размеры, масса и другие технические характеристики определяются используемой элементной базой и могут быть улучшены. Шкала измерителя может быть проградуирована в процентах степени ржавости арматуры. Градуировка осуществляется с использованием образцов, содержащих арматуру с известной степенью ржавости. Вход измерителя соединяется с двумя рабочими электродами (емкостной датчик), которые прикладываются к боковой поверхности диагностируемого участка опоры. Для подтверждения работоспособности прибора были изготовлены шесть кубических бетонных блоков с размерами: 15×15×15 мм. Блок № 1 – содержал два ряда по 8 арматурных стержней (без коррозии), блок № 2 – содержал два ряда по 8 арматурных стержней (с 2 % коррозии); блок № 3 – два ряда по 8 арматурных стержней (с 4 % коррозии); блок № 4 – два ряда по 8 арматурных стержней (со 6 % коррозии); блок № 5 – два ряда по 8 арматурных стержней (с 8 % коррозии); блок № 6 – два ряда по 8 арматурных стержней (с 10 % коррозии). Результаты измерений емкости блоков приведены на рис. 2, где n – номер блока. Кривая 1 – при отсутствии дополнительных электродов, кривая 2 – при наличии дополнительных электродов.

Проблемы

Из-за того, что внешняя поверхность диагностируемого участка опоры имеет различные неровности, каверны и т.п., невозможно было добиться полного прилегания рабочих электродов к боковой поверхности диагностируемого участка опоры, что влияет на достоверность диагностирования. В связи с этим была разработана новая конструкция рабочих электродов, которые были выполнены полыми и заполнены металлическим порошком. Внутренние стенки электродов, прикладываемые к боковой поверхности опоры, изготавливались из эластичного материала, а наружные стенки выполнялись жесткими из электропроводящего материала [5].

Следует также отметить, что на достоверность диагностики при ограниченных продольных размерах рабочих электродов большое влияние оказывает искажение электростатического поля на их краях.

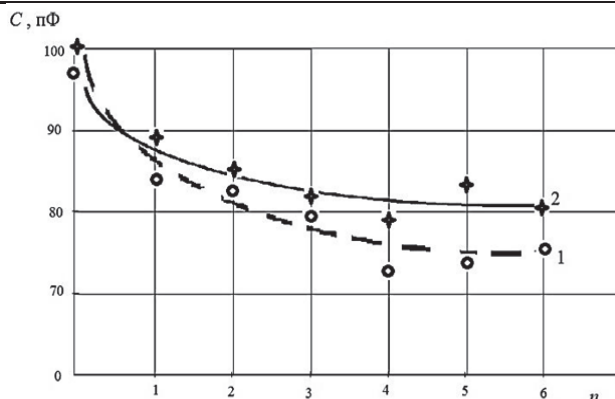


Рис. 2. Зависимости емкости блока от процентного содержания ржавчины

Для уменьшения этого искажения было предложено использовать дополнительные электропроводящие электроды, электрически не связанные с рабочими электродами и расположенные на их краях [6]. Использование дополнительных электропроводящих электродов приводит к более однородному характеру распределения электростатического поля в зазоре между рабочими электродами, так как «искривление» линий электростатического поля происходит не на краях рабочих электродов, а на краях дополнительных электродов. В результате зависимость емкости диагностируемого участка опоры от диэлектрической проницаемости среды межэлектродного пространства становится более линейной. На рис. 3 приведена функциональная схема процесса диагностики.

Силовые входы 1 измерителя емкости 2 с индикатором 3 подключены к выходам источника питания 4. Измерительные входы 5 измерителя емкости 2 соединены с рабочими электродами 6. Электроды 6, выполненные полыми, причем, верхние и нижние края 7 выполнены жесткими, а внутренняя стенка 8, которой электрод 6 прижимается к участку опоры 9, изготовлена из эластичного материала, например из резины. Наружная стенка 10 электрода 6 выполнена из электропроводящего материала, например из алюминия или меди. Электроды 6 заполнены металлическим порошком 11, например алюминиевым, железным или медным. К верхним и нижним краям 7 электродов 6 жестко прикреплены пластины 12, изготовленные из диэлектрика, например фторопласта или гетинакса, к которым жестко прикреплены дополнительные электроды 13 из электропроводящего материала, например меди или алюминия. Участок опоры 9 содержит диагностируемую железную арматуру 14. На рис. 4 показана картина поля при отсутствии (а) и при наличии (б) дополнительных электродов.

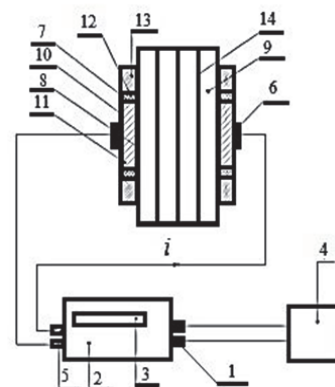


Рис. 3. Схема процесса диагностики

Работа устройства происходит следующим образом. Обкладки, состоящие из электрода 6 и дополнительных электродов 13, прижимаются к участку опоры 9, который содержит железную арматуру 14. Внутренняя стенка 8 электрода 6 деформируется в соответствии с рельефом поверхности участка опоры 9, и порошок 11 заполняет пустоты поверхности. Наличие дополнительных электродов 13 приводит к тому, что силовые линии электростатического поля под рабочими основными электродами 6 не «искривляются». «Искривление» линий электростатического поля происходит на краях дополнительных электродов. Затем измеряется емкость участка опоры 9 между электродами 6, которая связана с диэлектрической проницаемостью материала опоры сле-

дующим соотношением $C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}$, где ε – относительная проницаемость участка опоры δ , ε_0 – электрическая постоянная; S – площадь рабочего электрода; d – расстояние между электродами.

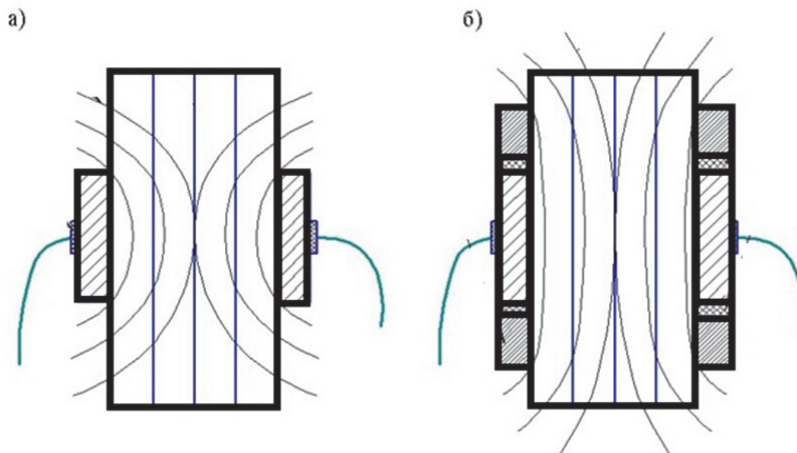


Рис. 4. Распределение силовых линий электростатического поля

Влияние дополнительных электродов на однородность электростатического поля

Для подтверждения выдвигаемой в работе гипотезы были проведены расчёты электростатического поля в пакете ELCUT. Данная программа позволяет проводить двумерное и трёхмерное моделирование электростатических полей, используя метод конечных элементов. Электростатическое поле формируется за счёт приложенного потенциала объёмными, поверхностными и точечными зарядами.

Положительный электрод имеет потенциал $\varphi_0 = 1$ В, а отрицательный – $\varphi_0 = -1$ В и они находятся они в воздушном пространстве с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{возд}} = 1$. Между электродами располагается железобетонный фрагмент участка опоры с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{бетон}} = 4,5$. Дополнительные электроды имеют нулевой потенциал $\varphi_0 = 0$ В, т.к. они изолированы от рабочих электродов. Геометрические параметры системы: высота рабочих электродов – $h_{\text{раб.эл}} = 300$ мм, высота дополнительных электродов – $h_{\text{доп.эл}} = 100$ мм, высота участка опоры – $h_{\text{опоры}} = 2950$ мм, диаметр опоры – $d_{\text{опоры}} = 460$ мм.

Задача сводится к анализу электростатических полей в двухмерной постановке и трёхмерной постановке. Задача формулируется в виде уравнения Пуассона относительно скалярного электрического потенциала φ . Свойства среды считаются изотропными с постоянной диэлектрической проницаемостью. В расчётах используется декартовая система координат и единицы длины – сантиметры. На внутренних и внешних границах области действует граничное условие Дирихле, которое задает известное значение электрического потенциала φ_0 в вершине или на ребре модели (например на электродах 1, 2). Очерчиваются границы расчётной области, где в натуральную величину изображаются элементы расчёта (размер опоры, электроды). Для корректности расчётов принимаются границы расчётной области, превышающие размеры исследуемого поля в 3...5 раз.

Пространство исследуемого электростатического поля содержит следующие среды: воздух, диэлектрик (гетинакс), бетон и железная арматура, а также два электрода, изготовленные из одного материала. В качестве параметров учитываются относительные диэлектрические проницаемости бетона, воздуха и гетинакса, значения ε_r которых соответственно составляют 4,5; 1; 6. Плотность электрического заряда равна нулю, $\rho = 0$ Кл/м³.

По произведённым расчетам получено распределение потенциала и напряжённости, приведенное на рис. 5 и 6.

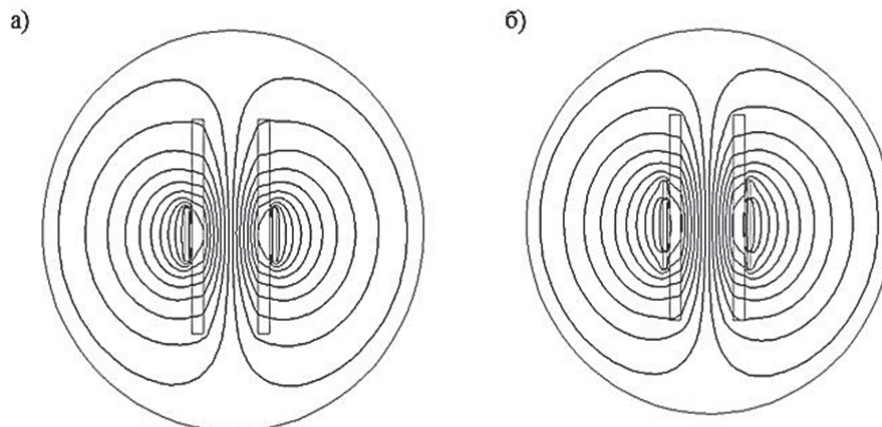


Рис. 5. Картина электростатического поля, полученная с помощью пакета ELCUT:
а – без дополнительных электродов; б – с дополнительными электродами

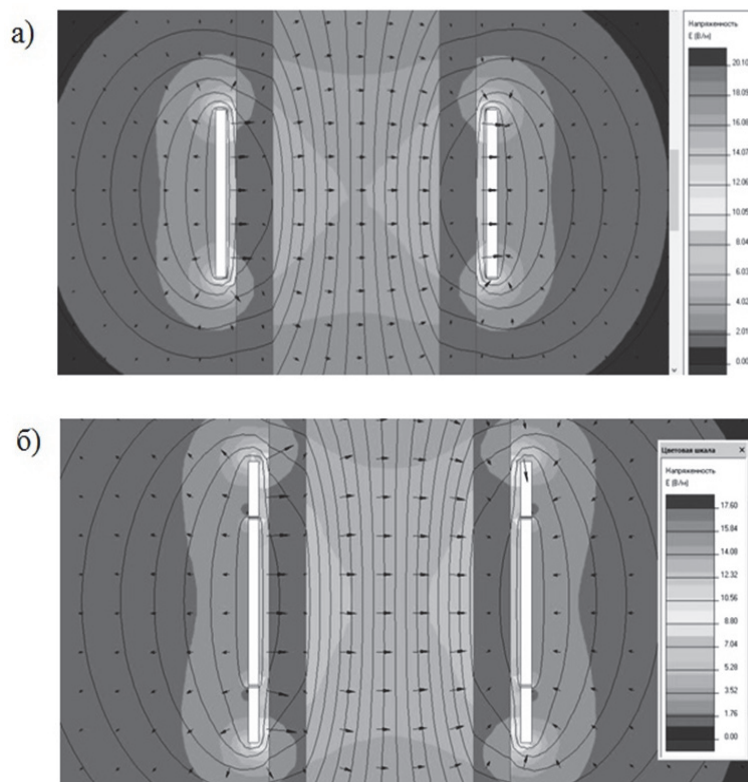


Рис. 6. Линии напряжённости:
а – без дополнительных электродов; б – с дополнительными электродами

Экспериментальное исследование электростатического поля

Для верификации описанного метода выполнено экспериментальное исследование электростатического поля (в плоскопараллельной постановке) в теле опоры с помощью электропроводящей бумаги. Исследование проводилось с основными электродами из холоднокатаной отожжённой листовой стали шириной 284 мм, толщиной 1,5 мм, воздушный зазор между рабочими электродами и алюминиевыми дополнительными электродами 3 мм. Размеры дополнительных электродов: ширина 11 мм, толщина 2 мм.

Распределение электростатического поля между рабочими электродами 1 приведено на рис. 7. Сплошными линиями показаны эквипотенциальные линии при наличии дополнительных электродов 3, штриховыми – при их отсутствии. Позициями 2 показаны диэлектрические вставки.

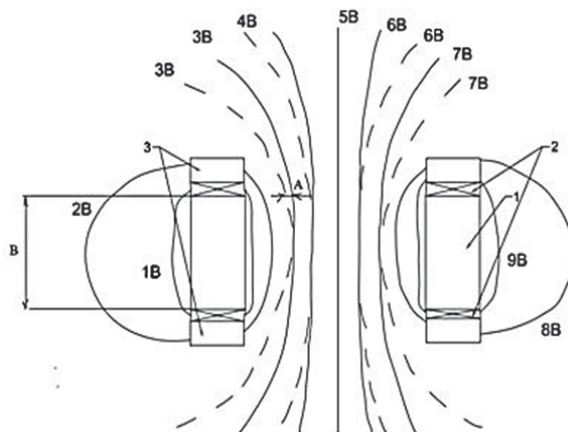


Рис. 7. Картина электростатического поля, полученная с помощью электропроводящей бумаги

«Выпрямление» эквипотенциальных линий 3 В (Δ) на краях рабочих электродов из-за введения дополнительных электродов составило

$$\Delta = \frac{A}{B} \cdot 100 \% = \frac{3}{38} \cdot 100 \% \approx 7,8 \%, \quad (1)$$

где A – отклонение эквипотенциальных линий, полученных при отсутствии дополнительных электродов от линий, полученных при наличии дополнительных электродов; B – высота рабочих электродов.

Экспериментальное исследование электростатического поля выполнено в проводящей среде (моделирование электростатического поля с помощью электролитической ванны). При проведении экспериментального исследования использована аналогия между электростатическим полем в диэлектрике и полем постоянного тока в проводящей среде при одинаковых граничных условиях.

Уравнения поля постоянного тока в проводящей среде будут аналогичными уравнениям электростатического поля в диэлектрике. При этом величинам δ ; I ; γ (плотность тока, ток, удельная проводимость соответственно) в первом поле соответствуют величины во втором поле D ; q ; ε (электрическое смещение, количество электричества, диэлектрическая проницаемость). Если форма поверхностей электродов будет такая же, как форма поверхностей заряженных тел, и если соотношение между токами I , вытекающими из электродов, будет таким же, как соотношение между зарядами q на поверхности тел, то картина поля тока будет такой же, как картина электростатического поля. Основная задача, выполняемая в ходе экспериментального исследования, сводится к получению данных о реальном распределении потенциала между полукруглыми электродами и оценке степени однородности электростатического поля на оси симметрии такой конструкции.

Экспериментальная установка содержит диэлектрическую ванну с электропроводящей жидкостью (вода). В ванне установлены рабочие электроды, подключенные к источнику тока и создающие в воде электрическое поле, которое подлежит исследованию. Для определения потенциала в конкретной точке используется измерительный зонд, подключенный к вольтметру. Для автоматического воспроизведения перемещений зонда на чертеже использовалась пантографная система. Эквипотенциальная поверхность формируется в виде набора точек на листе бумаги, найденных с помощью зонда и пантографа. Если через электролит течет постоянный ток, то условие однородности проводящей среды нарушается. В результате разложения электролита в около

электродных областях происходит поляризация электродов, связанная с выделением пузырьков водорода, кислорода и других продуктов электролиза. Электролит становится неоднородным, что приводит к искажению поля. Для исключения этого на электроды подавалось напряжение 100 В промышленной частоты 50 Гц. Для уменьшения искажения поля, вносимого зондом, применяется увеличенная модель.

На рис. 8 представлены картины поля между рабочими электродами, полученные в результате моделирования с помощью электролитической ванны. Сплошными линиями показаны эквипотенциальные линии при отсутствии дополнительных электродов, а штриховыми – при их наличии.

«Выпрямление» эквипотенциальных линий (Δ) на краях рабочих электродов из-за введения дополнительных электродов, рассчитанное по (1), составило приблизительно 11,5 %.

Выводы

1. Из-за разности величин диэлектрических проницаемостей подверженного коррозии и «чистого» железа можно по величине электрической емкости участка железобетонной опоры, содержащей диагностируемую железную арматуру, судить о степени коррозии последней.

2. Для повышения достоверности диагностики следует использовать дополнительные электроды, электрически не связанные с рабочими электродами и установленные на краях последних.

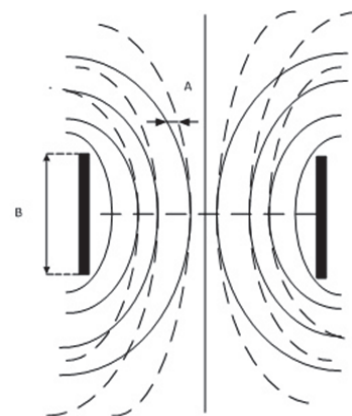


Рис. 8. Картина поля, полученная с помощью электролитической ванны

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Анализ влияния конструкционных факторов на надежность герметичных электромеханических преобразователей / Д. А. Голоколос, Н. С. Карпова, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1(16). – С. 29-34.
2. Свидетельство на полезную модель 26850, Российская Федерация МПК⁷ G 01N 23/18. Электрический дефектоскоп / Ким К. К., Барбарович В. Ю., Смирнов В. А., Паленик В. И.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2002116598/20; заявл. 24.06.2002; опубл. 20.12.2002. Бюл. № 35. – 4 с.
3. Пат. 2221327 Российская Федерация, МПК⁷ H03K3/02. Функциональный генератор / Ким К. К., Барбарович В. Ю., Асмус В. И.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2001121641/09; заявл. 01.08.2001; опубл. 10.01.2004. Бюл. № 1. – 4 с.
4. Ким, К. К. Автономный измеритель малых электрических емкостей с линейной характеристикой / К. К. Ким, В. Ю. Барбарович // Измерительная техника. – 2003. – №7. – С. 27-31.
5. Пат. 49268 Российская Федерация МПК⁷ B65G 67/30 B65G 69/20. Дефектоскоп / Ким К. К.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2005118494/22; заявл. 14.06.2005; опубл. 10.11.2005. Бюл. № 31. – 4 с.
6. Пат. 155814 Российская Федерация МПК⁷ B65G 67/30 B65G 69/20. Дефектоскоп / Ким К. К., Титова Т. С., Мушков Е. С., Полуниин И. С.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2015115343/28; заявл. 23.04.2015; опубл. 20.10.2015. Бюл. № 29. – 4 с.

Петров М. Р., Петрова А. Н., Петров В. М.
M. R. Petrov, A. N. Petrova, V. M. Petrov

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИПЕРЭЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА В СЛУЧАЕ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ТОНКИХ СТЕРЖНЕЙ

THE STUDY OF HYPER ELASTIC MATERIAL CHARACTERISTICS IN CASE OF THIN ROD STRUCTURE CALCULATION

Петров Михаил Радиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и анализ структур и процессов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktpm@knastu.ru.

Mr. Mikhail R. Petrov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanics and Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktpm@knastu.ru.

Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru.

Ms. Anna N. Petrova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Software and Computer Application Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru.

Петров Владислав Михайлович – студент группы 5ПЭб-1 Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru.

Mr. Vladislav M. Petrov – a student of 5PE-1, Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru.

Аннотация. Статья посвящена исследованию деформационных характеристик гиперэластичного материала (резины), определению математической модели характеристик для расчетов конструкций из исследуемого материала.

Summary. The article investigates the deformation hyper elastic material characteristics, i.e. rubber, and determines a mathematical model to calculate the characteristics of test material structure.

Ключевые слова: деформационные характеристики гиперэластичного материала, большие деформации, шарнирно-стержневые конструкции.

Key words: deformation hyper elastic material characteristics, large deformation, hinged-rod structure.

УДК 539.3

На сегодняшний день одной из актуальных задач является расчет шарнирно-стержневых систем на нагрузки выше критических при работе конструкции в экстремальных условиях, при больших перемещениях узлов.

По сравнению с металлами эластомеры (натуральный и синтетический каучук) стали известны около 160 лет назад. Если эластомеры смогут занять заслуженное место в техническом применении, их изучение станет полным и всесторонним, как, например, изучение стали и других широко применяемых металлов.

Большие перемещения узлов шарнирно-стержневой конструкции могут возникать, например, в случае, когда конструкция выполнена из гиперэластичного материала, в том числе из резины.

Гиперэластичный материал (резина) обладает нелинейными физическими характеристиками. Кроме того, из-за больших перемещений конструкции, выполненные из такого материала, об-

ладают значительной геометрической нелинейностью, что создает определенные трудности при расчете таких конструкций классическими методами, например, методом конечных элементов.

Сложность расчетов конструкций из подобных материалов заключается в нестабильности характеристик материала из-за сложной внутренней структуры резины. Сложность заключается в том, что резина – полимер. Молекулярная структура резины представляет собой объемную сетку, способную к высокоэластичным деформациям благодаря невысокой плотности поперечных связей. При деформации резинового образца происходит переориентация молекул резины, вследствие чего изменяются физические свойства материала.

Поэтому перед началом расчета конструкции была проведена серия экспериментов с целью исследования характеристик материала. Основные физико-механические свойства материала были определены в результате испытаний на одноосное растяжение. Испытания проводились на установке, представленной на рис. 1.



Рис. 1. Испытание на одноосное растяжение

В результате проведения серии экспериментов была получена характеристика материала $P(\Delta)$, показанная на рис. 2.

Как видно из графика, зависимость $P(\Delta)$ нелинейная, следовательно, нелинейной будет зависимость $\sigma(\epsilon)$, которая должна быть аппроксимирована либо ломаной (несколькими прямыми), либо нелинейными функциями, например степенной (см. рис. 3) или полиномом n -го порядка.

Полученные зависимости были использованы в математической модели шарнирной стержневой системы [1] в методе контурных уравнений. Для сравнения использовалась линейная и степенная аппроксимации. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Аналогичные расчеты конструкции проводились в одной из систем автоматического проектирования: MSC.Marc. Она используется для анализа и оптимизации конструкций в авиакосмических, автомобильных, биомедицинских, химических, потребительских, строительных, электронных, энергетических и обрабатывающих отраслях промышленности. Программу MSC.Marc можно использовать для автоматического нелинейного анализа контактных проблем, которые часто

встречаются при обработке резины и металла давлением, а также во многих других сферах деятельности [2; 3].

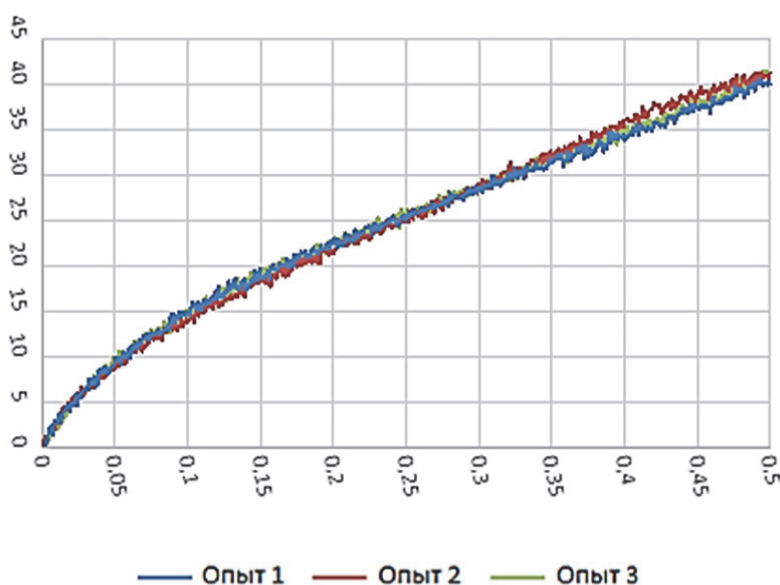


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $P(\Delta)$

Рассмотрены модели материала Neo-Hookean, Mooney, Mooney-Rivlin и Ogden. Каждая модель основывается на концепции функций энергии деформации, что обеспечивает эластичность материала.

При решении контактной задачи предполагается, что трение отсутствует. В работе использовался метод расчета Larg Disp. Расчеты проводились с различными характеристиками материала.

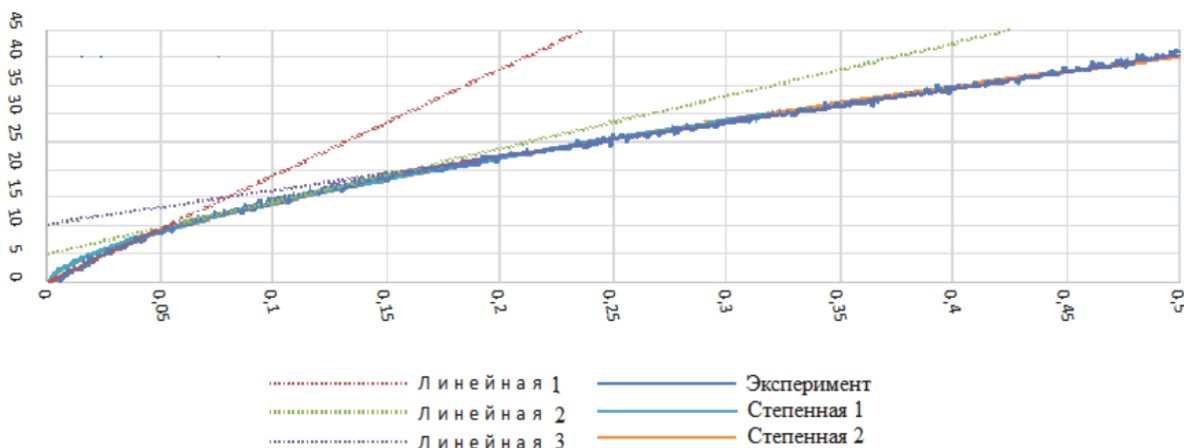


Рис. 3. Аппроксимация экспериментальных зависимостей $\sigma(\epsilon)$

Использовался метод расчета различных коэффициентов для задания гиперупругой модели материала с помощью модуля Experimental data fitting.

В ходе работы были рассмотрены 2 геометрические модели:

1. свойства материала в линейной модели;
2. для задания гиперупругого материала в нелинейной модели Mooney был использован график экспериментальных данных.

Сравнение применения различных математических моделей материалов и методов расчета проводилось по перемещению узла конструкции. За эталон принимались результаты экспериментальных замеров.

После определения перемещения узлов конструкции тремя способами (двумя расчетными и одним физическим) были получены четыре результата. В табл. 1 указано отклонение результатов расчета от результата, полученного в ходе физического эксперимента.

Таблица 1

Перемещение узла конструкции, мм

Аппроксимация	Метод конечных элементов, MSC.Marc	Метод контурных уравнений	Эксперимент
Линейная	191	94	82
Нелинейная	197	87	

Расхождение с результатом эксперимента у метода контурных уравнений составило 6 %, у метода конечных элементов – 192 %.

Широко распространенный метод конечных элементов (МКЭ) позволяет с высокой точностью рассчитывать конструкции из тонких стержней, используя балочные элементы типа BEAM. Такие балочные элементы не предусматривают гиперупругих характеристик материала и в основном применяются с идеально упругой или упруго-пластической характеристикой материала. Использование балочных элементов для расчета гиперупругих материалов может дать хорошие результаты лишь при относительно небольших деформациях с идеально упругой (линейно-упругой) характеристикой материала, где коэффициент Пуассона максимально приближен к 0,5. Для более точного расчета конструкции из гиперупругих материалов в МКЭ применяют объемные элементы типа тетраэдров, октаэдров и другие с характеристиками материала, определенными полиномом Муни – Ривлина. Полином Муни – Ривлина не всегда может обеспечить высокую точность и в различных вариациях его компонентов имеет значительные отклонения.

Модель Муни – Ривлина дает хорошее соответствие между специфической моделью материала и экспериментальными данными в случае расчета объемных трехмерных объектов. Однако коэффициенты этой модели могут быть получены только в результате многоосевых испытаний опытного образца, что в случае тонкого стержня представляет трудности технического характера.

Таким образом, расчет гиперупругих материалов в конечно-элементных пакетах, в том числе MSC.Marc/Mentat, использует полином Муни – Ривлина, который для наиболее точного результата требует большого количества различных испытаний материала. Поэтому для получения более точного результата необходимо провести дополнительные испытания.

Особенностью метода контурных уравнений является то, что он позволяет рассчитывать шарнирно-стержневые конструкции из гиперэластичного материала с нелинейными характеристиками и большими перемещениями узлов, состоящие из тонких стержней. Метод контурных уравнений также дает хорошие результаты при расчете шарнирно-стержневых систем, состоящих не из гиперэластичного материала, но имеющих большие перемещения узлов, например, гидротехнических сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическая модель шарнирной стержневой системы с большими перемещениями узлов / Н. А. Тарануха, К. В. Жеребко, А. Н. Петрова, М. Р. Петров // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 3. – С. 12-18.
2. Marc® 2010 User's Guide / «MSC.Software Corporation», 2005.
3. Experimental Elastomer Analysis / «MSC.Software Corporation», 2005.



Смагин В. А., Гусеница Я. Н.
V. A. Smagin, Y. N. Gusenitsa

МЕТОД РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВИНЕРА – ХОПФА ПРИ ГЛАДКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ, СОСТАВЛЯЮЩИХ ЕГО КОМПОНЕНТ

WIENER-HOPF SOLVER WITH SMOOTH PROBABILITY DISTRIBUTIONS OF ITS COMPONENTS

Смагин Владимир Александрович – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург). E-mail: va_smagin@mail.ru.

Mr. Vladimir A. Smagin – Honored Science Worker of the Russian Federation, Doctor of Engineering, Professor, Professor of Faculty of Metrological Maintenance of Arms, Military and Special Equipment, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St.Petersburg). E-mail: va_smagin@mail.ru.

Гусеница Ярослав Николаевич – кандидат технических наук, преподаватель кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург). E-mail: yaromir226@mail.ru.

Mr. Yaroslav N. Gusenitsa – PhD in Engineering, Lecturer of Faculty of Metrological Maintenance of Arms, Military and Special Equipment, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St.Petersburg). E-mail: yaromir226@mail.ru.

Аннотация. Рассматривается метод приближенного решения интегрального уравнения Винера – Хопфа при гладких распределениях вероятностей, составляющих его компонент. Метод основывается на гипердельтной аппроксимации исходных распределений. Использование в ней преобразования Фурье и характеристической функции позволяет работать в методе со случайными величинами, сосредоточенными на всей вещественной оси абсцисс.

Summary. The Wiener – Hopf solver with smooth probability distributions of its component is presented. The method is based on hyper delta approximations of initial distributions. The use of Fourier series transformation and characteristic function allows working with the random variable method concentrated in transversal axis of absc.

Ключевые слова: интегральное уравнение Винера – Хопфа, гипердельтная аппроксимация распределений, коррекция, преобразование Фурье, характеристическая функция, начальные моменты, скачок распределения функции ожидания.

Key words: Wiener – Hopf integrated equation, hyper delta approximation of distributions, correction, Fourier series transformation, characteristic function, the initial moments, jump of distribution of expectation function.

УДК 519.651

Введение

К рассматриваемым в настоящей статье задачам по духу и направленности можно отнести достаточно небольшое число публикаций. Для примера отметим некоторые из них.

В [10] рассматриваются вопросы решения интегрального уравнения Винера – Хопфа на основе использования двух вариантов аппроксимации, одна из которых проводится на основе теоремы дискретизации Шеннона. Указываются границы применимости и приложения к задачам статистики.

В [8] рассмотрены новый класс обобщенных вариационных неравенств и новый класс обобщенных уравнений Винера – Хопфа, включающих многозначные и не расширяющие отображения в вещественном Гильбертовом пространстве.

В статье [9] рассматривается применение методов аппроксимации для решения операторных уравнений, содержащих дискретный оператор Винера – Хопфа. Приводятся оценки погрешности и затухающие свойства решений, получаемых с точки зрения некоторых гладких пространств.

В работе [6] рассматриваются некоторые приложения дельта-функции Дирака к решению задач статистики. При этом некоторые известные результаты обобщаются на случай двух переменных.

В докладе [7] рассматривается применение смесей дельта-функций Дирака (гипердельтного распределения) для аппроксимации плотностей функций распределений в аналитической форме. Предлагаются субоптимальные решения и процедура вывода, основанная на последовательном разбиении пространства состояний и размещении компонентов с помощью локальной оптимизации.

В статье [1] приведен пример практического применения описанных выше методов аппроксимации для оценивания надежности программного обеспечения при ограниченном объеме испытаний.

Гипердельтная аппроксимация нормального распределения

Известно, что нормальное распределение вероятностей может быть представлено дискретным, гипердельтным распределением в аналитическом виде [5]. С учетом трех начальных моментов это представление имеет вид

$$f(t) \approx C_1 \Delta(t - T_1) + C_2 \Delta(t - T_2),$$

где $f(t) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma) \exp(-(t-m)^2/2\sigma^2)$ – плотность вероятности аппроксимируемого распределения; C_1, C_2 – вероятности, $C_1 > 0, C_2 > 0, C_1 + C_2 = 1$; $\Delta(t)$ – дельта-функция Дирака, а $T_1 > 0, T_2 > 0$ – положительные постоянные величины. Неизвестные значения $C_i, T_i, i=1,2$ находятся в результате решения четырех нелинейных уравнений, составленных методом моментов. В результате решения получают

$$f_a(t) = \frac{1}{2} (\Delta(t - m + \sigma) + \Delta(t - m - \sigma)),$$

где m, σ – параметры аппроксимируемого распределения.

В статье [3] показано, что если хотя бы один из параметров $T_i, i=1,2$ принимает отрицательное значение, то есть располагается на отрицательном луче вещественной оси абсцисс, тогда можно составить аналогичную [5] систему нелинейных уравнений. В ней для определения искомых параметров применяются не обычные производные от дельта-функций, а производные от характеристических функций:

$$\begin{aligned} C_1 \varphi_1(0) + C_2 \varphi_2 &= 1, \\ C_1 \frac{\varphi_1'(0)}{i} + C_2 \frac{\varphi_2'(0)}{i} &= v_1, \\ C_1 \frac{\varphi_1''(0)}{i^2} + C_2 \frac{\varphi_2''(0)}{i^2} &= v_2, \\ C_1 \frac{\varphi_1'''(0)}{i^3} + C_2 \frac{\varphi_2'''(0)}{i^3} &= v_3. \end{aligned} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) использованы обозначения характеристической функции и ее производных, а также мнимая единица $i = \sqrt{-1}$.

Система уравнений (1) может иметь как положительные, так и отрицательные значения начальных моментов $v_j, j=1-3$. Выражения для дельта-функций в отличие от $\Delta(t-a)$ могут

принимать вид $\Delta(t+a)$, а функция Хевисайда (для вырожденного распределения вероятностей) – вместо $\varphi(t) = e^{ita} - \varphi(t) = e^{-ita}$, где a – некоторая вещественная постоянная.

Это позволяет распространить метод аппроксимации вероятностей не только для положительных значений, но и для положительных и отрицательных значений случайной величины. Предложенная коррекция метода основывается на применении вместо преобразования Лапласа преобразования Фурье и характеристической функции.

Пример аппроксимации двух нормальных распределений

Пусть заданы две плотности вероятности нормального распределения. Первая характеризует время между заявками, поступающими в одноканальную систему массового обслуживания:

$$a(x) = (1/\sqrt{2\pi\delta}) \exp(-(x-n)^2 / 2\delta^2) \quad (2)$$

с параметрами $n = 20h$, $\delta = 5h$. Вторая характеризует время обслуживания:

$$b(x) = (1/\sqrt{2\pi\sigma}) \exp(-(x-m)^2 / 2\sigma^2) \quad (3)$$

с параметрами $m = 10h$, $\sigma = 3h$. Требуется представить выражения (2) и (3) в виде гипердельтовых распределений. Для распределения (2) будем иметь

$$a_a(x) \approx \frac{1}{2} (\Delta(x-15) + \Delta(x-25)). \quad (4)$$

Для распределения (3) получим

$$b_a(x) \approx \frac{1}{2} (\Delta(x-7) + \Delta(x-13)). \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) получены из формулы, приведенной в [5]:

$$f(x) \approx \frac{1}{2} (\Delta(x-m+\sigma) + \Delta(x-m-\sigma)). \quad (6)$$

Изображения Лапласа (4) и (5) соответственно будут равны:

$$a_a^*(s) \approx \frac{1}{2} (e^{-15s} + e^{-25s}), \quad b_a^*(s) = \frac{1}{2} (e^{-7s} + e^{-13s}),$$

где $*$, s – символ преобразования и переменная Лапласа.

Характеристическая функция для формул плотностей вероятностей

Характеристическая функция плотности вероятности $f(x)$ определяется выражением

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{itx} f(x) dx,$$

в котором $i = \sqrt{-1}$. Если случайная величина сосредоточена на положительной полуоси абсцисс, тогда характеристические функции для (2) и (3) принимают вид:

$$\varphi_a(t) = \frac{1}{2} (e^{it(n-\delta)} + e^{it(n+\delta)}), \quad \varphi_b = \frac{1}{2} (e^{it(m-\sigma)} + e^{it(m+\sigma)}).$$

Если случайная величина сосредоточена на отрицательной полуоси абсцисс, тогда характеристические функции для (2) и (3) имеют вид:

$$\varphi_a(t) = \frac{1}{2}(e^{-it(n-\delta)} + e^{-it(n+\delta)}),$$

$$\varphi_b(t) = \frac{1}{2}(e^{-it(m-\sigma)} + e^{-it(m+\sigma)}).$$

Характеристическая функция для суммы случайных величин, имеющих плотности вероятностей (2) и (3), определяемая плотностью вероятностей

$$c_+(x) = \int_0^x b(x-z)a(z)dz,$$

принимает вид

$$\varphi_+(t) = e^{it(n-m)} \cos(\delta t) \cos(\sigma t),$$

а характеристическая функция для разности случайных величин, определяемая плотностью вероятностей

$$c_-(x) = \int_0^\infty b(x+z)a(z)dz, \quad (7)$$

принимает следующий вид:

$$\varphi_-(t) = e^{-(n-m)it} \cos(\delta t) \cos(\sigma t).$$

Распределение максимума в теории случайных процессов

Рассмотрим решение задачи о распределении максимума на примере системы массового обслуживания для одноканальной системы $G/G/1$, приведенное в [2]. Основное рекуррентное соотношение для данной системы массового обслуживания представляется в виде

$$w_{n+1} = \max[0, w_n + u_n], \quad (8)$$

где w_{n+1} – время ожидания обслуживания поступающего требования в систему с номером $n+1$, а $u_n = x_n - t_n$ – разность между временем обслуживания n -го требования и промежутком времени между моментами поступления n -го и $n+1$ -го требований. Обе случайные величины S_n и t_n независимы от номера n и друг от друга и распределены с плотностями вероятностей $b(t)$ и $a(t)$, а их разность распределена с плотностью вероятности

$$c(t) = \int_0^\infty b(t+u)a(u)du.$$

Определяемая функция распределения времени ожидания требования в системе при условии, что существует ее стационарный предел, представляется уравнением

$$W(t) = \begin{cases} \int_0^t W(t-u)c(u)du, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases}$$

В книге [2] рассматривались способы преодоления трудностей при изучении системы $G/G/1$ путем построения приближений и границ для точных решений. Одним из них обсуждалось довольно грубое дискретное приближение. Идея этого подхода состояла в изменении входных распределений $A(t)$ и $B(t)$ таким образом, чтобы основное рекуррентное соотношение

(8) позволяло получать прямое аналитическое решение для распределения времени ожидания. Итеративное решение этого уравнения достаточно просто, когда обе входные случайные величины представляются дискретными случайными величинами. Они в моменты времени kt ($k = 0, 1, 2, \dots$, с единицей отсчета времени τ) принимают только ненулевые значения. Тогда можно записать предел рекуррентной процедуры и получить систему линейных разностных уравнений, которая может быть решена методом z -преобразований и получено точное распределение времени ожидания.

Но если случайные величины непрерывные, то возникает задача – как непрерывные случайные величины аппроксимировать дискретными таким образом, чтобы сохранялось существо искомого решения. Вопрос о том, как выбрать такое приближение, еще не исследован. Естественная рекомендация состоит в том, чтобы согласовать как больше моментов исходных распределений, начиная с первого момента. Исследование точности такого приближения только начинается [2].

В настоящей статье делается попытка проиллюстрировать этот метод на примере аппроксимации нормальных распределений с точностью до трех начальных моментов. Используя гипердельтное распределение, можно определить моменты скачков входных распределений. Распределения вероятностей в соответствии с (4) и (5) будут равны:

$$A(t) = \begin{cases} 0, & t < n - \delta, \\ \frac{1}{2}, & n - \delta \leq t < n + \delta, \\ 1, & t \geq n + \delta, \end{cases}$$
$$B(t) = \begin{cases} 0, & t < m - \sigma, \\ \frac{1}{2}, & m - \sigma \leq t < m + \sigma, \\ 1, & t \geq m + \sigma. \end{cases}$$

Так как берутся только дискретные случайные величины, то можно записать $a(k) = P[t_n = k\tau]$ и $b(k) = P[x_n = k\tau]$. Дискретные функции могут быть представлены и как плотности вероятностей с импульсами в соответствующих точках, как нами было показано в первом разделе статьи.

Если пользоваться уравнением (8), то можно найти распределение вероятностей для u_n . Определив $c(k) = P[u_n = k\tau]$, так как $u_n = x_n - t_n$, то очевидно, что $c(k)$ в общем виде представляется сверткой [2]:

$$c(k) = a(-k) * b(i) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a(-k+i)b(i). \quad (9)$$

Если $a(k)$ и $b(k)$ содержат небольшое число членов, то свертка легко вычисляется. Но остается нерешенным вопрос о том, как выбрать единицу отсчета времени τ .

Пример 1. Представим плотности исходных распределений (2) и (3), используя формулу (6) в виде дискретных распределений. Эти распределения применительно к свертке (9) показаны на рис. 1. Распределение $a(-k)$ показано на отрицательной полуоси. Для уменьшения размера изображения масштаб по оси абсцисс изменен, численные значения интервалов между дельта-функциями, указанные в (4) и (5), реальным значениям не соответствуют.

Для выполнения рекуррентной процедуры в уравнении (8) предположим, что начальная величина $w_0 = 0$. Кроме того, определим вероятность $p_n = P[w_n = k\tau]$. Теперь можно применить рекурсию, состоящую в выполнении операций, описанных уравнением

$$w_{n+1}(y) = \pi(w_n(y) * c(y)),$$

в котором π – оператор, заменяющий плотность вероятности своего аргумента путем замены всей вероятности, связанной с отрицательными значениями, на импульс в точке $y = 0$, площадь которого равна этой вероятности. Предельное решение следует из уравнения:

$$w(y) = \pi(w(y) * c(y)).$$

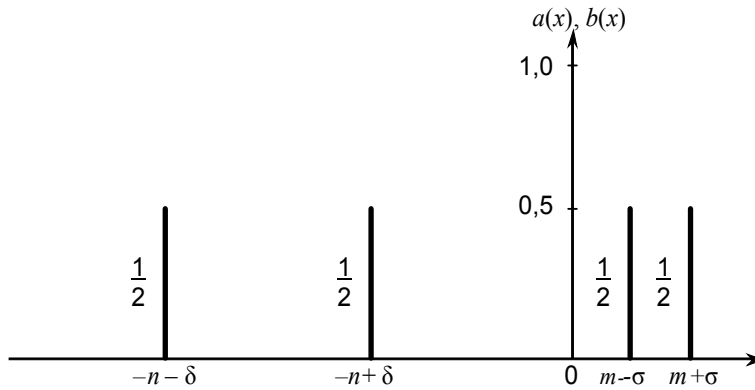


Рис. 1. Дискретное представление исходных распределений

Оно дает стационарную плотность вероятности времени ожидания в системе. Эта плотность должна быть такой, что, когда она образует свертку с $c(y)$ и результирующая плотность переносит свою вероятность с отрицательной оси в импульс, расположенный в нуле, результирующая плотность имеет такой же вид, как и $w(y)$, с которой начиналось рассмотрение.

Для численного расчета примем следующие значения параметров плотностей: для $a(x)$ $n = 11h$, $\delta = 3h$, а для $b(x)$ $m = 10$, $\sigma = 3h$. В этом случае выражение для свертки (9) принимает вид

$$c(x) = \frac{1}{4}(\Delta(x-2) + \Delta(x+5) + \Delta(x-7)).$$

График этого выражения показан на рис. 2.

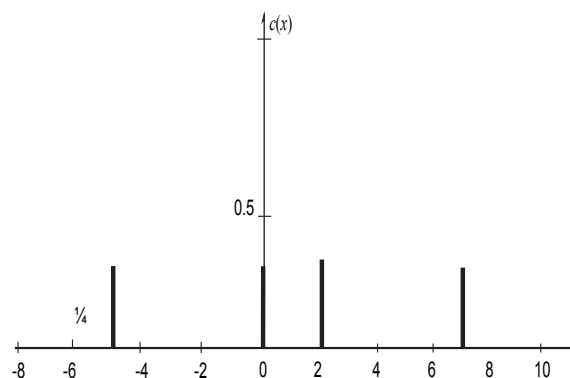


Рис. 2. Графическое изображение дискретной свертки

Далее поступая, как описано в начале примера, и полагая $k = x$, можно записать выражение для определения величины вероятности на k -м шаге:

$$p(k) = \frac{1}{4} p(k+5) + \frac{1}{4} p(k) + \frac{1}{4} p(k-2) + \frac{1}{2} p(k-7), \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Граничное уравнение для $p(0)$ равно

$$p(0) = \frac{1}{4}p(0) + \frac{1}{4}p(5) + \frac{1}{4}p(-2) + \frac{1}{4}p(-7), \quad k=0.$$

Как утверждается в [2], «теперь имеем знакомую задачу решения системы линейных разностных уравнений. К такому же результату приводит метод факторизации Винера. Достоинство описанного здесь метода состоит в том, что он использует в явном виде дискретную природу случайных величин. В обоих случаях трудная часть решения состоит в нахождении корней многочлена [корни знаменателя $P(z) = \sum_k p(k)z^k$, тогда как в методе факторизации спектра находятся корни выражения $A^*(-s)B^*(s)-1$]».

В данном разделе статьи показано, как превратить непрерывные задачи в дискретные, для которых применимы довольно простые методы. Это проиллюстрировано решением задачи при обоих нормальных распределениях случайных величин между требованиями и обслуживанием. Однако вопросы о выборе шага дискретизации и адекватности приближения требуют дальнейшего исследования. Здесь мы показали, как переходить от непрерывных распределений к дискретным на основе гипердельтного распределения. Для выполнения численного расчета распределения времени ожидания в системе при любых непрерывных распределениях мы рекомендуем процедуру со сверткой, детально изложенную в [2].

Об определении распределения максимума в непрерывном виде

Решение уравнения (8) на основе гипердельтной аппроксимации возможно не только в дискретном, но и непрерывном виде. Принцип такого подхода заключается в том, чтобы использовать для решения уравнения (8) не плотности вероятностей исходных распределений $a(x)$ и $b(x)$, а их характеристические функции, а более конкретно – характеристическую функцию их разностной свертки (7). Представляя начальную и все последовательные вероятности состояний P_n системы массового обслуживания также характеристическими функциями и осуществляя процесс последовательного их свертывания с характеристической функцией разности исходных случайных величин, а также выполняя на каждом шаге сдвиг отрицательной вероятности в начало координат, получим на положительном луче оси абсцисс характеристическую функцию случайной величины времени ожидания. Для рассмотренных в нем двух нормальных распределений выражение для характеристической функции свертки плотности разности случайных величин будет равно

$$\varphi(t) = e^{-(n-m)it} \cos(\sigma t)(\cos \delta t). \quad (10)$$

Характеристическая функция начальной единичной вероятности состояния СМО будет принимать вид

$$P(0) = 1. \quad (11)$$

Далее следует применять алгоритм вычисления, аналогичный дискретному алгоритму, рассмотренному в [2].

Шаг 1. Произвести свертку характеристических функций (10) и (11).

Шаг 2. По полученной свертке вычислить вероятность попадания случайной величины на отрицательную часть оси абсцисс. Полученную вероятность сосредоточить в нуле оси абсцисс.

Шаг 3. Получить составную плотность вероятности на положительной полуоси абсцисс и найти для нее характеристическую функцию.

Шаг 4. Умножить полученную характеристическую функцию на характеристическую функцию (10).

Далее шаги 2 – 4 необходимо последовательно повторять до тех пор, пока плотность вероятности на положительной полуоси абсцисс не будет изменяться, то есть совпадать с предшествующей на ней плотностью вероятности.

После этого следует использовать полученную плотность вероятности для нахождения стационарной функции распределения времени ожидания обслуживания поступающего требования в систему массового обслуживания.

Вместо исходных нормальных распределений могут использоваться любые распределения, плотности вероятностей которых позволяют получать на основе гиперэкспоненциальной аппроксимации необходимые характеристические функции. Выполнение сверток сводится к перемножению характеристических функций.

Пример 2. Далее мы покажем, как вычислить значения распределения времени ожидания в начале первого и второго циклов – характерные разрывные значения, присущие началу распределения времени ожидания.

Положим, что заданы значения параметров указанных нормальных распределений: $n = 11h$, $\delta = 2h$, $m = 10h$, $\sigma = 3h$. Тогда скачок распределения времени ожидания в начале первого цикла

определится как $1 - \rho_0 = \int_{-\infty}^0 c(z) dz$ и численно будет равен $1 - \rho_0 = 0,609$. Соответствующая

характеристическая функция равна $\varphi(t) = e^{-(n-m)it} \cos(\sigma t) (\cos \delta t)$. Вычислим начальные моменты $c(x) : v_1 = -1h$, $v_2 = 14h$, $v_3 = -40h$, и решая систему уравнений гипердельтной аппроксимации, найдем значения искомым параметров $C_1 = 0,5$, $C_2 = 0,5$, $T_1 = -4,606h$, $T_2 = 2,606h$. Составим по ней аппроксимационную функцию $F(x) = 0,5\Phi(x - 2,606) + 0,5\Phi(x + 4,606)$, а затем найдем условную функцию распределения для положительной полуоси $F_1(x, \tau) = \frac{F(x + \tau) - F(\tau)}{1 - F(\tau)}$.

Обе функции эти показаны на рис. 3.

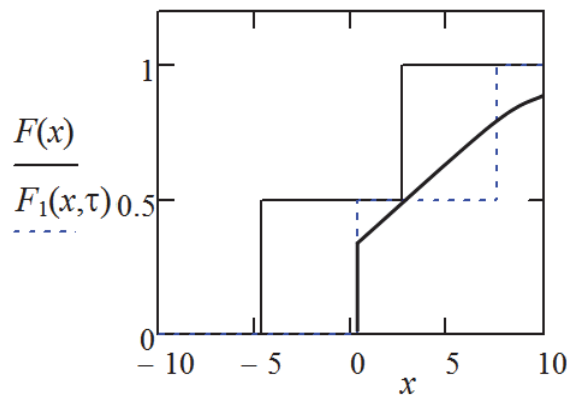


Рис. 3. Аппроксимационная и условная функции распределения

Величина $\tau = -5$. Нетрудно записать выражение для условной плотности вероятности, расположенной на положительной полуоси:

$$c_1(x) = 0,5\Delta(x) + 0,5\Delta(x - 7,606). \quad (12)$$

Соответствующая (12) характеристическая функция имеет вид:

$$\varphi_1(t) = 0,5(1 + e^{7,606it}).$$

Умножая характеристические функции $\varphi(t)$ и $\varphi_1(t)$, получим общую характеристическую функцию

$$\varphi_{\Sigma}(t) = 0,5 \cos(2t) \cos(3t) e^{-it} (1 + e^{7,606it}). \quad (13)$$

Используя (13), найдем значения начальных моментов и параметров новой гипердельтной аппроксимации: $v_1 = 2,802 h$; $v_2 = 35,32 h^2$; $v_3 = 252,96 h^3$; $C_1 = 0,5$; $C_2 = 0,5$; $T_1 = -2,438 h$; $T_2 = 8,044 h$.

Запишем выражения для плотности вероятности и функции распределения:

$$C(x) = \frac{1}{2}(\Delta(x + 2,438) + \Delta(x - 8,044)),$$

$$C(x) = \frac{1}{2}(\Phi(x + 2,438) + \Phi(x - 8,044)).$$

Далее составим условную функцию распределения для положительной полуоси абсцисс и вычислим ее значения при $\theta = -2,438 h$:

$$C_1(x, \theta) = \frac{C(x + \theta) - C(\theta)}{1 - C(\theta)}.$$

Графики обеих функций представлены на рис. 4.

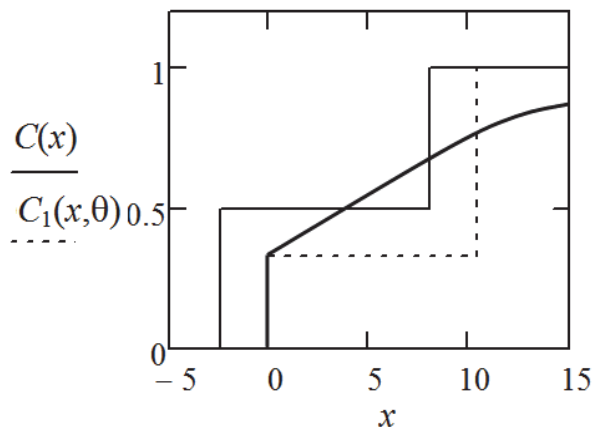


Рис. 4. Функция распределения и условная функция распределения

Начальный скачок функции распределения времени ожидания составит $1 - \rho_1 = C_1(0,1;0) = 0,333$.

Подобным образом, согласно указанному пошаговому алгоритму, могут быть определены следующие итеративные значения скачков распределения времени ожидания. Более того, при проведении дополнительного исследования, может быть составлен алгоритм вычисления стационарного значения величины скачка функции распределения времени ожидания системы массового обслуживания.

Поведение функции за скачком будет определяться дискретной аппроксимацией функции распределения. В данной статье исследование выполнено только с точностью до трех начальных моментов. Для получения непрерывной функции распределения времени ожидания следует слева направо соединить середины скачков непрерывной плавной линией.

Заключение

Решению интегрального уравнения Винера-Хопфа распределения максимума случайного блуждания, когда координата процесса может принимать как положительное, так и отрицательное значение, посвящено большое число исследований. Однако представляет определенные трудности его решение, когда оба исходных распределения являются непрерывными и не тривиальными.

Основываясь на идее дискретного решения уравнения, предложенного в книге [2], в настоящей статье развивается дискретный метод решения уравнения именно для непрерывных

исходных распределений. В его основе лежит предложенный автором метод гипердельтной аппроксимации произвольных распределений [5]. Но для того, чтобы этот метод был пригоден не только для положительных значений случайной величины, а был распространен на всю вещественную ось, он был скорректирован применением в нем преобразования Фурье и характеристической функции. Это позволило получить итеративное численное решение уравнения Винера-Хопфа при трех начальных моментах обеих нормальных исходных распределений. Приводятся для иллюстрации решения частные примеры, подтверждающие работоспособность метода.

Метод может быть применен для произвольных гладких распределений вероятностей. Количество начальных моментов, привлекаемых в методе, может быть увеличено. Это приведет к повышению точности решения. Однако численный процесс решения усложнится. Хотя с практической точки зрения иногда ограничение может быть оправдано и малым числом моментов.

Примененный аппарат использования преобразования Фурье и характеристической функции, на наш взгляд, может быть в дальнейшем усовершенствован с целью получения решения уравнения в замкнутом аналитическом виде.

Источник [4] следует рассматривать как дополнительный для ознакомления с предшествующим исследованием авторов в данной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусеница, Я. Н. Обобщенная модель разнотипных программных ошибок для оценивания надежности программного обеспечения / Я. Н. Гусеница // «Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли». – 2015. – Т. 7, № 5. – С. 18-23.
2. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями: пер. с англ. / Л. Клейнрок. – М.: Мир. – 1979. – 600 с.
3. Смагин, В. А. Коррекция гипердельтного распределения в теории случайных процессов / В. А. Смагин // Информация и космос. – 2015. – № 4. – С. 60-64.
4. Смагин, В. А. Аппроксимационный метод расчета разомкнутых сетей массового обслуживания / В. А. Смагин, Г. В. Филимоныхин // АВТ. – 1986. – № 4. – С. 28-33.
5. Смагин, В. А. О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения / В. А. Смагин, Г. В. Филимоныхин // АВТ. – 1990. – № 1. – С. 25-31.
6. Chakraborty, S. Some Applications of Dirac's Delta Function in Statistics for More Than One Random Variable. Applications and Applied Mathematics / S. Chakraborty // An International Journal (AAM). – 2008. – Vol. 3. – Pp. 42-54.
7. Klumpp, V. Dirac Mixture Trees for Fast Suboptimal Multi-Dimensional Density Approximation / V. Klumpp, U. D. Hanebeck // Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Seoul, Republic of Korea. – 2008. – Pp. 593-600.
8. Mansotra, P. Wiener – Hopf Equation Technique for Generalized Variational Inequalities and Nonexpansive Mappings / P. Mansotra, B. S. Komal // Applied Mathematical Sciences. – 2012. – No. 18. – Pp. 869-878.
9. Nowak, M. A. Approximation methods for a class of discrete Wiener – Hopf equations / M. A. Nowak // Opuscula Mathematica. – 2009. – Vol. 29, No. 3. – Pp. 271-288.
10. Payandeh Najafabadi, A. T. An Approximate To Solution Of A Subclass Of Wiener – Hopf Integral Equation / A. T. Payandeh Najafabadi, D. Kucerovsky // Proceedings of the World Congress on Engineering – 2009. – Vol 2. – Pp. 1262-1267.



Жилин С. Г., Комаров О. Н., Соснин А. А., Потянихин Д. А.
S. G. Zhilin, O. N. Komarov, A. A. Sosnin, D. A. Potianikhin

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРЕССОВОК ИЗ ПОЛИМЕРНОГО ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА

SPECIAL FEATURES OF THE FORMATION OF POROUS STRUCTURE IN COMPACTS MADE OF DISPERSED POLYMERIC MATERIAL

Жилин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: zhilin@imim.ru.

Mr. Sergey G. Zhilin – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of laboratory, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: zhilin@imim.ru.

Комаров Олег Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Mr. Oleg N. Komarov – PhD in Engineering, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Соснин Александр Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sosnin@imim.ru.

Mr. Aleksander A. Sosnin – PhD in Engineering, Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sosnin@imim.ru.

Потянихин Дмитрий Андреевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: potyanikhin@mail.ru.

Mr. Dmitrii A. Potianikhin – PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: potyanikhin@mail.ru.

Аннотация. Получение выплавляемых моделей, применяемых в точном литье, формовкой порошков на основе воскообразных материалов позволяет повысить размерно-геометрические характеристики отливок преимущественно за счет устранения усадочных дефектов. Однако при формировании массивных элементов прессовок материал модели после снятия нагрузки упруго релаксирует. Кроме того, в ряде случаев наблюдается неравномерное распределение плотности в различных участках таких прессовок. Необходимость поиска оптимальных режимов формирования прессовки с минимальной анизотропией и, следовательно, минимальным значением упругого отклика уплотненного тела после снятия нагрузки определяет актуальность отраженных в работе исследований. В работе представлены результаты экспериментального определения варианта уплотнения порошкового тела, состоящего из однокомпонентного полимерного материала, с учетом его упругого отклика после снятия нагрузки. По результатам проведенных экспериментов построены зависимости температуры материала, находящегося в зоне контакта мундштука с прессформой от давления прессования. На основе экспериментальных данных установлено влияние теплофизических параметров процесса уплотнения порошкового тела на формирование усадки и упругого отклика материала прессовки.

Summary. Production of investment patterns for precision casting by molding of powders based on waxy materials makes it possible to improve dimensional and geometric properties of castings mainly at the expense of shrinkage defect elimination. However, during the formation of compact massive elements the pattern material relaxes elastically after load removal. In addition, non-uniform density distribution in different parts of the compacts is observed in a number of cases. The necessity of finding the optimal regimes of compact formation with minimal anisotropy, and therefore minimal value of elastic aftereffect of compacted porous body after load removal

determines the relevance of this study. In this paper we introduce experimental determination of one variant of powder body compaction and subsequent elastic aftereffect due to load removal. Investigated powder body consists of single-component polymeric material. In accordance with the results of the experiments the dependence of material temperature in contact area between the die and the mold on compacting pressure was obtained. It was experimentally determined the influence of thermophysical properties of powder body compaction process on shrinkage formation and elastic aftereffect of compact material.

Ключевые слова: полимерный порошок, распределение плотности, пористость, прессовка, напряжение, температура, упругий отклик, анизотропия.

Key words: polymeric powder, density distribution, porosity, compact, stress, temperature, elastic aftereffect, anisotropy.

УДК 621.74.045

Наиболее распространенным способом получения отливок сложной пространственной конфигурации с высокой размерно-геометрической точностью является литье по выплавляемым моделям [1]. Формирование литой заготовки при использовании такого способа происходит в керамической оболочковой форме, получаемой послойным нанесением огнеупорной суспензии на модельный блок с прикрепленными моделями отливок. Поверхность и свойства выплавляемых моделей во многом определяют качество получаемых по ним отливок. Выплавляемые модели получают заливкой жидкого (или запрессовкой пастообразного) модельного материала в пресс-форму. При таком способе формирования моделей возможно появление ряда дефектов, являющихся следствием связанных, как правило, усадочных процессов, проходящих при охлаждении модельной массы в пресс-форме. Учет этого явления представляется важным при проектировании пресс-форм. Перспективным представляется получение пористых выплавляемых моделей, лишенных недостатков, указанных выше.

К преимуществам альтернативного способа получения точного литья по пористым прессованным выплавляемым моделям можно отнести устранение усадочных явлений, поверхностных неровностей моделей, повышение стойкости керамических оболочковых форм к образованию трещин в процессе выплавления моделей из них [2]. Пористые выплавляемые модели получают формованием порошков модельных композиций различных фракций. Модельные композиции 1 группы представляют собой, как правило, двухкомпонентный сплав парафина и стеарина в различных пропорциях [1]. Прессованные пористые модели отличаются от традиционных выплавляемых моделей физико-механическими свойствами, размерно-геометрической точностью [3, 4]. Плотность пористых моделей на 8-12 % ниже, чем традиционных выплавляемых, полученных запрессовкой жидкого или пастообразного модельного состава в пресс-форму. Так, прочность на изгиб однокомпонентных прессованных моделей с указанной выше плотностью (состоящих из парафина) $\approx 1,0 \dots 1,1$ МПа. Такая прочность представляется допустимой, обеспечивающей конструкционную целостность модельного блока в ходе технологических операций. Модельный блок представляет собой единую конструкцию, состоящую из элементов литниково-питающей системы и выплавляемых моделей отливок. Отливки, получаемые литьем по выплавляемым моделям, должны соответствовать 11–16 квалитетам при допусках на размеры рабочей полости пресс-формы, не превышающих 8–9 квалитетов (ГОСТ 25347-82) [2]. Экспериментально установлено, что размерно-геометрическая точность пористых прессованных моделей простой конфигурации соответствует 9–10-му квалитету, что выше, чем у традиционных выплавляемых моделей.

Однако при получении прессованной модели сложной пространственной конфигурации наблюдается неравномерное распределение плотности в различных ее участках. Так, значение плотности массивных элементов ниже, чем плотность участков с меньшей площадью поперечного сечения. Величина упругого отклика прессовок снижается с увеличением пористости. По завершении релаксации материала такие характеристики конечной прессовки, как плотность, прочность и др., несколько отличаются от расчетных значений.

При прессовании модельного порошка за счет его трения о стенки пресс-формы предположительно происходит оплавление периферийных зон будущей модели и воздух, расположенный в центральных ее участках, не имеет свободного выхода. Параметрами, определяющими величину упругого отклика прессовки при «холодном» уплотнении полимерного дисперсного материала, являются скорость уплотнения, удельное давление, температура материала до уплотнения и после извлечения прессовки из формы. В данном случае для получения прессовки после уплотнения не требуется ее нагрев, т.к. процесс осуществляется за счет появления локальных зон разогрева контактов частиц, из которых состоит порошковое тело. В технологиях холодного прессования, применяемых в порошковой металлургии, принято, что величина частиц порошка лишь частично оказывает влияние на значение давления прессования [5]. Однако ввиду высокой пластичности используемого при получении прессованной пористой модели полимерного порошка его фракция оказывает влияние на величину давления прессования и на упругий отклик сформированного порошкового тела после его разгрузки.

По завершении процесса формирования прессовки воздух, заключенный в пресс-форме с воскообразным модельным материалом, после снятия нагрузки и разъема формы упруго релаксирует. На рис. 1 представлен элемент демонстрационной пресс-формы с прозрачными внешними стенками, в которой воскообразный состав фракции 1,0 мм уплотняли односторонним прессованием. Видно, что после разгрузки прессовка расширяется.

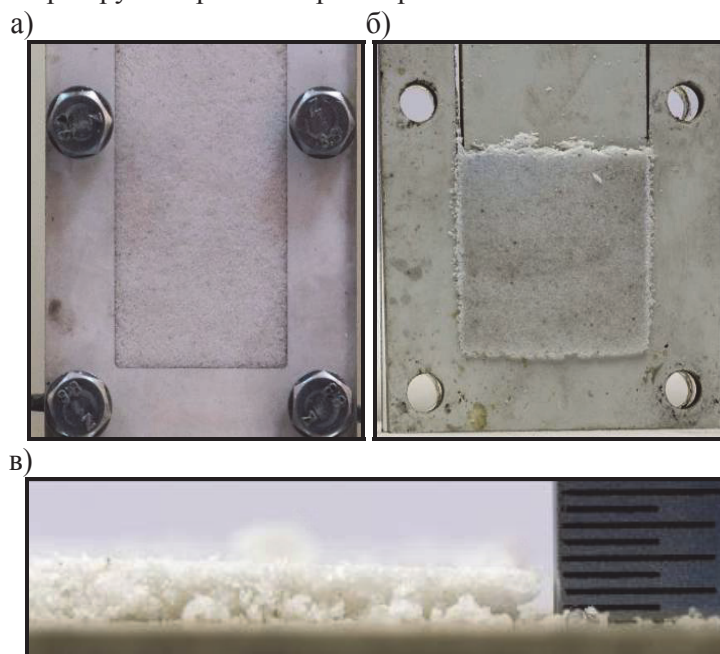


Рис. 1. Упругий отклик прессовки из воскообразного материала фракции 1,0 мм:
 а – уплотненного в демонстрационной пресс-форме до плотности 880 г/см^3 ;
 б – пресс-форма разгружена; в – упругий отклик материала прессовки
 в направлении поперечном прессованию

На величину упругого отклика порошкового тела также влияет фракция материала. На рис. 2 представлены зависимости упругого отклика для порошкового тела, получаемого из воскообразного материала различных фракций.

Из рис. 2 видно, что размеры прессовок после снятия нагрузки увеличиваются в продольном прессовании направлении на 0,7-1,2 %, а в поперечном – на 0,4-0,5 %. Сокращение упругого отклика прессовок возможно введением в исходные композиции порошковых тел растворимых компонентов фракций, соответствующих воскообразному материалу [6].

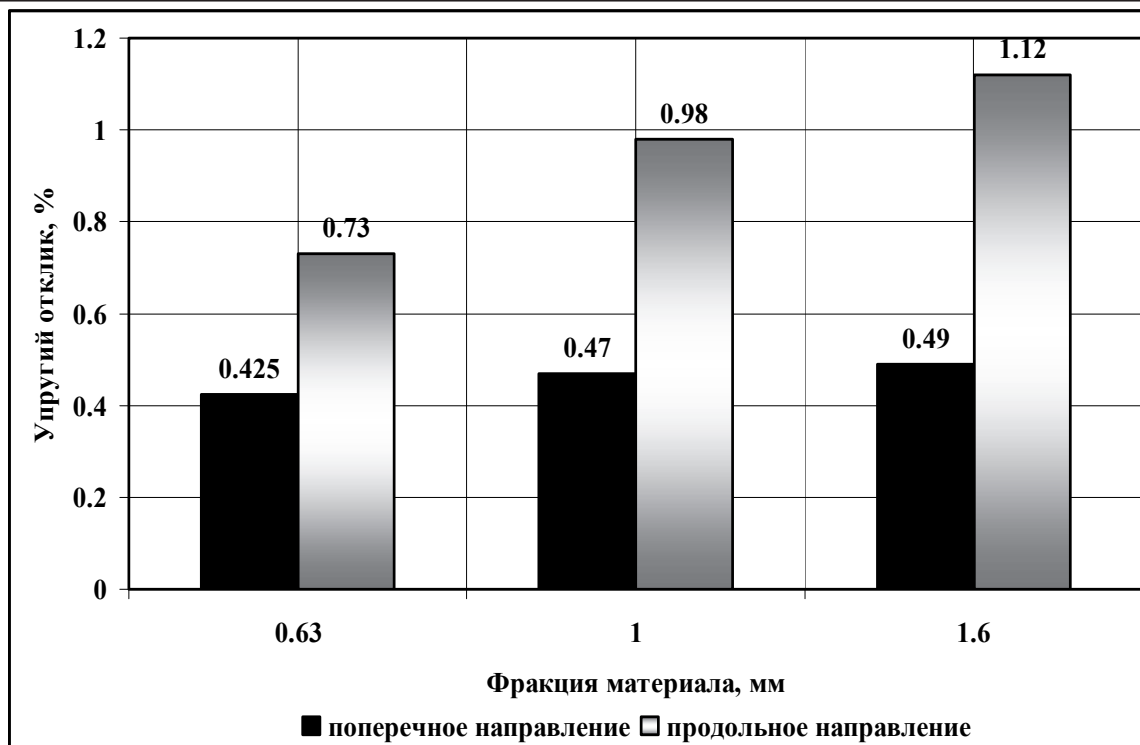


Рис. 2. Зависимость упругого отклика воскообразного модельного материала от фракции:
1 – 0,63 мм; 2 – 1,0 мм; 3 – 1,6 мм

Кроме того, при одноосном прессовании наблюдается неравномерное распределение плотности материала в выплавляемой модели. Так, например, поверхностная твердость и плотность выплавляемой модели в зонах, соприкасающихся с пресс-пуансоном, выше, чем в противоположных участках.

Таким образом, поиск варианта формирования равномерного распределения плотности и, следовательно, физико-механических характеристик и упругого отклика порошкового тела после снятия нагрузки представляется актуальной задачей в настоящем исследовании.

Целью работы является определение оптимального варианта формообразования пористой прессованной модели из полимерных дисперсных композиций, при котором достигается снижение влияния упругого последствия прессовок на их размерно-геометрическую точность с сохранением требуемых прочностных характеристик.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

- определения изменения температуры, возникающего в области сопряжения основного цилиндра и мунштука при уплотнении материала;
- определения упругого отклика длинномерного формованного изделия при различных режимах его формирования из порошкового полимерного материала.

Сложность прогнозирования конечных размеров прессовки в виду наличия упругого отклика материала после снятия нагрузки определяется неравномерностью распределения свойств в ее объеме. Модельный материал в диспергированном виде в процессе прессования проявляет свойства пластичности и текучести. Дисперсную сыпучую среду можно сравнить с жидкостью лишь отчасти. В среде, состоящей из полимерных элементов, определить такие характеристики текучей среды, как скорость движения, давления и плотности, численными методами не представляется возможным. Текучесть однородной смеси, по Г.М. Орлову [7], – это способность элементов предварительно уплотненной смеси к взаимным перемещениям без разрыва связей под действием сил, превышающих сопротивление сдвигу. Таким образом, если порошковый материал не уплотнен до заданной плотности, то отсутствует его текучесть. Так как в объеме подвергающейся прессованию

системы плотность распределяется неоднородно – локальное воздействие указанных выше свойств растет с увеличением деформации системы.

В классической теории механики грунтов [8] пластичность – напряженное состояние, при котором материал способен изменять форму без изменения объема и нарушения сплошности, т.е. сопротивление сдвигу материала изучается в условиях предельного напряженного состояния, соответствующего незатухающим скольжениям (сдвигам) одной части слоя материала над другой. Действующие на материал критические нагрузки при таком состоянии вызывают последовательные сдвиги, приводящие к необратимым деформациям. Экспериментально установлено, что при прессовании порошков воскообразных модельных материалов отдельные их частицы начинают деформироваться при малых давлениях прессования, но и при более значительных давлениях наблюдается горизонтальное перемещение частиц, характерное для первой стадии уплотнения. Поэтому чем пластичнее материал, тем при более низких давлениях начинается уплотнение, связанное с деформацией частиц. Высокая пластичность [9] воскообразного модельного материала определяет формирование изделия при относительно невысоком давлении, поэтому в ряде случаев полученные прессовки легко деформируются даже под действием собственной массы. Переуплотнение, как во всем объеме прессовки, так и в локальных ее участках, определяет наличие упругого последствия материала пористой воскообразной выплавляемой модели в процессе формирования последней [10].

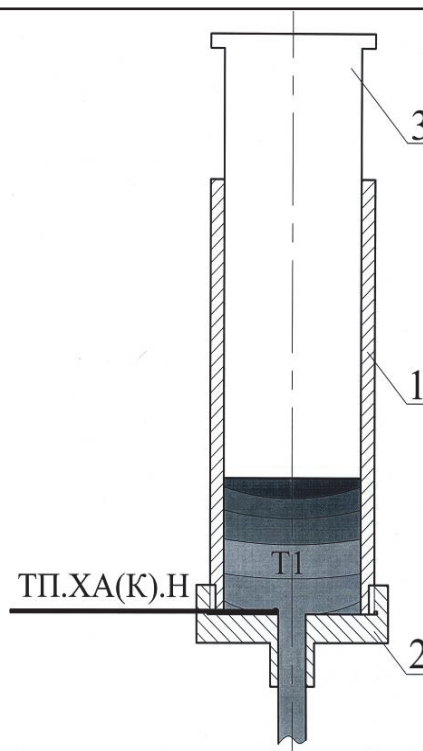
Прочностные характеристики пористых выплавляемых моделей из воскообразных материалов при плотности на 10 % меньшей, чем плотность этого материала в литом состоянии удовлетворяют технологическим требованиям и не оказывают расширяющего воздействия на керамическую форму при выплавлении из нее [6]. Экспериментально установлено, что при формировании прессовки из дисперсного полимерного материала наибольшая плотность достигается в зонах контакта материала с формообразующей поверхностью пресс-формы, а при получении сложной прессовки требуемая плотность во всех ее участках не достигается. Скорость уплотнения полимерных модельных материалов безусловно влияет на появление упругого отклика таких прессовок [2].

Для оптимизации технологических и эксплуатационных свойств выплавляемых моделей в специальных видах литья преимущественно используют многокомпонентные модельные материалы. Однако в ходе эксперимента предпочтительно использовать однокомпонентный материал. В качестве материала для порошкового тела использовали полимерный однокомпонентный материал на основе парафина (Парафины нефтяные твердые. Технические условия. ГОСТ 23683-89) фракций 0,63-1,6 мм. Так как нефтяной парафин является относительно легкоплавким материалом, то среди предлагаемых ГОСТ 23683-89 выбираем парафин марки Т1. К свойствам, определяющим параметры процесса уплотнения этого материала, отнесем: плотность материала, полученного свободной заливкой 930 г/см^3 с учетом распределенной пористости; температуру плавления, определенную при помощи прибора дифференциально-термического анализа Shimadzu DTG-60H $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (ГОСТ 23683-89 регламентирует температуру плавления для парафина марки Т1 $52-58 \text{ }^\circ\text{C}$.); насыпная плотность фракций материала 0,63-1,6 мм составляет, соответственно, $310-330 \text{ г/см}^3$.

Эксперимент заключался в определении температуры и упругого отклика материала прессовки при уплотнении порошка модельного материала, помещенного в стальной цилиндр, как показано на рис. 3. Верхняя часть цилиндра снабжена пресс-пуансоном, который перемещали с различной скоростью. В нижней части цилиндра располагался мундштук с диаметром отверстия меньшим диаметра пресс-пуансона в 5 раз. В зоне контакта мундштука с цилиндром установлена термопара хромель-копель (ТХК), предназначенная для проведения замеров температуры в диапазоне от -20 до $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Каждый эксперимент в серии выполнялся при постоянной скорости перемещения пресс-пуансона. Скорость перемещения пресс-пуансона в серии экспериментов изменялась в диапазоне от $0,25$ до 5 мм/с . По достижении определенной плотности в порошковом теле в результате перемещения пресс-пуансона воскообразный модельный материал поступал в мундштук и выходил из него в виде длинномерной прессовки круглого сечения.

Рис. 3. Схема реализации процесса получения длинномерной прессовки путем уплотнения полимерного дисперсного материала в металлическом цилиндре:

1 – цилиндр; 2 – мундштук;
3 – пресс-пуансон



В ходе эксперимента осуществлялись регистрация температуры в зоне контакта мундштука с формой, а также упругий отклик получаемой длинномерной прессовки на всем ее протяжении с интервалом замера 0,05 м. Величину упругого отклика определяли по формуле

$$O_{\text{упр}} = (A_1 - A_0) \cdot 100 \%,$$

где $O_{\text{упр}}$ – величина упругого отклика, %; A_1 и A_0 – соответственно контролируемые размеры внутреннего диаметра мундштука и внешнего диаметра длинномерной прессовки, мм.

По результатам проведенных экспериментов построены зависимости температур ($^{\circ}\text{C}$) в зоне контакта мундштука с пресс-формой в уплотняемом материале от напряжений (МПа), возникающих при сопротивлении материала уплотнению. Экспериментально установлено, что скорость перемещения пресс-пуансона при уплотнении оказывает существенное влияние на теплофизические условия формирования длинномерной прессовки и упругий отклик уплотненного материала. На рис. 4 представлен график, характерный для уплотнения материала при скорости перемещения пресс-пуансона 1,25 мм/с.

На рис. 4 обозначены позиции: I – зависимость температуры ($^{\circ}\text{C}$) в зоне контакта мундштука с пресс-формой в уплотняемом материале от возникающих при сопротивлении материала уплотнению, напряжений (МПа); II – температура, при которой уплотняемый материал поступает в мундштук; III – элемент длинномерной прессовки на выходе из мундштука. Из рис. 4 видно, что температура растет пропорционально увеличению напряжения в уплотняемом материале, а ее максимум приходится на максимальное значение напряжений. Зарегистрированная в рассматриваемом эксперименте температура, при которой материал начинает поступать в формообразующий элемент цилиндра, составила $23,7^{\circ}\text{C}$, в то время как температура плавления парафина материала – на 50-60 % выше. На температурные данные в представленной схеме уплотнения существенное влияние оказывает материал конструкции, из которого выполнен цилиндр.

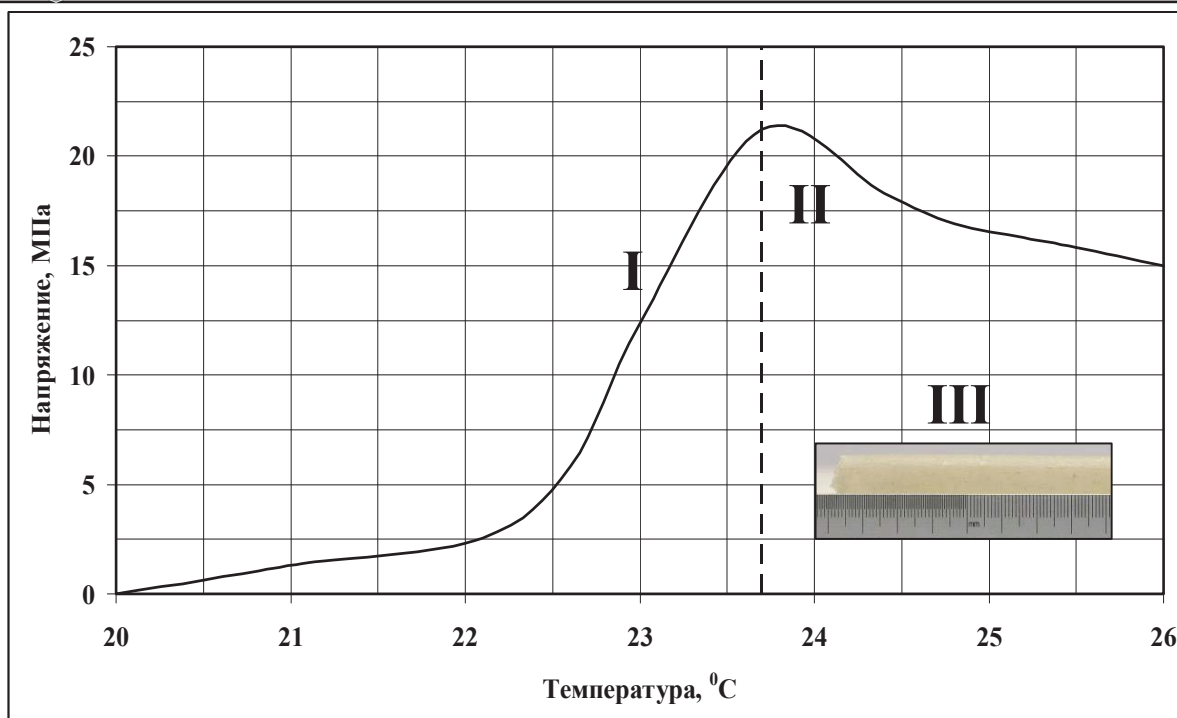


Рис. 4. Зависимость температуры ($^{\circ}\text{C}$) в зоне контакта мундштука с пресс-формой в уплотняемом материале от напряжений (МПа), возникающих при сопротивлении материала уплотнению

Экспериментально установлено, что с увеличением скорости перемещения пресс-пуансона возрастает напряжение: при увеличении скорости с 0,25 до 5 мм/с напряжение возрастает на 30 %. Наименьший упругий отклик (на 12-18 % меньше, чем показано на рис. 2) уплотняемого материала после снятия нагрузки достигается в интервале скоростей перемещения пресс-пуансона 0,25-1,5 мм/с. С увеличением скорости уплотнения в прессовке после снятия нагрузки появляются отрицательные значения величины упругого отклика, характеризующие появление усадочных дефектов, связанных с перегревом материала.

Экспериментально определены варианты формообразования прессовок с учетом упругого отклика, возникающего при различных условиях уплотнения: скорости уплотнения, времени выдержки уплотненного материала в пресс-форме после завершения уплотнения. Таким образом, управление величиной упругого отклика материала уплотняемого порошкового тела возможно путем регулирования нагрузки при прессовании. Теплофизические условия формирования прессовки из порошкового тела без внешнего подведения тепла определяются величиной нагрузки, создаваемой при передаче давления прессования порошковому телу. В ходе эксперимента установлены предпочтительные режимы прессования полимерного дисперсного материала, при которых достигается равномерная плотность в объеме прессовок, позволяющая сократить упругий отклик последних на 12-18 %.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН (проект 15-I-4-018) «Расчетное и опытное совершенствование процессов профилирования и высокоточного литья на основе новых модельных представлений и специальной серии вычислительных экспериментов. (Раздел 4)».

ЛИТЕРАТУРА

1. Литье по выплавляемым моделям / под общ. ред. В. А. Озерова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
2. Жилин, С. Г. Упругий отклик прессовок при деформировании гетерогенных порошковых материалов / С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, И. Г. Сапченко // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2015. – № 4(26) – С. 184-191.

3. Жилин, С. Г. Влияние упругого отклика деформируемого порошкового полимерного материала на размерно-геометрические параметры прессовки / С. Г. Жилин, И. Г. Сапченко // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов (Казань, 20–24 августа 2015 г.). – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. – С. 1383-1385.
4. Жилин, С. Г. Технологические особенности обратимых деформаций при разгрузении прессованных дисперсных полимерных композиций / С. Г. Жилин, И. Г. Сапченко // Материалы VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (Чебоксары, 16-21 июня 2014 г.): в 2 ч. Ч. 1 / под ред. Н. Ф. Морозова, Б. Г. Миронова, А. В. Манжирова. – Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2014. – С.156-158.
5. Ермаков, С. С. Порошковые стали и изделия / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 319 с., ил.
6. Сапченко, И. Г. Об особенностях проектирования и использования оснастки при изготовлении пористых выплавляемых моделей / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, А. И. Евстигнеев // Литейное производство. – 2010. – № 2. – С. 26-31.
7. Орлов, Г. М. Текучесть формовочных смесей / Г. М. Орлов // Теория формовки: Тр. VI совещ. по теории литейных процессов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961.
8. Цытович, Н. А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для строит. вузов / Н. А. Цытович. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1983. – 288 с., ил.
9. Медведев, Я. И. Технологические испытания формовочных материалов / Я. И. Медведев, И. В. Валисовский – М.: Машиностроение, 1973. – 312 с.
10. Особенности формирования и разрушения прессовок из полимерного порошкового материала / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, А. А. Соснин // Успехи механики сплошных сред: сб. докл. Международной конференции, приуроченной к 75-летию академика В.А. Левина. – Иркутск: Мегалит, 2014. – С. 428-432.

Амосов О. С., Баена С. Г.
O. S. Amosov, S. G. Bayena

**ФИЛЬТРАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**FILTERING OF STOCHASTIC PROCESSES WITH FRACTAL STRUCTURE IN RELATION
TO NAVIGATING INFORMATION PROCESSING**

Амосов Олег Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: osa18@yandex.ru.

Mr. Oleg S. Amosov – Doctor of Engineering, Professor, Head of Industrial Electronics Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: osa18@yandex.ru.

Баена Светлана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: svetlana.baena@yandex.ru.

Ms. Svetlana G. Bayena – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: svetlana.baena@yandex.ru.

Аннотация. Применительно к навигации и управлению подвижными объектами выявлены процессы, имеющие фрактальную природу: ошибки инерциальных датчиков, в частности уходы гироскопов, траекторное движение подвижных объектов. Предлагается моделирование стохастического процесса на основе фрактального винеровского процесса с учетом показателя Херста. Для численной реализации такого процесса используется вейвлет-разложение. Исследованы особенности оценивания параметров фрактального процесса с помощью фильтра Калмана и синтетических алгоритмов. Приведены иллюстрирующие примеры.

Summary. In relation to navigation and mobile object control the fractal nature processes are revealed, that is errors of inertial sensors, in particular the goings of gyroscopes, trajectory movement of the mobile objects. Modeling of a mobile object stochastic trajectory based on fractal Wiener process taking into account Hurst exponent is offered. For numerical realization of this process, the wavelet-based decomposition is used. Features of trajectory parameter estimation by using Kalman filter and the synthetic algorithms are investigated. The illustrating examples are given.

Ключевые слова: траекторное слежение, фильтр Калмана, синтетический алгоритм оценивания, фрактальный винеровский процесс, вейвлет, показатель Херста.

Key words: tracking, Kalman filter, synthetic algorithm estimation, fractal Wiener process, wavelet, Hurst exponent.

УДК 519.711.3

Введение

В настоящее время в связи с разработкой высокоточных систем навигации и управления движением возрастают требования к точности оценки истинных параметров процессов, определяющих качественные характеристики этих систем. Удовлетворение требований к точностным характеристикам при обработке навигационной информации параметров инерциальной навигационной системой может быть обеспечено за счет уточнения описания их ошибок [5].

Точности оценки параметров при траекторном слежении во многом определяются как выбором адекватного математического описания подвижных объектов, так и выбором эффективных алгоритмов нелинейной фильтрации.

И в первом, и во втором случаях при решении задачи фильтрации широко распространены математические модели, построенные на основе классического винеровского процесса. В то же

время для моделирования стохастических процессов, обладающих фрактальными свойствами, используется обобщение в виде фрактального винеровского процесса (ФВП) [4; 7].

Цель данной статьи – выявить и исследовать применительно к навигации и управлению подвижными объектами процессы, имеющие фрактальную природу, исследовать особенности фильтрации параметров процесса, моделируемого с использованием его фрактальных свойств.

Математическая модель ошибок инерциальных датчиков навигационных систем с учетом показателя хаотичности. При обработке навигационной информации важным является учет свойств ошибок выходных сигналов датчиков навигационных систем. При моделировании ошибок инерциальных датчиков, имеющих стохастическое описание, широко применяется для описания винеровский процесс [12]. В частности, такая модель используется для описания дрейфа нуля гироскопа.

Модель винеровского процесса для ошибки $x(t)$ в непрерывном времени имеет вид

$$\dot{x}(t) = w(t), \quad (1)$$

где

$$M[w(t)] = 0, \quad M[w(t)w(\tau)] = q(t)\delta(t - \tau), \quad (2)$$

здесь $q(t)$ – интенсивность непрерывного белого шума $w(t)$.

Уравнение состояния в дискретном времени с периодом дискретизации $T = t_i - t_{i-1}$

$$x_i = x_{i-1} + w_i. \quad (3)$$

Ковариация Q для дискретного шума w_i в случае $q(t) = q = \text{const}$

$$Q = \sigma^2 = qT. \quad (4)$$

Процесс w_i может быть представлен в модели с использованием белого шума n_i с единичной интенсивностью посредством соотношения

$$w_i = \sqrt{qT}n_i.$$

Заметим, что описываемый при помощи стохастического дифференциального уравнения (1) процесс $x(t)$ является винеровским, который определен через белый шум $w(t)$. Последовательность x_i (3) является последовательностью с некоррелированными приращениями и называется винеровской последовательностью [11].

Анализ графиков поведения ошибок инерциальных датчиков по результатам экспериментов, приведенных в работах отечественных и зарубежных авторов, показывает, что процессы, описывающие ошибки, имеют фрактальную природу.

На это указывают представленные результаты испытаний дрейфа гироскопа в работах [5; 12]. При описании модели дрейфа гироскопа учтены постоянная и переменная составляющие, коэффициент корреляции, дисперсия переменной составляющей ухода и белый шум [5]. В работе [12] также предлагается математическая модель ошибок датчика на основе вариации Аллана, в которой используются неизвестные параметры, характеризующие вклад составляющих ошибок датчика, соответствующих линейному тренду, винеровскому процессу, фликкер шуму, белому шуму и шуму квантования.

Для выявления особенностей фрактальной структуры процесса используется показатель Херста. При показателе Херста H : $0 < H < 0,5$ – процесс обладает *антиперсистентными* свойствами; $H \approx 0,5$ – процесс называется белым шумом, что означает классическое броуновское движение; $0,5 < H < 1$ – процесс обладает фрактальными свойствами с трендоустойчивыми свойствами [10].

Экспериментальное подтверждение фрактальных свойств процесса ухода нуля гироскопа. Испытанию подвергся цифровой гироскоп STMicroelectronics L3G4200D PmodGYRO с использованием устройства myRIO National Instruments в среде моделирования LabView. Ход проведения испытаний подробно описан в [9]. Примеры записи уходов гироскопов при проведении таких испытаний приведены на рис. 1.

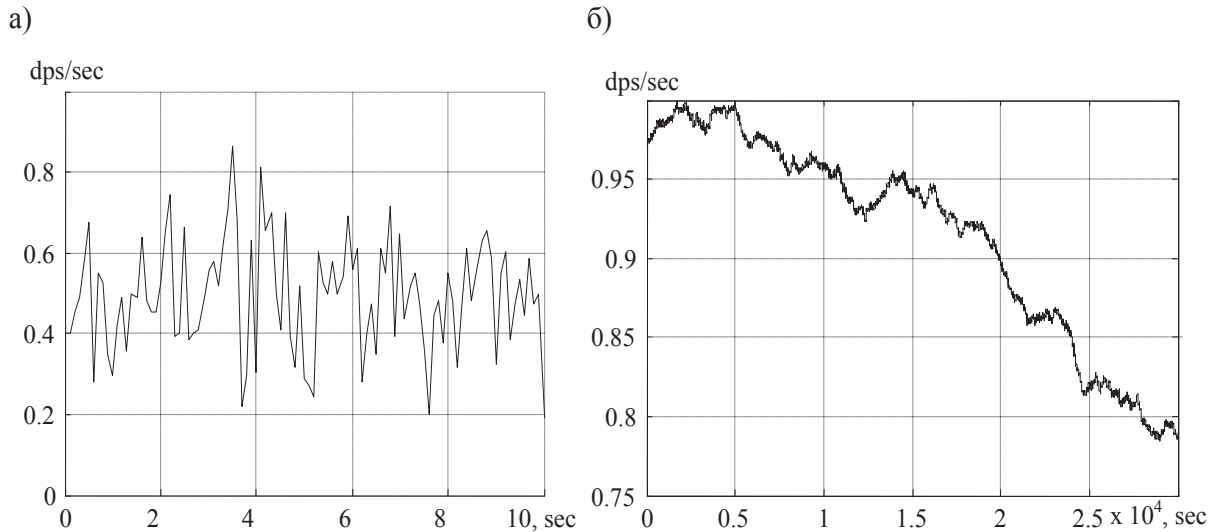


Рис. 1. Уходы гироскопа по координате x : а – 10 с; б – 1 ч

На рис. 1, а представлен фрагмент ухода гироскопа при первых 10 с из опыта в 3 ч, выбор которого обусловлен наглядностью. На рис. 1, б отражен уход гироскопа на протяжении 1 ч, для данного процесса наблюдается тренд.

Средствами MatLab проведен расчет показателя Херста, как видно для испытания длительностью в 3 ч (см. рис. 2), значение показателя колеблется около 0,26, т.е. процесс обладает *антиперсистентными* свойствами.

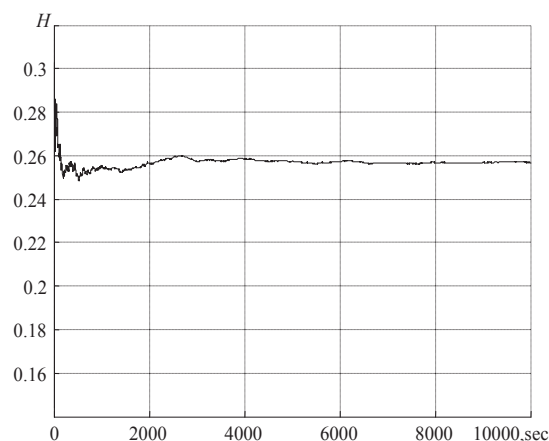


Рис. 2. Показатель Херста при дрейфе (уходе) гироскопа L3G4200D за 3 ч

Вышеизложенное позволяет предложить для описания ошибок датчиков обобщенный фрактальный винеровский процесс.

Фрактальный винеровский процесс называется случайным процессом $x(t)$ с параметром Херста H ($0 < H < 1$), если $\Delta x = x(t) - x(t_0)$ имеют гауссовское распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma^2 \cdot (t - t_0)^{2H}$, где σ – положительная константа, т.е. его вероятностная мера [4; 6; 7]

$$P(\Delta x < X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma \cdot (t - t_0)^H} \cdot \int_{-\infty}^X \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u}{\sigma \cdot (t - t_0)^H} \right)^2 \right] du. \quad (5)$$

При $H = 0,5$ ФВП совпадает с классическим броуновским движением. Приращения $\Delta x = x(t) - x(t_0)$ ФБД называются фрактальным гауссовским шумом, дисперсия которого подчиняется соотношению $D[x(t) - x(t_0)] = \sigma^2 \cdot (t - t_0)^{2H}$.

Модели ошибок датчиков на основе фрактального винеровского процесса. Выбрав вероятностную меру (5) для приращений случайного процесса (1), (3) $\Delta x = x(t) - x(t_0) = x_i - x_{i-1}$, получим модель с фрактальным винеровским процессом для ошибки.

Модель измерений ошибок датчиков. На основе полученных результатов обработки данных испытаний гироскопа предлагается математическая модель ухода гироскопа с учетом показателя хаотичности:

$$\xi_i = \eta_i + x_i + v_i, \quad (6)$$

где η_i – трендовая составляющая; x_i – компонента, выражающая меру хаотичности процесса, описывающая характер процесса и зависящая от H – показателя Херста; v_i – случайный белый шум с дисперсией R_i .

Математические модели движения объекта для задач траекторного слежения. Объект совершает движение в горизонтальной плоскости с координатами x и y декартовой системы координат. Ограничимся рассмотрением модели движения для одной координаты x , для другой координаты y модель аналогична.

Рассмотрим модели движения объекта, традиционно используемые для решения задач траекторного слежения [1; 4; 13].

Модель с винеровским процессом для ускорения

$$\ddot{x} = w(t) \quad (7)$$

с характеристиками белого шума $w(t)$ (2).

Процессу (7) соответствует трехмерный вектор состояния $x = [x \ \dot{x} \ \ddot{x}]^T$. Уравнение динамики в непрерывном времени

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gw(t), \quad (8)$$

где

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Уравнение состояния в дискретном времени с периодом дискретизации T

$$\dot{x}_i = \Phi x_{i-1} + w_i, \quad (9)$$

где

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица ковариации Q для дискретного белого шума w_i в случае $q(t) = q = \text{const}$

$$Q = \begin{bmatrix} T^5/20 & T^4/8 & T^3/6 \\ T^4/8 & T^3/3 & T^2/2 \\ T^3/6 & T^2/2 & T \end{bmatrix} q.$$

Модель с белым шумом для ускорения или винеровским процессом для скорости

$$\ddot{x}(t) = w(t). \quad (10)$$

Процессу (10) соответствует двумерный вектор состояния $x = [x \dot{x}]^T$.

Матрицы, определяющие динамику поведения объекта в непрерывном времени

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Уравнение состояния (9) в дискретном времени с периодом дискретизации T определяет переходная матрица

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица ковариации Q для дискретного белого шума w_i в случае $q(t) = q = \text{const}$

$$Q = \begin{bmatrix} T^3/3 & T^2/2 \\ T^2/2 & T \end{bmatrix} q.$$

Модель с белым шумом для скорости или винеровским процессом для координаты определяется уравнениями (1) – (4):

$$\dot{x}(t) = w(t), \quad M[w(t)] = 0, \quad M[w(t)w(\tau)] = q(t)\delta(t - \tau), \quad x_i = x_{i-1} + w_i.$$

Существенно, что все представленные модели движения (7), (10) и (1) определены через винеровский процесс, а их дискретные представления (9) и (3) – через винеровскую последовательность [11].

Нами предлагаются *новые* модели движения объекта, основанные на использовании *фрактального винеровского процесса* (фрактального броуновского движения – ФБД).

Модели движения объекта на основе фрактального винеровского процесса. Выбрав вероятностную меру (5) для приращений случайного процесса (1), (3) $\Delta x = x(t) - x(t_0) = x_i - x_{i-1}$, получим *модель с фрактальным винеровским процессом для координаты*.

Поступив аналогично для процессов (7) – (10), получим *модель с фрактальным винеровским процессом для ускорения и модель с фрактальным винеровским процессом для скорости* соответственно.

Модель измерений для траекторного слежения. Для определения местоположения объекта используется угломерно-дальномерный метод.

Измерения дальности и пеленга

$$\xi_i = \begin{bmatrix} \xi_{1i} \\ \xi_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(x_i, y_i) \\ s_2(x_i, y_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \rho_i \\ \Delta \alpha_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \\ \arctg(y_i / x_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \rho_i \\ \Delta \alpha_i \end{bmatrix}.$$

Для получения линейной модели измерений первичные измерения полярных координат объекта дальности ρ_i и пеленга α_i могут быть преобразованы в прямоугольную систему координат и представлены в форме [8]:

$$x_i^* = \underbrace{\rho_i \cos \alpha_i}_{x_i} + \Delta x_i; \quad y_i^* = \underbrace{\rho_i \sin \alpha_i}_{y_i} + \Delta y_i,$$

где Δx_i и Δy_i – случайные ошибки измерений координат с характеристиками

$$M(\Delta x_i) = M(\Delta y_i) = 0;$$

$$\sigma_{\Delta x_i}^2 = M(\Delta x_i^2) = \sigma_{\Delta \rho_i}^2 \cos^2 \alpha_i + \sigma_{\Delta \alpha_i}^2 \rho_i^2 \sin^2 \alpha_i;$$

$$\sigma_{\Delta y_i}^2 = M(\Delta y_i^2) = \sigma_{\Delta \rho_i}^2 \sin^2 \alpha_i + \sigma_{\Delta \alpha_i}^2 \rho_i^2 \cos^2 \alpha_i;$$

$$M(\Delta x_i \Delta y_i) = R_{\Delta x_i \Delta y_i} = (\sigma_{\Delta \rho_i}^2 - \sigma_{\Delta \alpha_i}^2 \rho_i^2) \sin \alpha_i \cos \alpha_i.$$

Линейные измерения будут использованы для фильтра Калмана (ФК).

Постановка задач фильтрации. Формулировка задачи фильтрации ошибок датчиков: необходимо оценить ошибку инерциального датчика x_i по набору измерений,

$$\xi_i = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i]^T, \quad \xi_i = x_i + v_i.$$

Приведем формулировку задачи траекторного слежения в общем виде:

Оценить вектор состояния подвижного объекта $x_i = [x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i, y_i, \dot{y}_i, \ddot{y}_i]^T$ по набору измерений $\Lambda_i = [\xi_1^T, \xi_2^T, \dots, \xi_i^T]^T$, $\xi_i = [\xi_{1i}, \xi_{2i}]^T = [s_1(x_i, y_i), s_2(x_i, y_i)]^T + [\Delta \rho_i, \Delta \alpha_i]^T$.

Приведем частную формулировку задачи траекторного слежения, выбрав для исследования простейшую модель с фрактальным винеровским процессом для координаты:

Оценить вектор состояния подвижного объекта $x_i = [x_i, y_i]^T$ по набору измерений $\Lambda_i = [\xi_1^T, \xi_2^T, \dots, \xi_i^T]^T$, $\xi_i = [\xi_{1i}, \xi_{2i}]^T = [s_1(x_i, y_i), s_2(x_i, y_i)]^T + [\Delta \rho_i, \Delta \alpha_i]^T$.

При отдельной фильтрации по каждой координате эта формулировка задачи упрощается:

Оценить координату подвижного объекта x_i по набору измерений $\xi_i = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i]^T$, $\xi_i = x_i + v_i$, $v_i = \Delta x_i$.

Сравнивая последнюю формулировку для траекторного слежения с первой для фильтрации ошибок инерциальных датчиков, видим, что они совпадают по форме. Воспользуемся этим фактом при выборе примера моделирования.

Решение задачи фильтрации. Для решения задач обработки навигационных данных наиболее широкое применение нашли алгоритмы калмановского типа [11]. Эти алгоритмы показали свою эффективность и при решении задач траекторного слежения за объектом, в том числе и при использовании угломерно-дальномерного метода измерений полярных координат дальности и

азимута после их пересчета в декартову систему координат, когда эффективным для фильтрации является применение ФК [1; 8; 13].

Для решения задач субоптимального нелинейного оценивания в рамках байесовского подхода оправданным является применение синтетических систем, построенных на базе нейронных сетей, нечеткой логики и вейвлетов с использованием для существенного повышения их быстродействия декомпозиции [2; 3]. На этих алгоритмах и остановим выбор для решения задачи фильтрации параметров процесса, моделируемого с использованием ФВП. Рассмотрим указанные алгоритмы в сжатом виде.

Решение задачи фильтрации с помощью ФК. Оценивается n -мерная гауссовская случайная последовательность $x_i = (x_{1i}, \dots, x_{ni})^T$ в дискретный момент времени $i = 1, 2, \dots$, представленная в виде

$$x_i = \Phi_i x_{i-1} + w_i,$$

с использованием m -мерных измерений $\xi_i = (\xi_{1i}, \dots, \xi_{mi})^T$, вычисляемых как

$$\xi_i = H_i x_i + v_i,$$

где Φ_i , H_i – известные матрицы соответствующей размерности; w_i и v_i – n - и m -мерные центрированные гауссовские белозумные последовательности с матрицами ковариаций Q_i и R_i .

В начальный момент времени значения x_0 представляют гауссовский центрированный случайный n -мерный вектор с матрицей ковариаций P_0 и w_i порождающие и v_i измерительные шумы, а также x_0 между собой статистически независимы.

Оптимальная в среднеквадратическом смысле оценка и соответствующая ей апостериорная матрица ковариаций ошибок оценивания могут быть найдены с помощью дискретного ФК, в котором, как правило, блок прогноза и блок обновления.

В блоке прогноза с использованием оптимальной оценки вектора состояния для предыдущего момента времени \tilde{x}_{i-1} и матрицы динамики Φ_i находится прогноз вектора $\tilde{x}_{i/i-1}$ и матрица ковариаций $P_{i/i-1}$ его ошибок $\tilde{x}_{i/i-1} = \Phi_i \tilde{x}_{i-1}$, $P_{i/i-1} = \Phi_i P_{i-1} \Phi_i^T + Q_i$.

В блоке обновления с использованием значений прогноза $\tilde{x}_{i/i-1}$ и текущего измерения y_i вычисляются оптимальная оценка вектора состояния для текущего момента времени \tilde{x}_i и матрица ковариаций P_i ее ошибок:

$$\tilde{x}_i = \tilde{x}_{i/i-1} + K_i (\xi_i - H_i \tilde{x}_{i/i-1}),$$

$$P_i = P_{i/i-1} - P_{i/i-1} H_i^T (H_i P_{i/i-1} H_i^T + R_i)^{-1} H_i P_{i/i-1} = (E - K_i H_i) P_{i/i-1},$$

где K_i – матрица коэффициентов усиления, определяемая как

$$K_i = P_{i/i-1} H_i^T (H_i P_{i/i-1} H_i^T + R_i)^{-1}.$$

На первом шаге предполагается, что $\tilde{x}_0 = M[x_0] = 0$.

Решение задачи оценивания траектории подвижного объекта с использованием синтетических алгоритмов. Для решения задачи нелинейного оценивания в рамках байесовского подхода нами ранее был предложен вычислительный метод оценивания с его реализацией на основе синтетических алгоритмов оценивания состояния динамических систем с использованием декомпозиции [2; 3].

- 1) Вводится класс параметрически заданных функций $\tilde{x}(\xi, \tilde{W})$.
- 2) Используется имеющееся в наличии обучающее множество $\{(\xi^{(j)}, x^{(j)})\}_{j=1}^N$.
- 3) Определяется среднеквадратический критерий оптимизации

$$\tilde{J}^*(\tilde{W}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(x^{(j)} - \tilde{x}^{(j)}(\xi^{(j)}, \tilde{W}) \right)^T \left(x^{(j)} - \tilde{x}^{(j)}(\xi^{(j)}, \tilde{W}) \right), \quad (11)$$

где $\tilde{x}^{(j)}(\xi^{(j)}, \tilde{W})$ – формируемая оценка.

- 4) Критерий (11) оптимизируется на основе минимизации эмпирического риска

$$P \left\{ \sup_{\tilde{W}} |J(\tilde{W}) - \tilde{J}^*(\tilde{W})| > \varepsilon \right\} \rightarrow 0, \quad \text{при } N \rightarrow \infty,$$

где $J(\tilde{W}) = M \left\| x - \tilde{x}(\xi, \tilde{W}) \right\|^2$; ε – заданная точность.

- 5) Минимизация реализуется с помощью нейронных сетей, нечетких систем и вейвлетов

$$\tilde{x}^\mu(\xi) = K^\mu(\xi, \tilde{W}), \quad \mu = NN, FS, W,$$

где ξ – вход синтетических алгоритмов; \tilde{W} – матрица, отвечающая за параметры синтетических алгоритмов; NN – нейронные сети; FS – нечеткие системы; W – вейвлеты.

Численная реализация ФВП. Для моделирования ФВП нет простого метода, например, как для классического броуновского движения. Для построения ФВП можно воспользоваться вейвлет-разложением [14; 15]. В этом случае разложение может быть получено с помощью фрактального процесса авторегрессии и скользящего среднего FARIMA [6; 14; 15]:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Phi_{-H-1/2}(t-k) S_k^{(H)} + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2^{-jH} \Psi_{-H-1/2}(2^j t - k) \varepsilon_{j,k} - b_0,$$

где $\Phi_{-H-1/2}$ – соответствующая $\Psi_{-H-1/2}$ скейлинг-функция; $S_k^{(H)} = \sum_{j=1}^k \zeta_j$, если

$k \geq 1$, $S_0^{(H)} = 0$ и $S_k^{(H)} = -\sum_{j=0}^{-k} \zeta_j$, если $k \leq -1$ при $(\zeta_j)_{j \in \mathbb{Z}}$ – гауссовский процесс FARIMA

$[0, H-1/2, 0]$ с независимой спектральной плотностью $g(\lambda) = (2\pi)^{-1} |1 - e^{-i\lambda}|^{1-2H}$; $\Psi_{-H-1/2}$ – биортogonalная вейвлет-функция; $\varepsilon_{j,k}$ – независимые гауссовские случайные величины с распределением $N(0, 1)$; b_0 – случайная константа.

Пример моделирования. Чтобы наглядно выявить особенности фильтрации фрактального процесса, сознательно выберем простейшую модель, описываемую с использованием выражений (1)–(6) для фрактального винеровского процесса.

Необходимо оценить координату фрактального винеровского процесса (3)

$$x_i = x_{i-1} + w_i,$$

по линейным измерениям вида

$$\xi_i = x_i + v_i,$$

где $i = 0, 1, \dots$ – моменты времени; w_i, v_i – белые шумы с дисперсиями $Q = \sigma_w^2$ и $R = \sigma_v^2$ соответственно.

Для моделирования фрактального винеровского процесса воспользуемся встроенной функцией MatLab «*wfbm*», реализованной в соответствии с изложенным выше методом, которая позволяет строить фрактальные последовательности с различными значениями показателя Херста H .

Параметры моделирования: начальное состояние $m_{x_0} = 0$, $\sigma_{x_0} = 20$; параметры порождающего и шума измерения: $\sigma_w = 1,1457$ при $H = 0,1$; $\sigma_w = 0,4041$ при $H = 0,5$; $\sigma_w = 0,2152$ при $H = 0,9$; $\sigma_v = 10$, период дискретизации $T = 1$ с.

Для моделирования с использованием синтетических алгоритмов $\tilde{x}_i^\mu = K_i^\mu(\tilde{x}_{i-1}^{(j)}, \xi_i^{(j)})$ генерировался обучающий массив данных $\{(\tilde{x}_{i-1}^{(j)}, \xi_i^{(j)}), x_i^{(j)}\}_{j=1}^N$ и тестовый массив данных $\{(\tilde{x}_{i-1}^{(j)}, \xi_i^{(j)}), x_i^{(j)}\}_{j=1}^{N^*}$.

Для сравнения точности полученных оценок использовались среднеквадратические отклонения (СКО) ошибок оценивания, вычисляемые как:

$$\tilde{\sigma}_i^\eta \approx \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L (e_i^{\eta(j)})^2}, \quad e_i^{\eta(j)} = \tilde{x}_i^{\eta(j)}(\xi_i^{(j)}, W_i) - x_i^{(j)}, \quad \eta = FK, NN, FS, W;$$

$$L = \{N, N^*\}, \quad N = 30\,000, \quad N^* = 3000.$$

Для получения искомой оценки с помощью синтетических алгоритмов фильтрации применена рекуррентная декомпозиционная схема оценивания в виде каскадного и параллельного соединения с двумя входами и одним выходом, где на вход поступает текущее измерение ξ_i и оценка x_{i-1} , полученная на предыдущем шаге. Для моделирования генерировался обучающий массив данных, где $N = 30\,000$, количество измерений $i = \overline{1, 200}$.

Проведено моделирование процесса с различным показателем Херста H (см. рис. 3).

На рис. 3, а, в, д отражены: динамический процесс x_i ; случайная ошибка измерений ξ_i и оценка переменной x_i с помощью ФК \tilde{x}_i^{FK} и синтетических алгоритмов \tilde{x}_i^μ . На рис. 3, б, з, е представлены: σ_i^{FK} – расчетное СКО ошибок оценивания, соответствующее дисперсии ошибки оптимального оценивания, которая является единственным элементом расчетной матрицы ковариаций ошибок ФК; $\tilde{\sigma}_i^{FK}$ – выборочное СКО ошибок фильтрации при использовании ФК; $\tilde{\sigma}_i^\mu$ – выборочное СКО ошибок фильтрации при использовании синтетических алгоритмов и $\tilde{\sigma}_i$ – выборочное СКО ошибки измерений.

Исследование показало, что при процессе с уровнем хаотичности $H = 0,1$ с помощью синтетических алгоритмов может быть достигнута более высокая точность оценивания в отличие от ФК (см. рис. 3, а, б).

При уровне хаотичности $H = 0,5$ ФК и синтетические алгоритмы оценивают процесс с одинаковой точностью (см. рис. 3, в, з).

Для уровня хаотичности $H = 0,9$ при оценивании процесса происходит сбой работы ФК, в отличие от синтетических алгоритмов, которые проявляют стабильность работы (см. рис. 3, д, е).

Для $H = 0,1$ и $H = 0,9$ наблюдается несовпадение расчетной и действительной (выборочной) характеристик для ФК.

Применение декомпозиционных синтетических алгоритмов позволило достичь высокой точности оценивания при скорости обучения и адаптации их значительно меньшей, чем для исходных систем без декомпозиции.

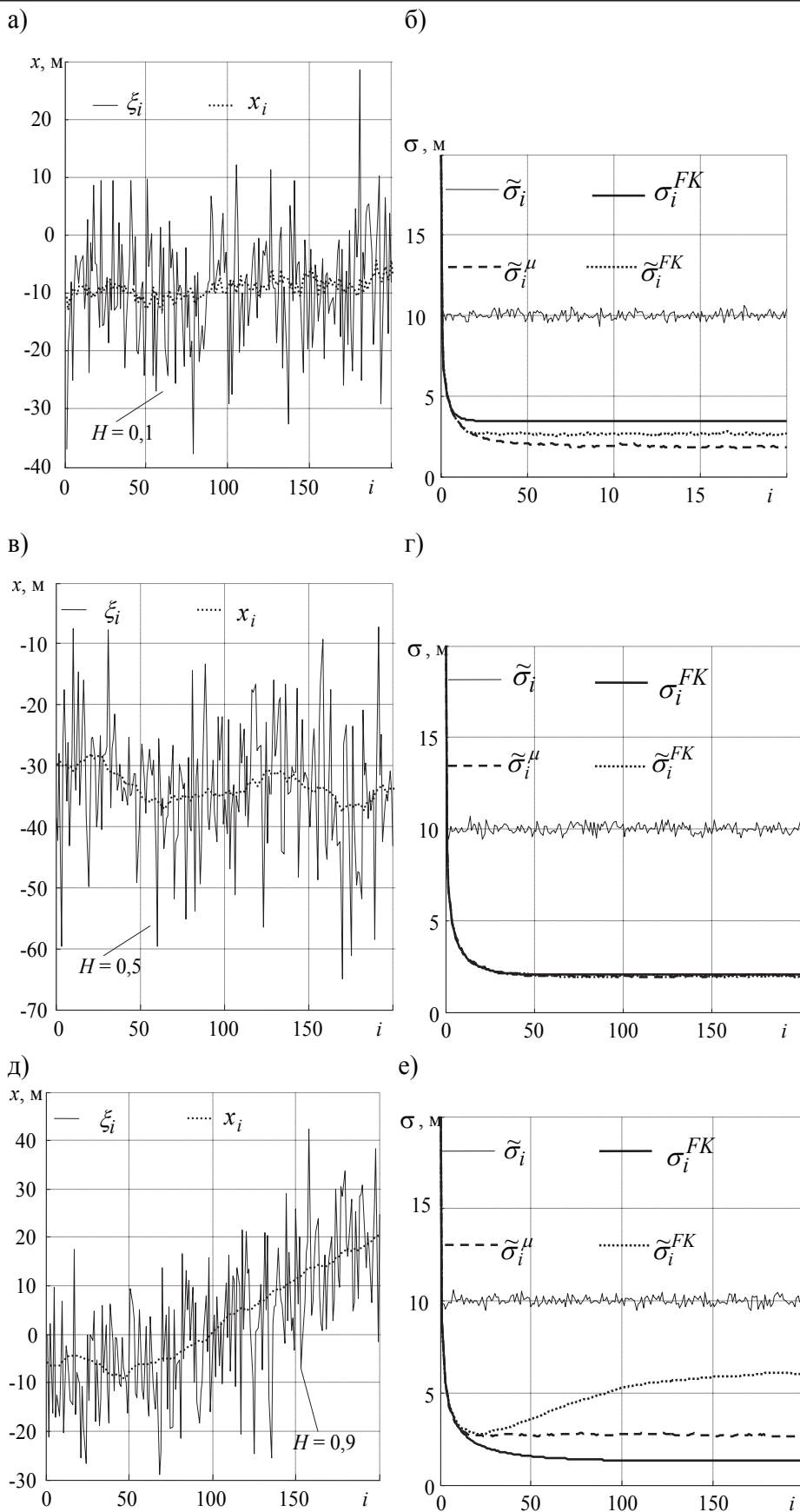


Рис. 3. Оценивание процесса с различным показателем Херста H :
 а, в, д – состояние, измерение переменной x ; б, г, е – СКО ошибок оценивания процесса

Выводы. Применительно к навигации и управлению подвижными объектами выявлены процессы, имеющие фрактальную природу: ошибки инерциальных датчиков, в частности уходы гироскопов, траекторное движение подвижных объектов.

Предлагается моделирование стохастического процесса на основе фрактального винеровского процесса с учетом показателя Херста. Для численной реализации такого процесса используется вейвлет-разложение.

Исследованы особенности оценивания параметров фрактального процесса с помощью фильтра Калмана и синтетических алгоритмов.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ № 15-08-08593 а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов, О. С. Фильтрация марковских последовательностей на основе байесовского, нейросетевого подходов и систем нечеткой логики при обработке навигационной информации / О. С. Амосов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2004. – Т. 43. – № 4. – С. 61-69.
2. Амосов, О. С. Быстродействующие численные нейросетевые и нечеткие методы стохастического оценивания состояния динамических систем / О. С. Амосов, С. Г. Баена // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4 (42). – С. 118-129.
3. Амосов, О. С. Быстродействующие нейронечеткие алгоритмы фильтрации параметров траектории подвижного объекта / О. С. Амосов, Е. А. Малашевская, С. Г. Баена // Материалы XXIII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2016. – С. 331-334.
4. Амосов, О. С. Оценивание параметров траектории подвижного объекта, моделируемой с использованием фрактального винеровского процесса на основе вейвлет-разложения / О. С. Амосов, С. Г. Баена // Информатика и системы управления. – 2016. – № 4. – С. 13.
5. Гостева, Н. Д. Исследование математической модели ухода двухступенного поплавкового гироскопа / Н. Д. Гостева, Ю. А. Литвиненко // Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2013. – С. 117-125.
6. Кириченко, Л. О. Оценивание самоподобия стохастического временного ряда методом вейвлет-анализа / Л. О. Кириченко, Ж. В. Дейнеко // Радиоэлектронные и компьютерные системы. Компьютерные системы и информационные технологии. – 2009. – № 4 (38). – С. 99-105.
7. Кроновер, Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / Р. М. Кроновер. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
8. Кузьмин, С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. – Киев: Издательство КВиЦ, 2000. – 428 с.
9. Моделирование и исследование цифрового гироскопа с использованием NI myRIO и датчика Gyroscope / сост.: О. С. Амосов, С. Г. Баена. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – 22 с.
10. Пашенко, Ф. Ф. Структурно-параметрическая идентификация временного ряда с применением фрактального и вейвлет-анализа / Ф. Ф. Пашенко, О. С. Амосов, Н. В. Муллер // Информатика и системы управления. – 2015. – № 2 (44). – С. 80-88.
11. Степанов, О. А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания / О. А. Степанов. – 2-е изд., исправ. и допол. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2010. – 509 с.
12. Степанов, О. А. Сравнение методов идентификации моделей ошибок датчиков, основанных на вариациях Аллана и алгоритмах нелинейной фильтрации / О. А. Степанов, А. В. Моторин // Материалы XXI Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2014. – С. 98-103.
13. Bar-Shalom, Yaakov Estimation with applications to tracking and navigation / by Yaakov Bar-Shalom, X.-Rong Li, Thiagalingam Kirubarajan. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – 558 p.
14. Bardet, J. M. Generators of long-range dependent processes: a survey, Theory and applications of long-range dependence // Theory and applications of long-range dependence. Birkhäuser. – 2003. – № 1. – P. 579-623.
15. Patrice Abry, Fabrice Sellan. The Wavelet-Based Synthesis for Fractional Brownian Motion Proposed by F. Sellan and Y. Meyer: Remarks and Fast Implementation // Applied and computational harmonic analysis. – 1996. – № 3. – P. 377-383.

Гринфельд Г. М., Голококолос Д. А.
ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Гринфельд Г. М., Голококолос Д. А.
G. M. Grinfeld, D. A. Golokolos

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

PARAMETRIC CORRECTION OF HERMETIC ELECTROMECHANICAL CONVERTER CONTROL SYSTEM

Гринфельд Григорий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Пионерская, 61-20; тел. +7 (914) 1743914. E-mail: grinfelds2002@mail.ru.

Mr. Grigory M. Grinfeld – PhD, Associate Professor, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681018, Komsomolsk-on-Amur, Pionerskaya str., 61-20; tel. +7(914)1743914. E-mail: grinfelds2002@mail.ru.

Голококолос Дмитрий Анатольевич – аспирант кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681024, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Интернациональный, д. 5, кв. 31; тел. 8 (914) 2123472. E-mail: dag@land.ru.

Mr. Dmitry A. Golokolos – PhD candidate, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); house 59, flat 31, International av., Komsomolsk-on-Amur, Russia; tel. 8 (914) 2123472. E-mail: dag@land.ru.

Аннотация. В статье приведена методика синтеза регуляторов системы управления, учитывающая специфические особенности конструкции герметичных электромеханических преобразователей. Целью исследования является выработка принципов параметрической коррекции, позволяющих встраивать герметичные электромеханические преобразователи в действующие системы управления.

Summary. The article presents the method of control system regulator synthesis, considering peculiarities of hermetic electromechanical converters. The purpose of the study is to estimate the parametric correction conceptions, admitting to embed hermetic electromechanical converters in existing control system.

Ключевые слова: система управления, герметичный электромеханический преобразователь, капсулированный электродвигатель.

Key words: control system, hermetic electromechanical converter, canned motor.

УДК 621.313

Введение

Герметичные электромеханические преобразователи (ГЭМП) предназначены для применения в качестве приводов при работе в сложных условиях эксплуатации: на огнеопасных объектах, при высоких и низких давлениях и температурах, в обстановке повышенной влажности и вибрации. Характерным отличительным элементом таких электродвигателей является наличие экранирующей гильзы, устанавливаемой в зазор между статором и ротором и защищающей обмотки и магнитопровод статора от воздействия рабочей среды.

Указанная конструктивная особенность ГЭМП, наряду с рядом других, обуславливает значительную специфику протекающих в них электромагнитных и тепловых процессов.

В [1] отмечено значительное влияние экранирующего элемента ГЭМП на его рабочие характеристики. При этом в качестве определяющего фактора рассматривается изменение величины индуктивного сопротивления экрана при работе ГЭМП в составе электротехнического комплекса, т.к. при питании от преобразователя частоты его влияние может быть значительным.

Для эффективного решения и нахождения параметров необходима многомерная параметризация объекта исследования с использованием возможностей САПР-технологий (SOLIDWORKS, T-FLEX CAD) и численное моделирование на основе мультифизических программ (ANSYS, MAXWELL, FEMLAB, FLUENT, ELCUT, COMSOL). Указанные программные комплексы позволяют найти эмпирические выражения для расчета параметров экрана при проектировании электромеханических преобразователей.

Системы управления современных преобразователей частоты с эталонной математической моделью объекта управления могут аналитически рассчитать и регулировать выходные параметры на основе значений фазных токов и потокосцеплений электромеханического преобразователя, но поддержание устойчивой скорости вращения в области малых частот, обеспечение номинального момента при нулевой скорости, робастность, поддержание энергосберегающего режима работы возможны лишь при определенных параметрах модели [2]. Кроме того, существующие преобразователи частоты не позволяют задать параметры экранирующего элемента напрямую даже при возможности их расчета, что ведёт к расхождению характеристик эталонной математической модели в преобразователе частоты и математической модели реального ГЭМП. К числу дополнительных усложняющих факторов следует отнести существенную нелинейность электромеханического преобразователя как объекта управления, дискретность процессов, протекающих в преобразователе частоты, необходимость компенсации внутренних перекрестных связей объекта управления.

Математическая модель объекта управления

Пространственная модель герметичного асинхронного электродвигателя на основе уравнений обобщенного электромеханического преобразователя [3] может быть представлена в следующем виде (см. рис. 1).

Обозначения, принятые на рис. 1:

L_A, L_B, L_C – полные индуктивности фаз обмотки статора;

$L_{A_{ec}}, L_{B_{ec}}, L_{C_{ec}}$ – полные приведенные индуктивности фиктивной обмотки вихревых токов, учитывающей потери в стали;

L_{Ax}, L_{Bx}, L_{Cx} – полные приведенные индуктивности экрана фаз;

L_a, L_b, L_c – полные приведенные индуктивности соответствующих фаз обмотки ротора;

γ – угол поворота ротора, электрический радиан.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения:

1. трехфазная система симметрична, нулевой ток в ней отсутствует, сумма мгновенных значений токов фаз равна нулю;
2. каждый протекающий по фазной обмотке ток порождает магнитодвижущую силу, синусоидально распределенную по окружности воздушного зазора машины;
3. учитывается только основная гармоническая составляющая всех известных и определяемых величин;
4. влияние гистерезиса стали на форму токов и потокосцеплений двигателя пренебрежительно мало;
5. индукция магнитного поля в лобовых частях обмоток равна нулю;
6. магнитное поле, связанное с экранирующим элементом и вторичной вращающейся короткозамкнутой обмоткой, ограничено расчетной длиной воздушного зазора, равномерно по длине зазора и имеет только нормальную составляющую, неизменную по всей толщине обмоток и гармонически изменяющуюся по окружности воздушного зазора;
7. магнитная проницаемость экрана равна магнитной проницаемости зазора.

Представленную физическую модель в естественных координатах описывает следующая система уравнений, записанная в матричном виде:

$$\begin{cases} [U] = [R] \cdot [I] + \frac{d}{dt}[\Psi], \\ [\Psi] = [L] \cdot [I], \\ M_{эм} = \frac{1}{2} \left([I]^T \cdot \frac{d}{dy} [L] \cdot [I] \right), \\ \frac{d\omega_p}{dt} = \frac{1}{J} (M_{эм} - M_c), \end{cases} \quad (1)$$

где $[U]$ – вектор напряжений; $[R]$ – матрица активных сопротивлений обмоток; $[I]$ – вектор токов; $[\Psi]$ – вектор потокосцеплений; $[L]$ – матрица индуктивностей обмоток; $M_{эм}$ – электромагнитный момент; ω – частота вращения ротора; M_c – момент сопротивления на валу.

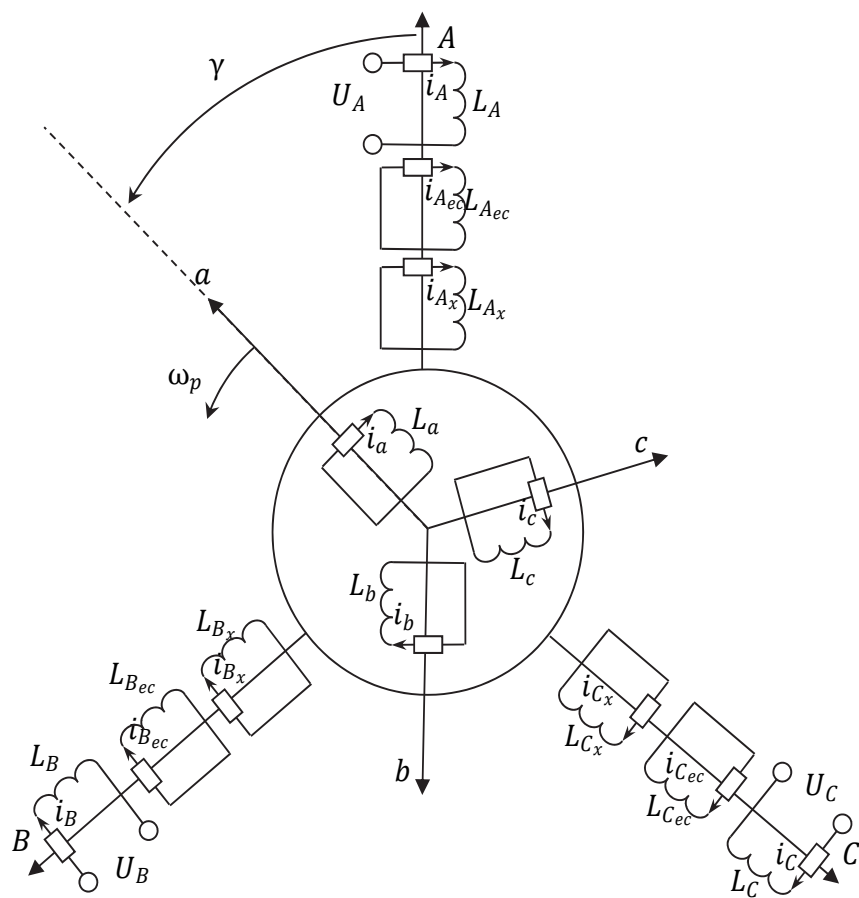


Рис. 1. Пространственная модель приведенного капсулированного электродвигателя в естественной вращающейся системе координат

В матрицу индуктивностей $[L]$ входит 16 субматриц. За исключением четырех диагональных субматриц полных индуктивностей, остальные отражают связи между статорными и роторными обмотками. При условии, что фазы электрической машины симметричны, матрица индуктивностей выглядит следующим образом:

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [L_{sr}] & [L_{s.ec}] & [L_{sx}] \\ [L_{rs}] & [L_r] & [L_{r.ec}] & [L_{rx}] \\ [L_{ec.s}] & [L_{ec.r}] & [L_{ec}] & [L_{ec.x}] \\ [L_{xs}] & [L_{xr}] & [L_{x.ec}] & [L_x] \end{bmatrix},$$

где

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_A & -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & L_B & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M & L_C \end{bmatrix}, \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_a & -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & L_b & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M & L_c \end{bmatrix}$$

$$[L_{ec}] = \begin{bmatrix} L_{Aec} & -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & L_{Bec} & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M & L_{Cec} \end{bmatrix}, \quad [L_x] = \begin{bmatrix} L_{Ax} & -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & L_{Bx} & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M & L_{Cx} \end{bmatrix}$$

$$[L_{s.ec}] = [L_{ec.s}] = [L_{sx}] = [L_{xs}] = [L_{ec.x}] = [L_{x.ec}] = \begin{bmatrix} M & -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & M & -\frac{1}{2} \cdot M \\ -\frac{1}{2} \cdot M & -\frac{1}{2} \cdot M & M \end{bmatrix}$$

$$[L_{sr}] = [L_{ec.r}] = [L_{x.r}] = \begin{bmatrix} M \cdot \cos(\gamma) & M \cdot \cos\left(\gamma + 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) & M \cdot \cos\left(\gamma - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \\ M \cdot \cos\left(\gamma - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) & M \cdot \cos(\gamma) & M \cdot \cos\left(\gamma + 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \\ M \cdot \cos\left(\gamma + 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) & M \cdot \cos\left(\gamma - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) & M \cdot \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

$$[L_{rs}] = [L_{r.ec}] = [L_{rx}] = \begin{bmatrix} M \cdot \cos(\gamma) & M \cdot \cos\left(\gamma - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) & M \cdot \cos\left(\gamma + 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \\ M \cdot \cos\left(\gamma + 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) & M \cdot \cos(\gamma) & M \cdot \cos\left(\gamma - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \\ M \cdot \cos\left(\gamma - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) & M \cdot \cos\left(\gamma + 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) & M \cdot \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

здесь M – взаимная индуктивность между обмотками.

Матрица активных сопротивлений $[R]$ представляет собой диагональную матрицу, элементами которой являются активные сопротивления соответствующих обмоток и фаз:

$$[R] = \text{diag}\{r_A, r_B, r_C, r_a, r_b, r_c, r_{Aec}, r_{Bec}, r_{Cec}, r_{Ax}, r_{Bx}, r_{Cx}\}.$$

Структурная схема объекта управления представлена на рис. 2, а схема замещения – на рис. 3.

Математическая модель учитывает:

- насыщение магнитной системы. Взаимоиндуктивность M имеет нелинейную зависимость от потокосцепления: $M = f(\Psi_m)$ [4];

- эффект вытеснения вследствие изменения частоты тока в роторе при переходных процессах. Коэффициенты k_x и k_r характеризуют изменения соответственно индуктивного и активного сопротивлений обмотки ротора при изменении его скорости вращения [5];

- изменение сопротивления экрана при нагреве. Приближенно сопротивление экрана можно вычислить по формуле

$$r \approx r_n \cdot (1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \lambda\theta^3),$$

где r_n – сопротивление материала при 20 °С; α, β, λ – температурные коэффициенты сопротивления экрана; θ – превышение температуры над температурой окружающей среды (20 °С), рассчитывается по формуле

$$\theta = I^2 \cdot \frac{r_n}{k_{\text{то}} S_{\text{пов}}}.$$

биться желаемых выходных характеристик позволяет система с прямым управлением моментом (DTC). Подобные системы управления хорошо изучены и освещены в литературе [4; 6; 7]. Типичная схема системы DTC приведена на рис. 5.

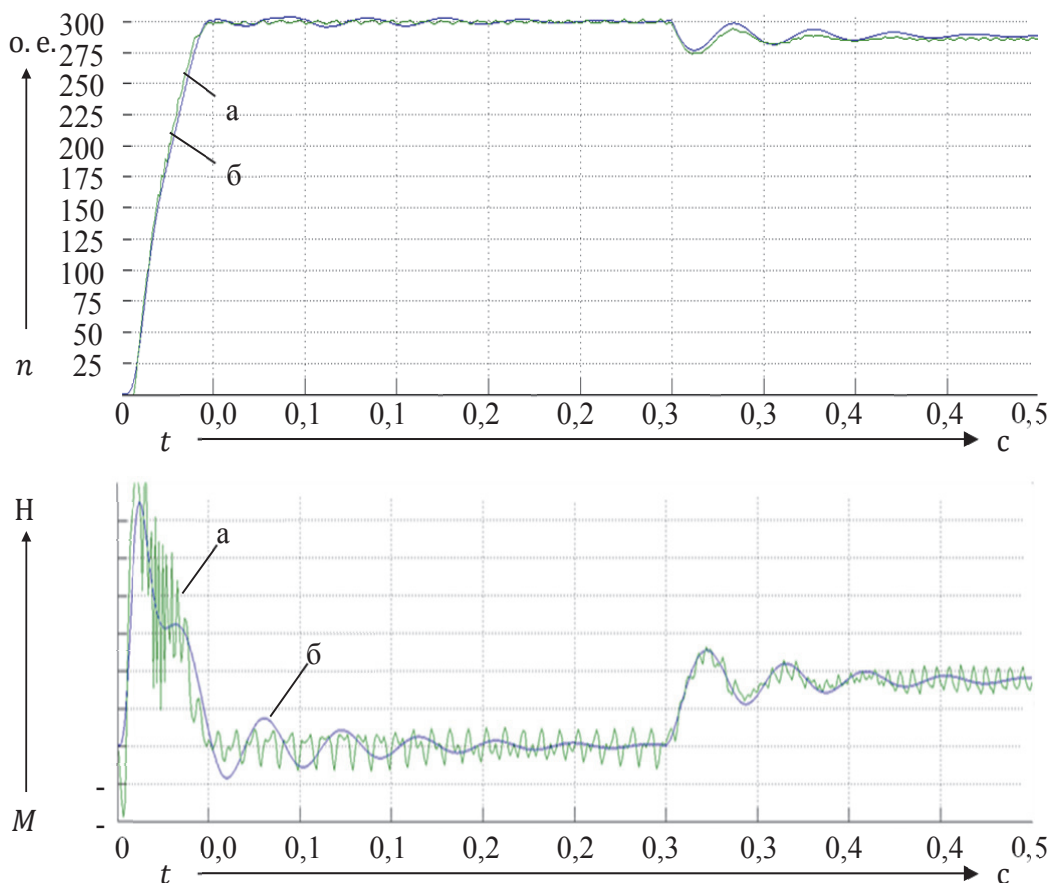


Рис. 4. Динамические характеристики скорости n и момента M пуска и наброса нагрузки герметичного АД мощностью 1 кВт:

а – полученные при решении полевой задачи в Ansys Maxwell;

б – полученные при математическом моделировании в Simulink MATLAB

Работа систем DTC предполагает наличие информации о пространственном положении вектора потокосцепления, получаемой на практике от наблюдателя магнитного потока, обеспечивающего асимптотическую оценку этой переменной. Достоверность работы такого наблюдателя зависит от точности определения параметров ОУ. Как видно из рис. 6, механическая характеристика герметичного АД отличается от АД без экранирующего элемента даже при малых мощностях двигателя. Эта разница усиливается при повышении мощностей двигателей, т.к. активное сопротивление экрана уменьшается, что приводит к росту вихревых токов и демпфирующего эффекта экранирующего элемента, который приводит к увеличению критического скольжения [1].

Таким образом, система управления, реализованная с использованием существующих преобразователей частоты, не может эффективно управлять ГЭМП, т.к. в её логике заложена другая математическая модель ОУ.

Повышение эффективности работы системы управления с ГЭМП возможно двумя способами:

1. путём преобразования структуры математической модели ГЭМП, заложенной в программу преобразователя частоты, к виду, учитывающему наличие экранирующего элемента;
2. с помощью параметрической коррекции существующей эталонной модели, реализуемой на основе приведения схемы замещения герметичного АД к эквивалентной, как показано на рис. 7.

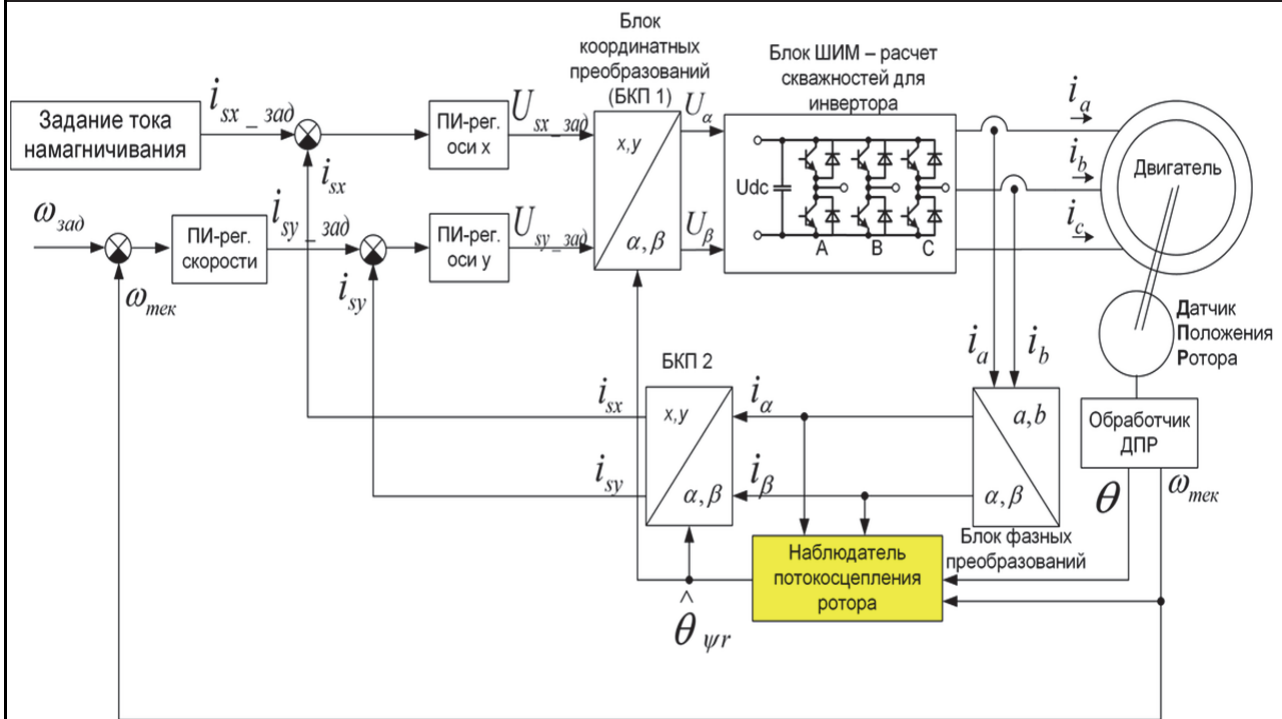


Рис. 5. Структурная схема системы с прямым управлением моментом (DTC)

Очевидно, что предпочтительным является второй способ, т.к. он даёт возможность использовать герметичные АД в существующих и уже работающих системах управления.

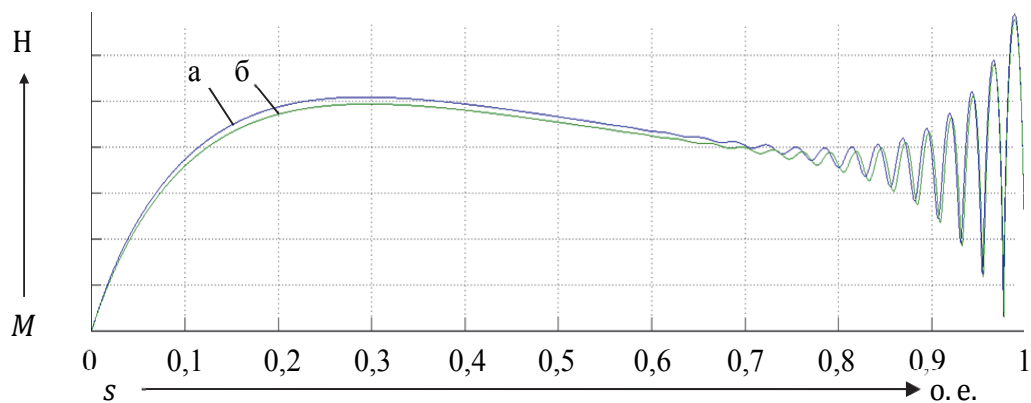


Рис. 6. Механическая характеристика двигателя мощностью 1 кВт: а – асинхронного двигателя без экранирующего элемента; б – герметичного асинхронного двигателя

Обозначим пусковые характеристики скорости и момента АД без экранирующего элемента $\omega = f(t)$ и $M = f(t)$, а характеристики герметичного АД соответственно $\omega_{*} = f(t)$ и $M_{*} = f(t)$. Переменные, приведенные в относительных единицах, отметим индексом *.

Для параметрической коррекции математической модели системы управления необходимо определить оптимальные параметры эквивалентной схемы замещения $r_{1\sigma}$, $x_{1\sigma}$, $x_{m\sigma}$. Решение этой задачи сводится к нахождению экстремума (минимума) квадратичного интегрального критерия:

$$f(r_{1\sigma}, x_{1\sigma}, x_{m\sigma}) = \int \omega_{\Delta}(t)^2 dt + \int M_{\Delta}(t)^2 dt, \quad (2)$$

где $\omega_{\Delta}(t) = \omega_{*}(t) - \omega(t)$; $M_{\Delta}(t) = M_{*}(t) - M(t)$.

Выражение (2) представляет собой сумму квадрата ошибок пусковых характеристик герметичного АД и АД без экранирующего элемента.

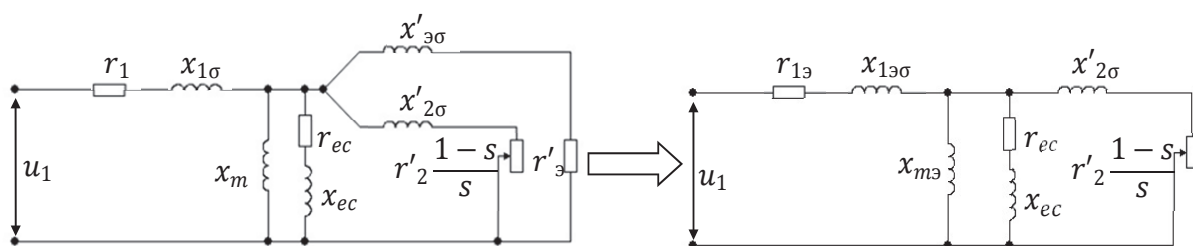


Рис. 7. Приведение схемы замещения герметичного АД к эквивалентной

Задача оптимизации может быть решена численно с помощью метода градиентного спуска:

$$r_{1э}^{[i+1]} = r_{1э}^{[i]} - \lambda^{[i]} \nabla f(r_{1э}^{[i]}, x_{1эσ}^{[i]}, x_{mэ}^{[i]}),$$

$$x_{1эσ}^{[i+1]} = x_{1эσ}^{[i]} - \lambda^{[i]} \nabla f(r_{1э}^{[i]}, x_{1эσ}^{[i]}, x_{mэ}^{[i]}),$$

$$x_{mэ}^{[i+1]} = x_{mэ}^{[i]} - \lambda^{[i]} \nabla f(r_{1э}^{[i]}, x_{1эσ}^{[i]}, x_{mэ}^{[i]}).$$

где i – номер итерации; $\lambda^{[i]}$ – шаг на i -й итерации.

Полученные оптимальные значения $r_{1э}$, $x_{1эσ}$, $x_{mэ}$ задаются в преобразователе частоты системы управления. Динамические пусковые характеристики АД в составе системы DTC приведены на рис. 8.

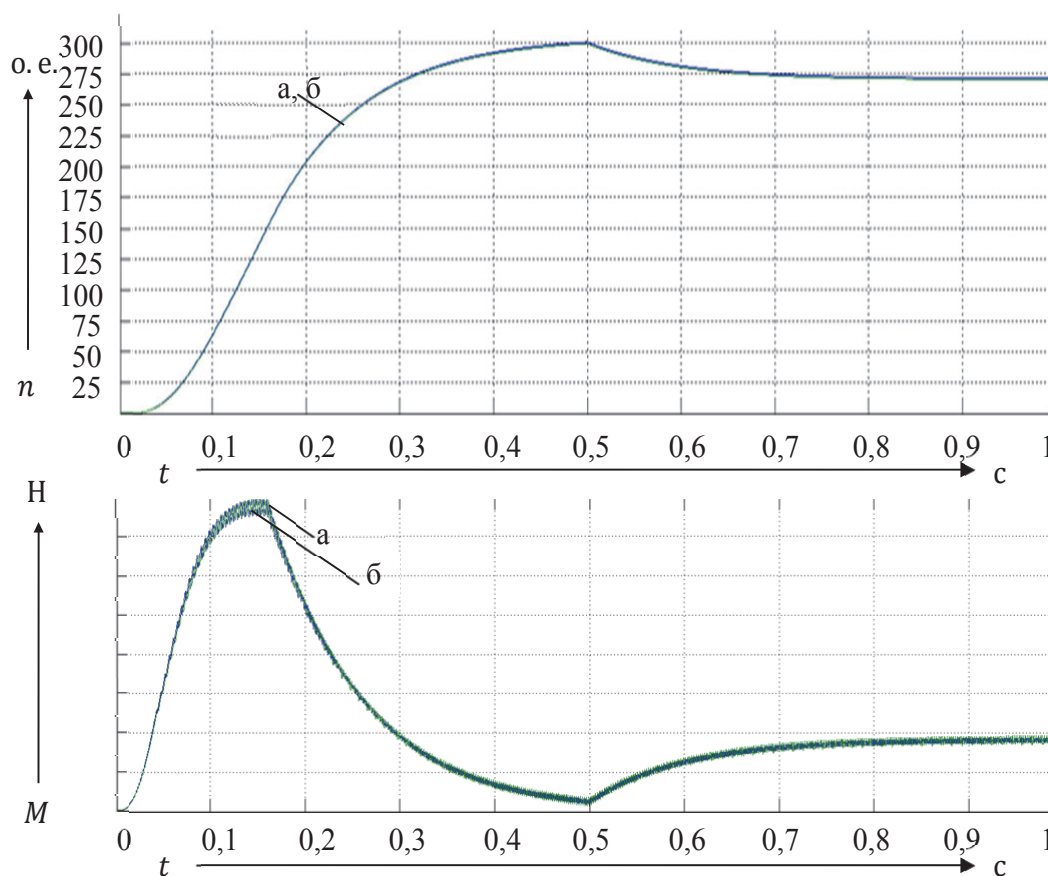


Рис. 8. Пуск и наброс нагрузки при номинальной частоте вращения в системе DTC:
а – асинхронного двигателя без экранирующего элемента;
б – герметичного асинхронного двигателя

Выводы

Предложен подход к выполнению параметрической коррекции системы управления электромеханическим преобразователем, обеспечивающий высокие показатели качества регулирования приводов с герметичными асинхронными двигателями.

Рассматриваемая методика, построенная на основе приведения схемы замещения герметичного АД к стандартной, позволяет компенсировать влияние экранирующего элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голоколов, Д. А. Влияние параметров экрана на характеристики капсулированных асинхронных электродвигателей / Д. А. Голоколов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № IV-1(20). – С. 1-4.
2. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979.
3. Уайт, Д. С. Электромеханическое преобразование энергии / Д. С. Уайт, Г. Х. Вудсон. – Л.: Энергия, 1964.
4. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006.
5. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001.
6. Рудаков, В. В. Системы управления электроприводов. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока: учеб. пособие / В. В. Рудаков, А. Е. Козярук. – СПб., 2007.
7. Народницкий, А. Г. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А. Г. Народницкий. – СПб.: Электротехническая компания, 2004.



Стельмашук С. В., Бунаков В. А.
S. V. Stelmashchuk, V. A. Bunakov

**СИНТЕЗ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С КОНТУРОМ СКОРОСТИ,
НАСТРОЕННОГО НА МОДУЛЬНЫЙ ОПТИМУМ**

**SYNTHESIS OF THE SERVO DRIVER WITH SPEED LOOP
TUNED AT THE MODULAR OPTIMUM**

Стельмашук Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

Mr. Sergei V. Stelmashchuk – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric drive and automation of industrial plants Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

Бунаков Вячеслав Александрович – бакалавр кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bsakms@mail.ru.

Mr. Vyacheslav A. Bunakov – bachelor, Electric drive and automation of industrial plants Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bsakms@mail.ru.

Аннотация. В работе представлена методика синтеза следящей системы для объекта управления с контуром скорости, настроенного на модульный оптимум. В качестве объекта управления рассматривается автоматизированный электрический привод с редуктором. При этом предполагается использование датчика скорости на выходном валу приводного редуктора. Такой подход можно использовать для мотор-редукторов, которые чаще используются в различных компактных приводах. Методика основана на методе синтеза с помощью логарифмических амплитудных частотных характеристик (ЛАХ). Результатом синтеза являются два регулятора угла слежения: пропорционально-интегрирующий и пропорционально-дифференцирующий (ПИПД-регулятор). Критерием синтеза регулятора угла слежения является желаемая ЛАХ, характеристики которой определяются на основе предельных возможностей переходной функции объекта управления со стандартной настройкой на модульный оптимум. Предполагается, что максимальные скорость и ускорение переходной функции являются требуемыми показателями для синтеза следящей системы методом ЛАХ. В статье рассмотрены вопросы оценки точности и приведен демонстрирующий пример на конкретном мотор-редукторе.

Summary. The paper presents a method of synthesis of servo driver for controlling the speed of the object with the speed tuned at the modular optimum. An automatic electric motor drive is considered as the controlled element. This assumes the use of the speed sensor on the output shaft of the drive gear. This approach can be used for geared motors, which are more commonly used in a variety of compact drives. The technique is based on the method of synthesis by using logarithmic frequency response (LFR). The result is a synthesis of the two tracking angle controllers: proportional-integral and proportional-derivative (PIPD regulator). The criterion for the synthesis of tracking angle controller is the desired LFR, the characteristics of which are defined based on saturated capability transition function of controlled object with standard configuration for modular optimum. It is assumed that the maximum speed and acceleration of the transition functions are required for the synthesis of parameters of servo driver system by LFR. The article covers the accuracy and contains an example of a particular electric motor.

Ключевые слова: модель, модульный оптимум, следящий электропривод.

Key words: model, modular optimum, servo driver.

УДК 62-503.54

Введение

В инженерной практике для синтеза следящей системы удобным методом является графо-аналитический метод логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) [1], где необходимо задаться требуемыми параметрами быстродействия и точности слежения, а также качества переходного процесса слежения. Быстродействие определяется максимальными значениями скорости и ускорения сигнала на входе следящей системы, точность – амплитудой ошибки слежения, качество – показателем колебательности следящей системы. Все требуемые параметры слежения определяются исходя из инерционных особенностей объекта управления.

Объектом управления следящей системы, как правило, выступает регулируемый электропривод с системой управления скоростью. Тогда предметом задачи синтеза методом ЛАЧХ является контур угла поворота приводного редуктора.

Как правило, система управления скоростью общепромышленного электропривода определяется с помощью методов стандартных настроек [2]. В этом случае для метода ЛАЧХ объект управления представляет собой стандартную форму независимо от технических особенностей электропривода. Это даёт возможность с использованием метода ЛАЧХ выявить методику расчёта регулятора контура угла исходя из особенностей стандартной настройки контура скорости, а не из технических особенностей силовой части электропривода. Такая методика также окажется стандартной и применима в производстве для настройки широкого круга электроприводов.

Постановка задачи

В данной работе представлена методика синтеза контура угла следящего электропривода, в котором контур скорости настроен на модульный оптимум (рис. 1).

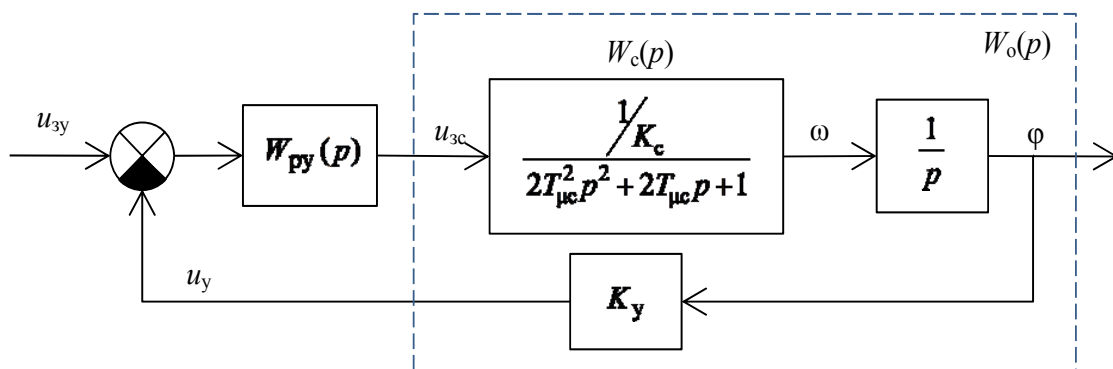


Рис. 1. Структурная схема следящего электропривода: T_{yc} – некомпенсируемая постоянная времени контура скорости; K_c, K_y – коэффициенты усиления датчиков обратной связи по скорости и углу соответственно; $W_c(p)$ – передаточная функция контура скорости; $W_{ry}(p)$ – передаточная функция регулятора угла; u_{zy}, u_{3c}, u_y – сигналы задания по углу, скорости и сигнал обратной связи по углу соответственно; ω, φ – скорость и угол поворота вала редуктора следящего привода

Допустим, что максимально допустимые значения сигналов управления на входе контуров скорости и угла равны $U_{y\max}$.

Передаточная функция объекта управления контура угла равна:

$$W_o(p) = \frac{u_y(p)}{u_{3c}(p)} = \frac{W_c(p)}{p} K_y = \frac{K_o}{p(2T_{yc}^2 p^2 + 2T_{yc} p + 1)},$$

где $K_o = \frac{K_y}{K_c} = \frac{\omega_{\max}}{\varphi_{\max}}$ – коэффициент пропорциональности объекта управления; $\omega_{\max}, \varphi_{\max}$ – заданные максимальные значения скорости и угла поворота вала приводного редуктора соответственно.

Инерционные особенности объекта управления $W_o(p)$ определяются постоянной времени $T_{\mu c}$ независимо от технических особенностей силовой части привода: типа привода, его номинальных данных и т.д. Методика расчёта регулятора угла $W_{py}(p)$ основана на следующем принципе: быстродействие контура угла должно определяться максимальными значениями скорости u'_{ym} и ускорения u''_{ym} сигнала u_y как реакции объекта управления на ступенчатое воздействие u_{zc} . Предполагается, что для объекта управления с оптимальным быстродействием, соответствующим настройке на модульный оптимум, параметры u'_{ym} и u''_{ym} являются предельными.

Для определения u'_{ym} и u''_{ym} соответственно решаются уравнения

$$\frac{d^2 u_y(t'_m)}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^3 u_y(t''_m)}{dt^3} = 0,$$

где $u_y(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W_o(p)}{p} U_{zc} \right\}$ – реакция объекта управления на ступенчатое воздействие; U_{zc} – величина ступенчатого воздействия на входе объекта управления; $t'_m = 2\pi T_{\mu c}$, $t''_m = \frac{\pi T_{\mu c}}{2}$ – моменты времени максимального значения скорости и ускорения сигнала $u_y(t)$ соответственно. Тогда

$$u'_{ym} = \left. \frac{du_y(t)}{dt} \right|_{t=t'_m} = K_o U_{zc} (e^{-\pi} + 1), \quad u''_{ym} = \left. \frac{d^2 u_y(t)}{dt^2} \right|_{t=t''_m} = \frac{e^{-\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{K_o U_{zc}}{T_{\mu c}}.$$

Требуемые значения амплитуды u_{ym} и контрольной частоты ω_k гармонического сигнала на выходе объекта управления равны:

$$u_{ym} = \frac{u'^2_{ym}}{u''_{ym}} = \lambda_1 K_o T_{\mu c} U_{zc}, \quad \omega_k = \frac{u''_{ym}}{u'_{ym}} = \frac{\lambda_2}{T_{\mu c}},$$

где $\lambda_1 = \sqrt{2} e^{\frac{\pi}{4}} (e^{-\pi} + 1)^2 \approx 3,376$; $\lambda_2 = \frac{e^{-\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2} (e^{-\pi} + 1)} \approx 0,309$.

Амплитуда u_{ym} зависит от значения сигнала задания скорости U_{zc} . Определим значение u_{ym} для случая, когда на входе объекта управления амплитуда сигнала u_{zcm} достигает максимально допустимого значения управляющего сигнала U_{ymax} . Амплитуда гармонического сигнала на входе объекта управления равна:

$$u_{zcm} = \frac{u_{ym}}{|W_o(\omega_k)|} = U_{zc} \lambda_1 \lambda_2 \sqrt{1 + 4\lambda_2^4} = U_{ymax},$$

где $\sqrt{1 + 4\lambda_2^4} \approx 1$.

Тогда $U_{zc} = \frac{U_{ymax}}{\lambda_1 \lambda_2 \sqrt{1 + 4\lambda_2^4}} \approx \frac{U_{ymax}}{\lambda_1 \lambda_2}$, следовательно, $u_{ym} = \lambda_1 K_o T_{\mu c} U_{zc} = \frac{K_o U_{ymax} T_{\mu c}}{\lambda_2}$.

Для того чтобы амплитуда выходного сигнала u_{ym} соответствовала заданному значению Φ_{max} , а это возможно при $u_{ym} = U_{ymax}$, коэффициент пропорциональности объекта должен быть равен:

$$K_o = \frac{\lambda_2}{T_{\mu c}} = \omega_k. \quad (1)$$

В этом случае амплитуда гармонического значения скорости приводного редуктора определяется по формуле

$$\omega_m = |W_c(\omega_k)| U_{y\max} = \frac{U_{y\max}}{K_c \sqrt{1 + 4\lambda_2^4}} \approx \frac{U_{y\max}}{K_c},$$

что соответствует максимальному значению скорости приводного редуктора

$$\omega_{\max} = \frac{U_{y\max}}{K_c} \approx \omega_m.$$

На основании вышесказанного представим на рис. 2 ЛАЧХ нескорректированного контура угла.

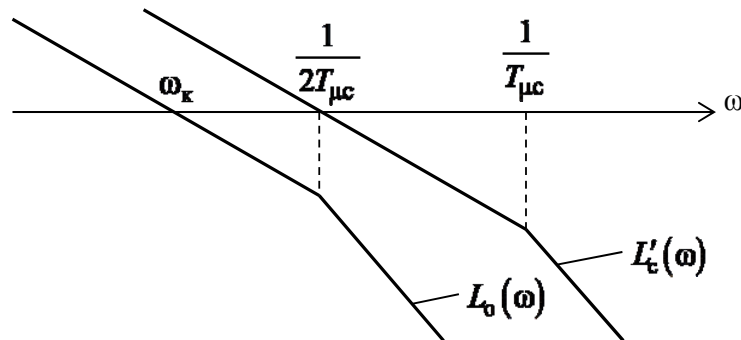


Рис. 2. ЛАЧХ нескорректированного контура угла (объекта управления)

$$L_0(\omega) = 20 \lg |W_0(j\omega)| \text{ и разомкнутого контура скорости } L'_c(\omega) = 20 \lg \left| \frac{W_c(j\omega)}{1 - W_c(j\omega)} \right|$$

Для определения желаемой ЛАЧХ контура угла определяется критерий синтеза следящей системы:

- 1) максимально возможная точность;
- 2) наименьший показатель колебательности;
- 3) быстродействие ограничивается быстродействием контура скорости.

Решение задачи

Оптимальным вариантом, удовлетворяющим критерию синтеза, является предельный случай [1] желаемой ЛАЧХ разомкнутого контура угла для следящей системы с астатизмом второго порядка $L'_y(\omega)$ (рис. 3).

Предельный случай ЛАЧХ рассматривается в силу того, что все малые постоянные времени контуров скорости и тока принимаем намного меньшими, чем $2T_{\muс}$.

Передаточная функция скорректированного контура угла:

$$W'_y(p) = \frac{K_\varepsilon (T_k p + 1)}{p^2},$$

где $K_\varepsilon = \frac{\lambda_2}{2T_{\muс}^2}$ – добротность по ускорению контура угла; $T_k = \frac{1}{\omega_k} = \frac{T_{\muс}}{\lambda_2}$.

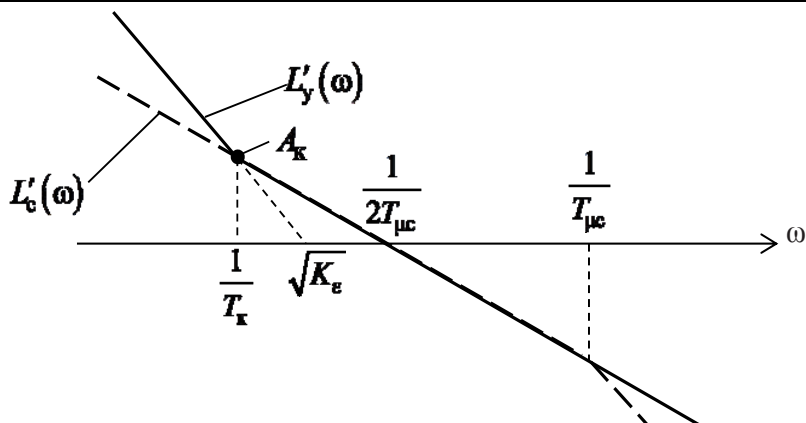


Рис. 3. ЛАЧХ скорректированного разомкнутого контура угла $L'_y(\omega)$

Передаточная функция регулятора угла:

$$W_{py}(p) = \frac{W'_y(p)}{W_o(p)} = K_{py} \frac{(T_k p + 1)(2T_{\mu c} p + 1)}{p}, \quad (2)$$

где $K_{py} = \frac{K_{\epsilon}}{K_o}$ – коэффициент усиления регулятора угла.

С учётом формулы (1) коэффициент усиления составит $K_{py} = \frac{1}{2T_{\mu c}}$.

Быстродействие контура угла и контура скорости одинаково, т.к. их частоты среза равны. Определим показатель колебательности M и АЧХ в контрольной точке A_k (см. рис. 3):

$$M = \max \left(\left| \frac{W'_y(j\omega)}{1 + W'_y(j\omega)} \right| \right) = 1,32, \quad A_k = \frac{u_{ym}}{e_m} = \left| \frac{W'_y(j\omega_k)}{1 + W'_y(j\omega_k)} \right| = 2,3.$$

Колебательность следящей системы является приемлемой, но исходя из значения АЧХ A_k амплитуда ошибки составляет $e_m = \frac{u_{ym}}{A_k} \approx 0,43u_{ym}$. Такая ошибка по амплитуде является большой, поэтому для повышения точности следящей системы необходимо вводить компенсационный канал с передаточной функцией

$$W_k(p) = \frac{1}{W_o(p)} = \frac{p(2T_{\mu c} p + 1)}{K_o} = \frac{2T_{\mu c}}{K_o} p^2 + \frac{1}{K_o} p,$$

где в передаточной функции объекта управления пренебрегаем членом высшего порядка $2T_{\mu c}^2 p^2$.

Для понижения порядка компенсатора передаточную функцию регулятора угла (см. формулу (2)) разделим на две части (рис. 4).

Регулятор угла слежения представляет собой ПИ- и ПД-регулятор (ПИПД-регулятор) с передаточными функциями

$$W'_{py}(p) = K_{py} \frac{T_{py1} p + 1}{p}, \quad W''_{py}(p) = T_{py2} p + 1,$$

где $T_{py1} = T_k = \frac{T_{\mu c}}{\lambda_2}$, $T_{py2} = 2T_{\mu c}$ – постоянные времени регулятора угла.

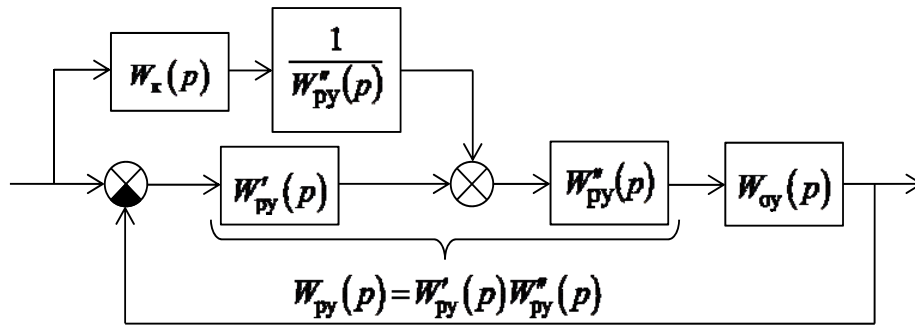


Рис. 4. Разделение регулятора угла на две части $W_{py}'(p)$ и $W_{py}''(p)$

Новая передаточная функция компенсирующего устройства станет на порядок меньше и представляет собой дифференцирующее устройство первого порядка:

$$W_k(p) = \frac{1}{W_o(p)W_{py}''(p)} = \frac{p(2T_{\mu c}p+1)}{K_o(2T_{\mu c}p+1)} = \frac{1}{K_o}p.$$

Структурная схема следящей системы представлена на рис. 5.

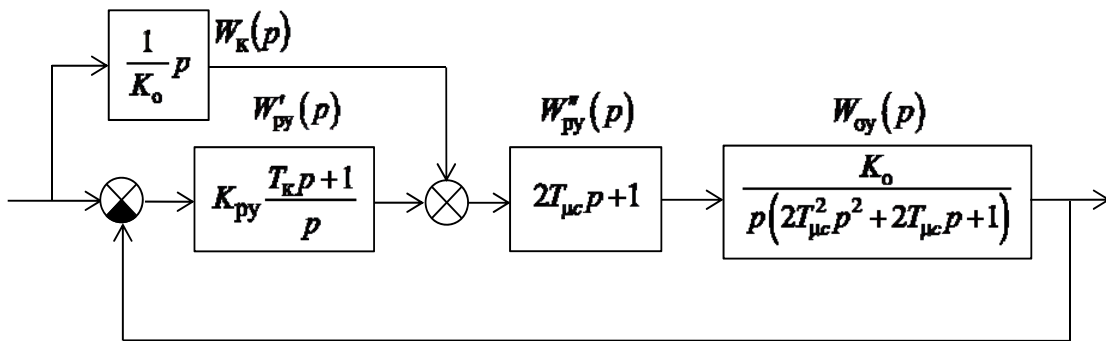


Рис. 5. Структурная схема следящей системы

Анализ точности слежения

Используем передаточную функцию объекта управления с учётом члена высшего порядка в контуре тока $2T_{\mu t}^2p^2 = T_{\mu t}T_{\mu c}p^2$, тогда

$$W_o(p) = \frac{K_o}{p(T_{\mu c}^3p^3 + 2T_{\mu c}^2p^2 + 2T_{\mu c}p+1)}.$$

Для оценки точности определим эквивалентную передаточную функцию следящей системы в разомкнутом состоянии:

$$W_3(p) = \frac{W_3(p)}{1-W_3(p)} = \frac{\lambda_2}{4T_{\mu c}^4} \frac{(2T_{\mu c}p+1)(2T_{\mu c}T_k p^2 + T_k p+1)}{p^4(T_{\mu t}p+1)},$$

где $W_3(p) = \frac{W_o(p)W_{py}''(p)(W_k(p)+W_{py}'(p))}{1+W_o(p)W_{py}'(p)W_{py}''(p)}$ – передаточная функция следящей системы в замкнутом состоянии.

При обработке следящей системой гармонического воздействия точность определяется фазовой и относительной амплитудной ошибкой [1]. Рассмотрим гармоническое воздействие с единичной амплитудой $\vartheta_{1m} = 1$ и с контрольной частотой $\vartheta_1 = \vartheta_{1m} \sin \omega_k t$. Тогда сигнал на выходе следящей системы в установившемся режиме равен:

$$\vartheta_2 = W_3(j\omega_k) \vartheta_1 = \vartheta_{2m} \sin(\omega_k t + \varphi_2),$$

где $\vartheta_{2m} = \vartheta_{1m} \sqrt{\frac{(4\lambda_2^2 + 1)(2\lambda_2^2 - 2\lambda_2 + 1)}{2\lambda_2^8 + 4\lambda_2^5 - 6\lambda_2^4 - 4\lambda_2^3 + 6\lambda_2^2 - 2\lambda_2 + 1}} \approx \vartheta_{1m}$ – амплитуда выходного сигнала, которая

равна амплитуде входного сигнала; $\varphi_2 = \arctg \frac{\lambda_2^3(4\lambda_2^2 - 3\lambda_2 - 2)}{4\lambda_2^6 - 2\lambda_2^5 - \lambda_2^4 + 6\lambda_2^3 - 6\lambda_2^2 + 2\lambda_2 - 1} = 0,095$ – сдвиг

фаз между входным и выходным сигналами.

Положительное значение φ_2 означает, что выходной сигнал изменяется с опережением. Для компенсации сдвига фазы на входе следящей системы необходимо поставить фильтр первого порядка с постоянной времени, равной:

$$T_\Phi = \frac{\lambda_2^2(4\lambda_2^2 - 3\lambda_2 - 2)T_{\mu c}}{4\lambda_2^6 - 2\lambda_2^5 - \lambda_2^4 + 6\lambda_2^3 - 6\lambda_2^2 + 2\lambda_2 - 1} \approx 0,3T_{\mu c}. \quad (3)$$

С использованием фильтра в установившемся режиме сигнал на выходе будет равен сигналу на входе, сдвиг фазы между сигналами отсутствует.

Пример решения задачи

Приведём простой пример расчёта регулятора угла слежения и проведём моделирование переходных процессов с помощью пакета Simulink в среде MatLab.

Рассмотрим мотор-редуктор МТС 12А [3] с передаточным числом редуктора $u_p = 10,1$, мощностью двигателя 0,75 кВт, максимальной скоростью двигателя $\omega_{д, \max} = 157 \text{ с}^{-1}$, максимальным моментом двигателя $M_{д, \max} = 13,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$, максимальным током двигателя $I_{д, \max} = 9,5 \text{ А}$, моментом инерции двигателя $J_d = 0,0015 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Момент инерции привода примем равным $J_{пр} = 2J_d = 0,003 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, малую постоянную времени контура скорости примем равной $T_{\mu c} = 0,005 \text{ с}$, тогда $T_{\mu c} = 0,01 \text{ с}$. Следовательно, контрольная частота $\omega_k = 30,9 \text{ с}^{-1}$. Примем, что максимальные значения сигналов управления на входе контуров регулирования и объекта управления равны $U_{\max} = 10 \text{ В}$. Коэффициент датчиков тока и скорости

$$K_T = \frac{U_{\max}}{I_{д, \max}} = 1,05, \quad K_c = \frac{U_{\max}}{\omega_{\max}} = 0,64.$$

Коэффициент пропорциональности объекта примем равным из условия (1): $K_o = \omega_k = 30,9$, тогда максимальный угол слежения составит

$$\varphi_{\max} = \frac{K_o}{\omega_{\max}} = \frac{K_o}{\omega_{д, \max} u_p} = 0,5 \text{ рад},$$

а коэффициент датчика угла

$$K_y = \frac{U_{\max}}{\varphi_{\max}} = 19,88.$$

Параметры регуляторов скорости и угла слежения:

$$K_{pc} = \frac{\omega_{д. max} J_{пр}}{M_{д. max} 2T_{\mu c}} = 1,71, \quad K_{py} = \frac{1}{2T_{\mu c}} = 50, \quad T_{py1} = \frac{T_{\mu c}}{\lambda_2} = 0,032, \quad T_{py2} = 2T_{\mu c} = 0,02.$$

На рис. 6 представлена структурная схема следящей системы с контуром тока и фильтром на входе. На вход следящей системы подаём гармонический сигнал с амплитудой U_{max} , частотой ω_k и с максимальным фазовым рассогласованием в начальный момент времени.

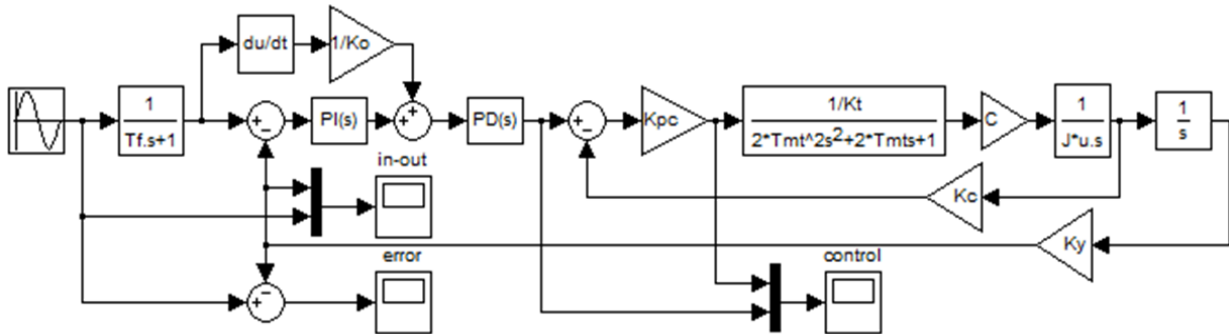


Рис. 6. Структурная схема следящей системы с ПИД-регулятором угла слежения

На рис. 7 представлен результат сравнения входного и выходного сигналов следящей системы. В начальный момент времени рассогласование сигналов составляет максимально возможное значение U_{max} , что является крайним случаем для тестирования. Видно, что переходной процесс продолжается три периода входного сигнала, что является главным недостатком следящей системы с ПИД-регулятором.

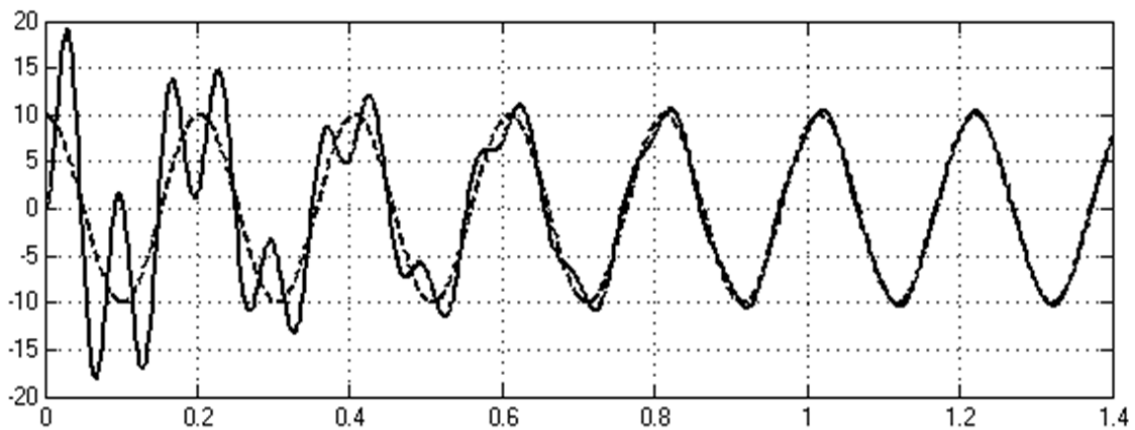


Рис. 7. Графики входного (пунктирная линия) и выходного (сплошная линия) сигналов следящей системы (элемент Score «in-out»)

Фрагмент сигнала рассогласования между входным и выходным сигналами в установившемся режиме представлен на рис. 8. На графике видно, что амплитуда сигнала рассогласования составляет не больше 1,5 % от амплитуды входного сигнала, что свидетельствует о высокой точности слежения.

Также интересными представляются сигналы управления на входах контуров скорости и тока. На рис. 9 представлены сигналы управления в установившемся режиме. Видно, что амплитуды этих сигналов не превышают максимального значения U_{max} , что решает вопрос о влиянии токоограничения на качество слежения

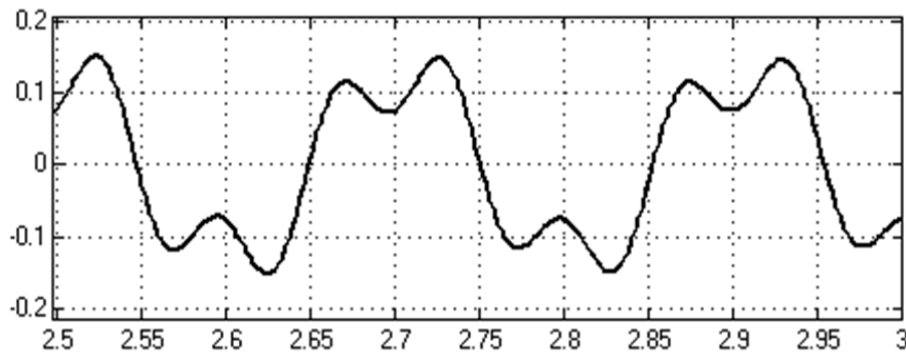


Рис. 8. График сигнала рассогласования следящей системы (элемент Score «error»)

Выполнение условия (1) приводит к тому, что амплитуда сигнала управления контура скорости не превышает значения U_{\max} . Для того чтобы амплитуда сигнала управления контура тока не превышала значения U_{\max} , необходимо соблюдение условия (1) и условия $\frac{M_{д,\max}}{J_{пр} \omega_{д,\max}} \geq \omega_k$.

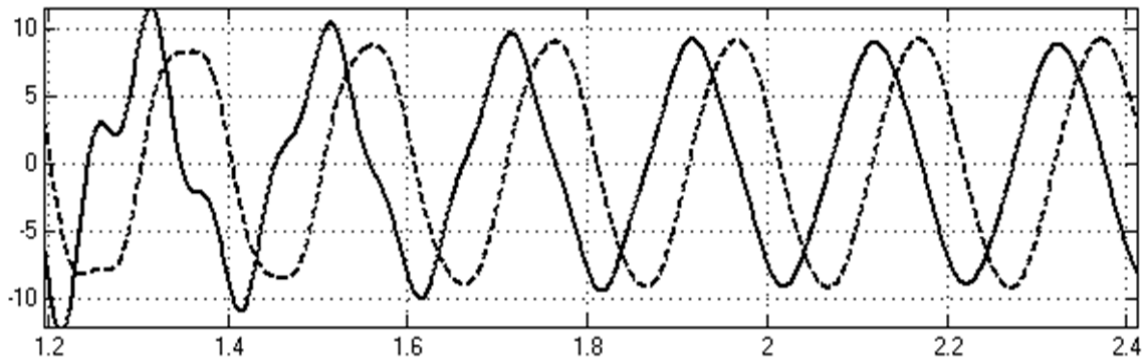


Рис. 9. График сигналов управления контуров тока (сплошная линия) и скорости (пунктирная линия) (элемент Score «control»)

Выводы

Основными достоинствами рассмотренной методики являются:

- 1) Расчёт параметров ПИПД-регулятора не требует знания параметров силовой части следящего привода при соблюдении условия (1), поэтому методику можно отнести к категории стандартных.
- 2) Высокая точность следящей системы как по амплитуде, так и по фазе, а также выполнение условия ограничения амплитуд сигналов управления позволяют изготавливать следящие системы с высоким быстродействием.

Недостатком следящей системы с ПИПД-регулятором является высокий показатель колебательности из-за использования компенсирующего устройства. Данный недостаток предполагается устранить посредством использования скользящего режима для переключения фильтра, компенсирующего нули в передаточной функции $W_3(p)$ и фильтра первого порядка (см. формулу (3)) в зависимости от величины рассогласования следящей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессекерский, В. А. Теория автоматического управления / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
2. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учеб. для студентов вузов / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
3. Цилиндрические соосные мотор-редукторы МТС...А [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – http://tehprivod.ru/files/informatsiya/mtc_a.pdf – (Дата обращения: 30.04.2016).

МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

Пронин А. И., Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Мыльников В. В.
A. I. Pronin, Ye. B. Shchelkunov, S. V. Vinogradov, M. Ye. Shchelkunova, V. V. Mylnikov

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ ТОЧЕНИЕМ

INVESTIGATION OF CUTTING FORCE IN HARDENED STEEL TURNING

Пронин Александр Иннокентьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский на Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mdsov@knastu.ru.

Mr. Alexander I. Pronin – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mdsov@knastu.ru.

Щелкунов Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский на Амуре государственный технический университет», (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

Mr. Yevgeny B. Shchelkunov – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Виноградов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский на Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Mr. Sergey V. Vinogradov – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Щелкунова Марина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» ФГБОУ ВО «Комсомольский на Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Ms. Marina Ye. Shchelkunova – PhD in Engineering, Associate Professor, Software and computer application Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Мыльников Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология металлов» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева» (Россия, г. Нижний Новгород).

Mr. Vladimir V. Mylnikov – PhD in Engineering, Associate Professor, Metal Technology Department, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (Russia, Nizhny Novgorod).

Аннотация. В работе представлены результаты влияния параметров обработки величины скорости резания и подачи на составляющие силы резания при точении закаленной стали марок 45, 40X, 50X, ХВГ твердостью 45..50 HRC инструментом, оснащенный режущей керамикой ВОК-60. Для проведения экспериментального исследования был использован лабораторный стенд, включающий в себя токарно-винторезный станок 1К625 и измерительное устройство модели STD.201-2. Установлено наличие диапазона скоростей резания обеспечивающих минимальные значения величин составляющих сил резания.

Summary. The paper presents results of the processing parameter effect, i.e. the magnitude of cutting speed and cutting force component feed in turning of hardened steel grades 45, 40X, 50X, CVH hardness 45..50 HRC with the help of the tool equipped with cutting ceramics EQA-60. The laboratory bench has been used for experimental studies, including a screw-cutting lathe 1K625 and the measuring device STD.201-2. The presence of the cutting speed range providing the minimum magnitude of the cutting force components is established.

Ключевые слова: режущая керамика, закаленная сталь, резец, твердое точение, скорость резания, подача резания, сила резания.

Key words: cutting ceramics, hardened steel, cutter, hard turning, cutting speed, cutting feed, cutting force.

УДК 621.9.02

Введение

Одной из важных задач, стоящих перед современными машиностроительными предприятиями, является внедрение прогрессивных методов обработки резанием, позволяющих обеспечить выпуск конкурентоспособной продукции, отвечающей требованиям минимальной себестоимости и высокого качества выпускаемых изделий. К таким методам относится твердое точение – токарная обработка стальных заготовок, закаленных до твердости 45..50 HRC.

Повышенный интерес к твердому точению объясняется тем, что эта технология позволяет существенно повысить производительность обработки закаленных сталей, а также, добиться точности и шероховатости обработанных поверхностей, получаемых при шлифовании.

Цель работы состоит в исследовании влияния параметров обработки, при которых наблюдаются признаки твердого точения на составляющие силы резания.

Методика проведения исследования

Для проведения экспериментального исследования был использован лабораторный стенд модели STD.201-2, включающий в себя корпус – головку резцедержатель с расположенным в нем комплектом измерительных преобразователей (динамометров), служащих для регистрации составляющих силы резания осевой F_x , радиальной F_y и тангенциальной F_z , интерфейсный блок для преобразования регистрируемых данных в формат high-speed USB 2.0 и передачи их в ЭВМ.

Стенд модели STD.201-2 был установлен на суппорт токарно-винторезного станка модели 1К625.

При проведении экспериментального исследования использовались проходные резцы с механическим креплением сменных многогранных пластин трехгранной формы класса U из режущей керамики марки ВОК-60. Геометрические параметры резцов: передний угол $\gamma = -8^\circ$; задний угол $\alpha = 8^\circ$; угол наклона режущей кромки $\lambda = 5^\circ$; длина режущей кромки $l = 16,5$ мм; толщина режущей пластины $s = 4,76$ мм; радиус при вершине $r = 0,8$ мм.

Эксперименты проводились на закаленных до 40...50 HRC заготовках диаметром 110 мм, длиной 350 мм, изготовленных из стали марок: 45, 40X, 50X, ХВГ.

Для проведения эксперимента заготовка зажималась в 3-х-кулачковом патроне станка 1К625 и поджималась задним центром. Резец устанавливался в резцедержателе станда STD.201-2.

Обработка проводилась в диапазоне скоростей и подач, обоснованных ранее в работах [1; 2; 3].

Для минимизации влияния износа режущей пластины на результаты исследования перед каждым проходом производилась смена режущей кромки пластины.

В процессе резания фиксировались составляющие силы резания по осям X , Y , Z в виде осциллограмм с частотой дискретизации 25 000 Гц и сохранялись в виде файлов формата xls.

По полученным значениям строились зависимости средних значений составляющих силы резания от скорости резания и подачи.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты исследования показали, что зависимости силы резания от скорости резания имеют схожий экспоненциальный характер, проявляющийся в виде тенденции к уменьшению составляющих силы резания до определенного минимума с дальнейшим возрастанием.

В диапазоне скоростей резания, при которых наблюдаются минимальные значения составляющих силы резания, проявляются признаки высокоскоростного твердого точения, сопровождающегося выделением большого количества тепла, переходящего в стружку (см. рис. 1) и снижением сил резания из-за пластификации (разупрочнения) поверхностного слоя обрабатываемой заготовки.

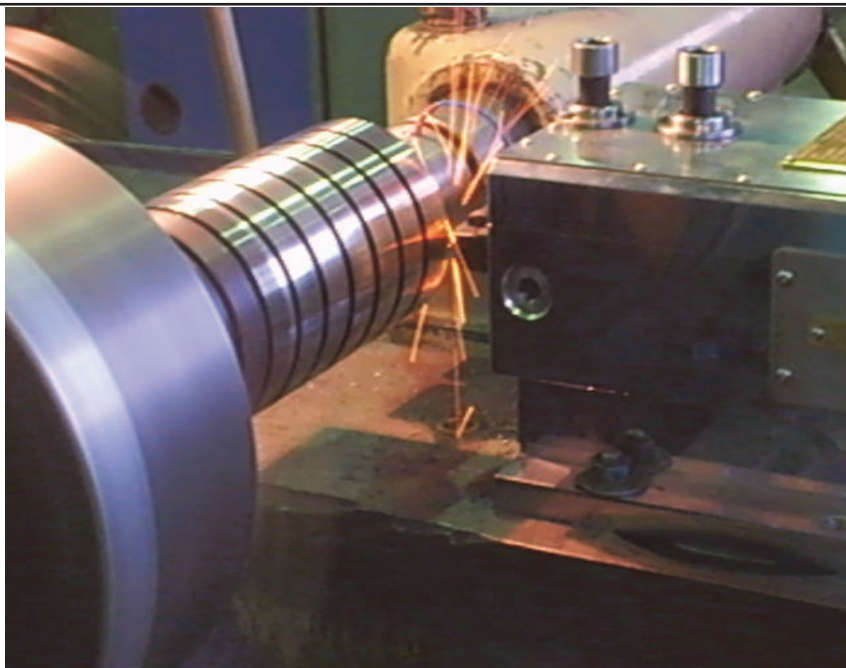


Рис. 1. Обработка закаленной стали 40X при подаче $S_0 = 0,07$ мм/об и глубине резания $t = 0,2$ мм

На рис. 2 представлена зависимость составляющих силы резания, полученная при обработке стали 40X. Все составляющие силы резания имеют минимальное значение в диапазоне скоростей резания 370...400 м/мин.

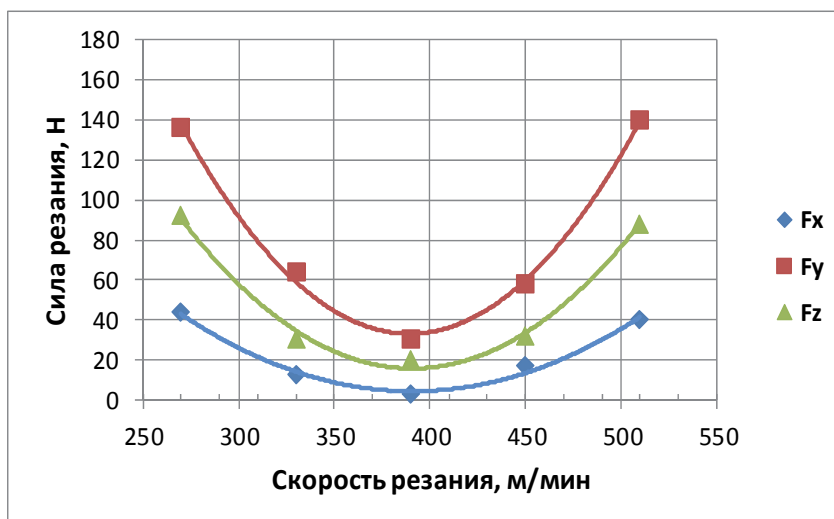


Рис. 2. Зависимость составляющих силы резания от скорости резания при обработке стали 40X при подаче $S_0 = 0,07$ мм/об и глубине резания $t = 0,2$ мм

Исследование зависимости силы резания от подачи показали, что между составляющими силы резания и подачей существует прямая линейная зависимость, что согласуется с классическими представлениями теории резания. С увеличением величины подачи сечение стружки увеличивается, поэтому металл сопротивляется разрыву больше и требует больших усилий для удаления стружки. На рис. 3 представлены зависимости составляющих силы резания от подачи на оборот S_0 при точении стали 40X со скоростью резания $V = 390$ м/мин. Радиальная составляющая силы резания доминирует над другими составляющими.

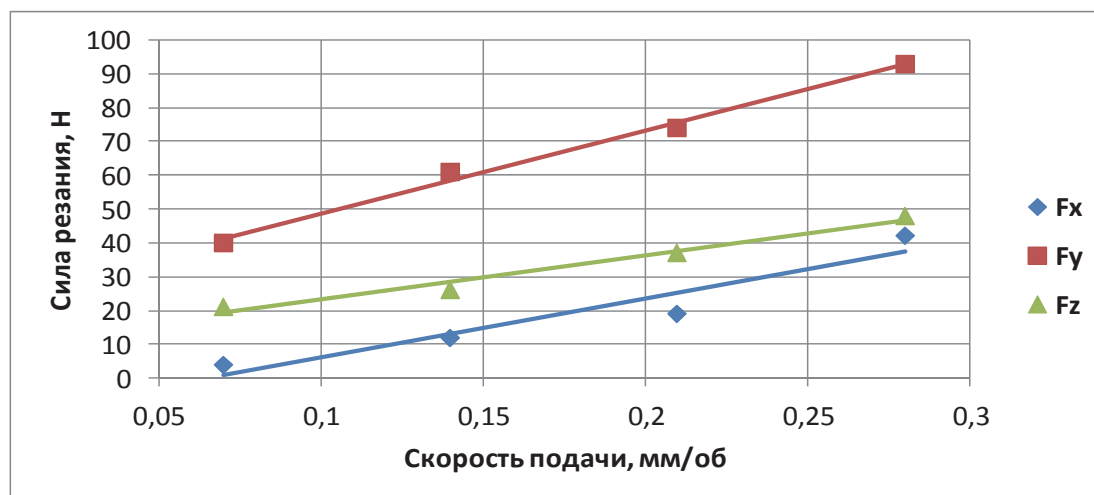


Рис. 3. Зависимость составляющих силы резания от скорости подачи при обработке стали 40X при скорости резания $V = 390$ м/мин и глубине резания $t = 0,2$ мм

Заключение

В ходе исследования зависимости силы резания от скорости резания и величины подачи при «твердом точении» выявлен диапазон скоростей резания закаленных сталей с минимальными значениями составляющих силы резания, который можно считать наиболее благоприятным для обработки закаленных сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пронин, А. И. Определение оптимальной скорости резания твердого точения с использованием сигналов акустической эмиссии / А. И. Пронин, В. В. Мыльников, Е. А. Чернышев, Д. И. Шетулов // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 4. – С. 40-44.
2. Пронин, А. И. Причины низкой работоспособности пластин из режущей керамики при твердом точении / А. И. Пронин, В. В. Мыльников, Е. А. Чернышев // Материаловедение. – 2014. – № 5. – С.13-15.
3. Пронин, А. И. Особенности применения сверхтвёрдых материалов и режущей керамики при токарной обработке труднообрабатываемых материалов / А. И. Пронин, Б. Я. Мокрицкий, С. В. Виноградов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 88-92.

**Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Пронин А. И., Самар Е. В., Рябов С. А.
Ye. B. Shchelkunov, S. V. Vinogradov, M. Ye. Shchelkunova, A. I. Pronin, Ye. V. Samar, S. A. Ryabov**

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

THE CLASSIFICATION OF PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS

Щелкунов Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

Mr. Yevgeny B. Shchelkunov – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Виноградов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Mr. Sergey V. Vinogradov – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergwin72@rambler.ru

Щелкунова Марина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Ms. Marina Ye. Shchelkunova – PhD in Engineering, Associate Professor, Software and computer application Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Пронин Александр Иннокентьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mdsov@knastu.ru.

Mr. Alexander I. Pronin – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mdsov@knastu.ru.

Самар Елизавета Владимировна – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: esamar@inbox.ru.

Ms. Elizaveta V. Samar – a post-graduate student, Material Engineering and Advanced Material Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: esamar@inbox.ru.

Рябов Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева» (Россия, Кемерово). E-mail: rsa.msi@mail.ru.

Mr. Sergey A. Ryabov – PhD in Engineering, associate professor, Metal cutters and tool Department, Kuzbass state technical university named after T. F. Gorbachyov (Russia, Kemerovo). E-mail: rsa.msi@mail.ru.

Аннотация. В статье представлена оригинальная систематизация теоретически возможных реализаций компоновочных схем механизмов параллельной структуры, служащая основой для реализации алгоритма расчета геометрических параметров механизма, заложенного в шаблоне, соответствующем данной компоновочной схеме и заданным исходным данным. Представленная систематизация позволяет значительно сократить временные затраты на начальном этапе проектирования механизмов параллельной структуры.

Summary. The article presents an original classification and typing of theoretically possible realizations of layout diagrams containing parallel structure mechanisms that provide the basis for the implementation of the algorithm for calculating the mechanism geometric parameters. The mechanism is embedded in a pattern corresponding to this layout diagram and assigned initial data. The given classification can significantly reduce the time spent on the initial stage of designing mechanisms of parallel structure.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, приводная штанга, шарнир, металлообрабатывающий станок, компоновка.

Key words: parallel structure mechanism, actuating rod, hinge, metal working machine, the layout.

УДК 621.01

Одним из новых видов технологического оборудования являются металлообрабатывающие станки с параллельной кинематикой, в которых все рабочие движения подачи сообщаются одному рабочему органу (шпиндельной головке или столу). Основным элементом таких станков является механизм параллельной структуры (МПС) [1].

На сегодняшний день МПС, применяемые в металлообрабатывающих станках, представлены широким разнообразием исполнения (компоновок). Их классифицируют по следующим конструктивным признакам: по виду (постоянной или переменной длины) и количеству приводных штанг; по характеру расположения на платформе и основании шарниров приводных штанг и др. [2].

Многообразие компоновок МПС является следствием разнообразия технологических задач, для решения которых предназначены станки.

Проектирование станка с параллельной кинематикой является трудоемкой конструкторской задачей, сопровождаемой массой промежуточных расчетов, связанных с определением углов размещения шарниров на платформе и основании, увязкой размеров элементов механизма и др.

Автоматизация, позволяющая сократить временные затраты на проектирование, подразумевает формализацию расчетов, т.е. применение в расчетах некоторого шаблона или алгоритма, согласно которому вычислительная машина будет осуществлять вычисления параметров проектируемого механизма, сравнивать рассчитанные варианты между собой.

Авторами предлагается оригинальная систематизация и типизация теоретически возможных реализаций компоновочных схем МПС, позволяющая реализовать конкретный алгоритм задания исходных данных и расчета геометрических параметров механизма, заложенный в шаблоне, соответствующем данной компоновочной схеме.

Для формализации расчетов все теоретически возможные компоновки МПС авторы предлагают разделить на типы, объединяющие в себе компоновки с наибольшим числом общих признаков.

Предлагаемая систематизация теоретически возможных реализаций компоновочных схем МПС позволяет реализовать алгоритм расчета геометрических параметров механизма, заложенный в шаблоне, соответствующем данной компоновочной схеме и заданным исходным данным [3; 4; 5].

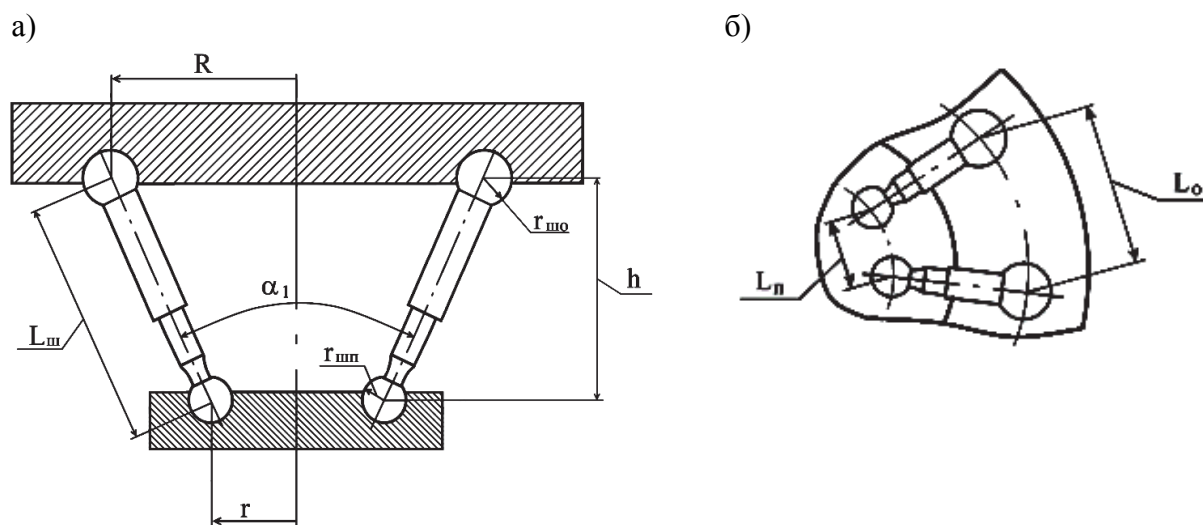


Рис. 1. Конструктивные элементы МПС со штангами переменной длины:
а – вид сбоку (сечение); б – расположение штанг в плане

На рис. 1 условно показаны основные конструктивные элементы МПС, определяющие его компоновку. На рис. 1 использованы следующие обозначения: радиус основания R ; радиус подвижной платформы r ; расстояние между основанием и платформой h ; начальный угол расхождения штанг α_1 ; радиусы шарниров на основании $r_{ш0}$ и подвижной платформе $r_{шп}$; расстояния между шарнирами на основании L_0 и платформе $L_п$; длина штанги $L_{ш}$.

Так как большинство известных программных продуктов для расчета параметров МПС ориентированы на проектирование механизмов типа «гексапод» [6; 7], то предлагаемая в работе систематизация представлена на примере МПС с шестью приводными штангами.

Все множество компоновочных схем авторы разделили на две условные группы:

1) симметричные, где все шарниры основания и платформы размещены так, чтобы выполнялось условие симметрии вращения как для подвижной платформы и основания в отдельности, так и для всей схемы в целом. При вращении компоновочной схемы вокруг оси симметрии (прямой, проходящей через центры основания и подвижной платформы) на угол, кратный 120° , она проецируется сама на себя;

2) асимметричные, где размещение шарниров не подчиняется какому-либо порядку.

Среди многообразия типов симметричных компоновок МПС были выделены три частных случая с присвоением им собственных названий:

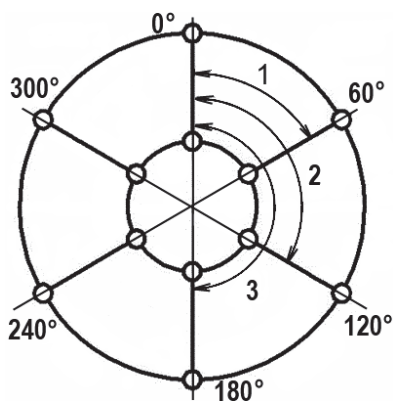


Рис. 2. Конструктивные параметры «равномерной» компоновки МПС: 1, 2, 3 – углы размещения шарниров приводных штанг относительно начала отсчета

1) «Равномерная» компоновка (см. рис. 2). Шарниры приводных штанг на основании и платформе размещены равномерно с шагом 60° . Начала отсчета углов на подвижной платформе и основании совпадают. При вращении компоновки вокруг оси симметрии на угол, кратный 60° , она проецируется сама на себя. Такая компоновка чаще применяется при расчетах в теоретических исследованиях.

2) «Попарно параллельная» компоновка (см. рис. 3). Шарниры на основании и подвижной платформе размещены попарно. Пары шарниров расположены через каждые 120° . Хорды (расстояние между осями шарниров) между ближайшими парами шарниров на платформе и основании равны. Хорда между ближайшими шарнирами в паре всегда меньше хорды между ближайшими шарнирами из разных пар. Штанги в каждой паре параллельны друг другу.

3) «Ферменная» компоновка (см. рис. 4). Компоновка так названа за ее сходство с одноименной строительной конструкцией. Шарниры на основании и подвижной платформе расположены попарно. В отличие от «попарно параллельной» компоновки ближайшая пара шарниров на платформе смещена относительно ближайшей пары шарниров на основании на 60° . При этом хорда в паре всегда меньше, чем хорда между ближайшими шарнирами из разных пар.

Помимо выделенных выше частных случаев, симметричная схема размещения штанг в механизме может быть реализована во множестве вариантов. В предлагаемой типизации компоновок эти схемы обозначены как «другие» симметричные.

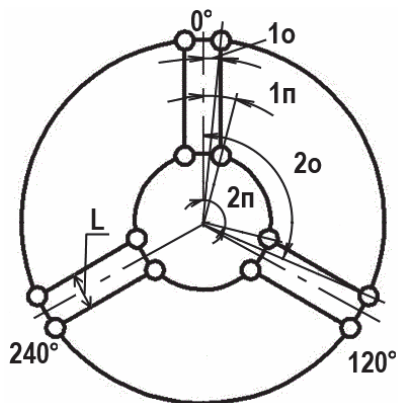


Рис. 3. Конструктивные параметры «парно параллельной» компоновки МПС:
 $1о, 2о$ – углы размещения шарниров приводных штанг на основании;
 $1п, 2п$ – углы размещения шарниров приводных штанг на подвижной платформе;
 L – расстояние между шарнирами в паре

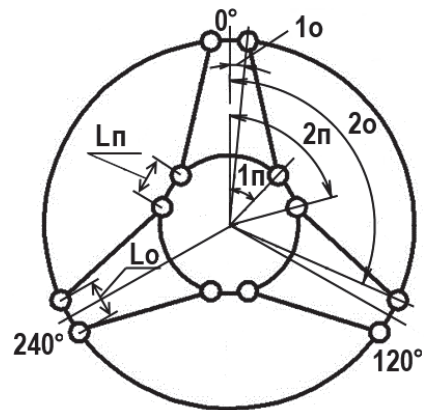


Рис. 4. Конструктивные параметры «ферменной» компоновки МПС:
 $1о, 2о$ – углы размещения шарниров приводных штанг на основании;
 $1п, 2п$ – углы размещения шарниров приводных штанг на подвижной платформе;
 $Lо$ – расстояние между шарнирами в паре на основании; $Lп$ – расстояние между шарнирами в паре на подвижной платформе

На рис. 5 приведены примеры «других» симметричных схем размещения штанг в МПС.

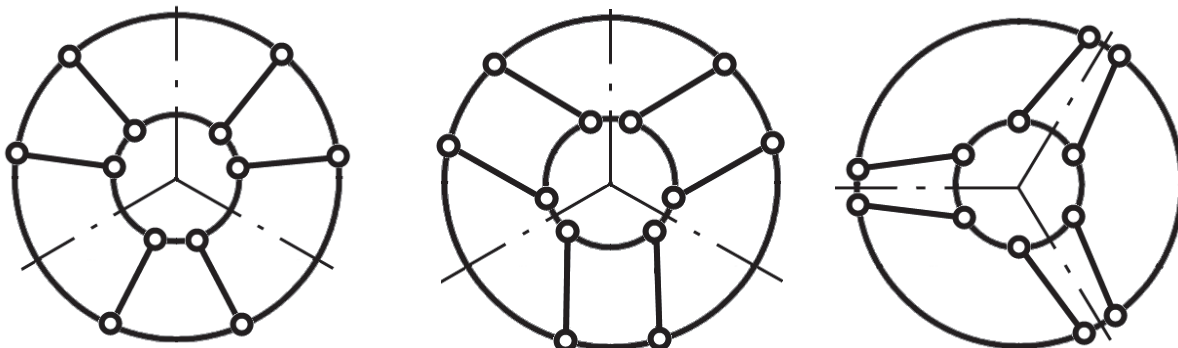


Рис. 5. Схемы симметричной компоновки МПС

На примере схемы на рис. 5 показаны конструктивные параметры компоновки (см. рис. 6).

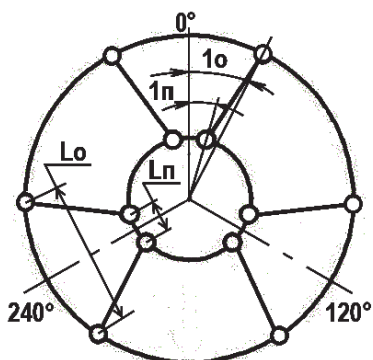


Рис. 6. Конструктивные параметры симметричной компоновки МПС

На рис. 7 показаны примеры асимметричной схемы размещения штанг в механизме, которую можно реализовать в бесконечном множестве вариантов.

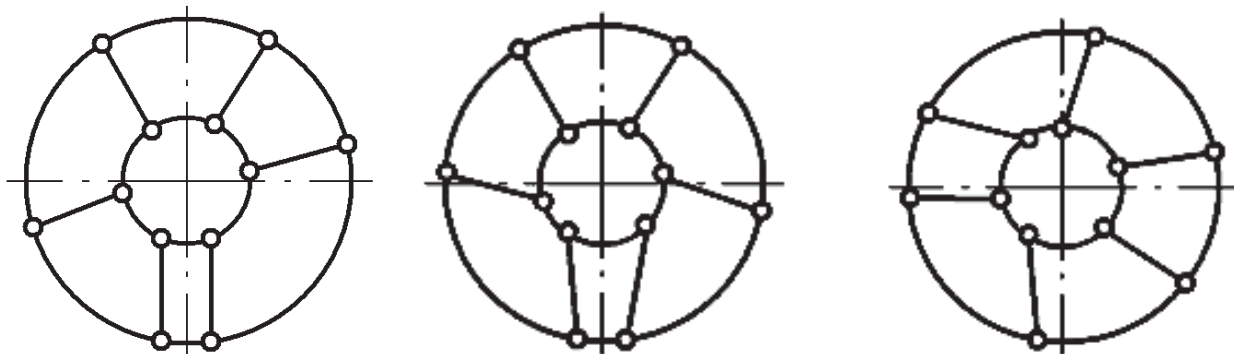


Рис. 7. Схемы асимметричной компоновки МПС

На примере схемы на рис. 7 показаны конструктивные параметры асимметричной компоновки (см. рис. 8). Для асимметричной компоновки углы размещения шарниров приводных штанг на основании и подвижной платформе задаются индивидуально для каждого шарнира.

Предлагаемая систематизация, представленная в работе на примере гексапода, применима и для других типов МПС. В табл. 1 приведена возможная реализация компоновок для МПС с различным количеством приводных штанг. Например, попарно параллельная компоновка может быть реализована в механизмах с четырьмя и с шестью штангами.

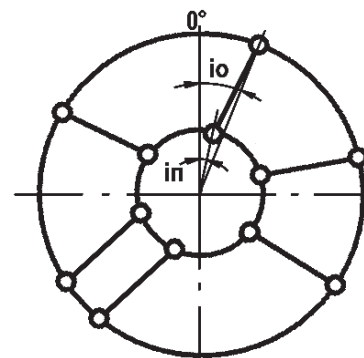


Рис. 8. Конструктивные параметры асимметричной компоновки МПС: i_o , i_p – углы размещения шарниров на основании и подвижной платформе

Таблица 1

Реализация компоновок для МПС

Вид компоновки		Количество приводных штанг				
		2	3	4	5	6
Симметричная	равномерная	+	+	+	+	+
	ферменная			+		+
	попарно параллельная			+		+
	другая			+		+
Асимметричная			+	+	+	+

В работе проведена систематизация компоновочных решений для механизмов параллельной структуры. Представленная систематизация позволяет значительно сократить временные затраты на начальном этапе проектирования механизмов параллельной структуры за счет оригинальной формализации всех процессов расчетов и использования готовых шаблонов.

Работа выполнена при поддержке гранта на проведение научных исследований в области фундаментальных и технических наук № 92/2016 Д Министерства образования и науки Хабаровского края.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкунов, Е. Б. Металлообработка 2011 / Е. Б. Щелкунов, А. С. Хвостиков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1(8). – С. 21-30.
2. Щелкунов, Е. Б. Механизмы параллельной структуры в металлорежущих станках / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, Е. В. Самар // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № IV-1(12). – С. 52-61.
3. Щелкунов, Е. Б. Программа для проектирования механизмов параллельной структуры / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, А. И. Пронин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № IV-1(24). – С. 46-49.
4. Щелкунов, Е. Б. Автоматизация проектирования механизмов параллельной структуры со штангами переменной длины / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, Д. Г. Посажеников // Технология машиностроения. – 2015. – № 11. – С. 51-55.
5. Щелкунов, Е. Б. Автоматизация проектирования механизмов параллельной структуры / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, М. Ю. Сариллов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-17. – С. 3748-3752.
6. Подленко, О. Н. Параметрический синтез формообразующих систем станков на базе механизмов с параллельной кинематикой : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Подленко Олег Николаевич. – Хабаровск, 2005. – 145 с.
7. Хольшев, И. Г. Проектирование структуры станков типа тексапод : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Хольшев Игорь Геннадьевич. – М., 2001. – 240 с.

Ивичева Е. В., Сариллов М. Ю.
МЕТОДИКА ПОДБОРА ПОТЕНЦИАЛЬНО ЭФФЕКТИВНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ОТЛОЖЕНИЙ

Ивичева Е. В., Сариллов М. Ю.
E. V. Ivicheva, M. Yu. Sarilov

МЕТОДИКА ПОДБОРА ПОТЕНЦИАЛЬНО ЭФФЕКТИВНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ОТЛОЖЕНИЙ

SELECTION METHOD OF POTENTIALLY EFFECTIVE WARE SOLUTIONS FOR SEDIMENT CLEARING

Ивичева Екатерина Вячеславовна – магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kattichka@gmail.com.

Ms. Ekaterina V. Ivicheva – master degree student, Chemical Industry Machinery and Equipment Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kattichka@gmail.com.

Сариллов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – D.Sc. in engineering, Head of the Department of Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Аннотация. В статье предложена лабораторная методика подбора потенциально эффективных растворов для очистки поверхностей от отложений в теплообменных аппаратах. Представлены результаты эксперимента по очистке поверхностей от отложений в среде кислотных растворов при различных температурах.

Summary. The article includes the laboratory selection method of potentially effective solutions for cleaning heat exchanger's surfaces from sediment. The experiment results of cleaning surfaces from sediment with the acid solutions and different temperatures are offered.

Ключевые слова: очистка, отложения, покрытия, кислота, раствор.

Key words: cleaning, sediment, experiment, heat exchangers, acid, damage.

УДК 665.63

Введение

Проблема образования накипи и различного рода отложений в теплообменном оборудовании на протяжении долгого времени не теряет своей актуальности, поэтому чистота теплообменной поверхности всё также остаётся неизменным ключевым качеством теплообменного оборудования любой конструкции.

Существует достаточно большой выбор в способе очистки теплообменных аппаратов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Стоит заметить, что в случаях сильного загрязнения чаще всего применяют как разборный, так и безразборный химический способ промывки технологического оборудования.

Проанализировав состав трудноудаляемых отложений, образующихся в теплообменном оборудовании, мы классифицировали их по природе преобладающего компонента: щелочно-земельные, кальциевые, железные, натриевые, магниевые и накипи из легкорастворимых солей [1; 3].

Отложения подобного рода как на внутренних, так и на внешних поверхностях теплообмена снижают интенсивность процесса теплопередачи, создают дополнительное термическое сопротивление и др., что в свою очередь создаёт условия для нарушения установленного эксплуатационного режима [2].

Методика исследований

Учитывая перечисленные выше составы отложений, а также оценив степень влияния этих отложений на КПД теплообменного оборудования, было принято решение о разработке методики по подбору потенциально универсального очищающего раствора соответствующей концентрации, способного как удалить загрязнения, так и сохранить целостность теплообменной поверхности после очистки.

В основе методики проведения эксперимента лежит измерение изменения массы образца с течением времени и визуальное наблюдение за процессом очистки. Эксперимент проводился на базе ИЛ-ЦЗЛ ООО «РН-Комсомольский НПЗ». Экспериментальная модель лабораторной установки представлена на рис. 1.

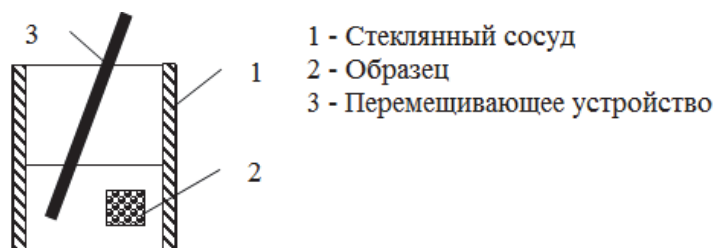


Рис. 1. Экспериментальная модель лабораторной установки

Участвующие в эксперименте кислоты, их концентрации, а также температура проведения испытаний сведены в табл. 1.

Таблица 1

Концентрация и температура испытаний кислот

Кислота	Формула	Концентрация	Температура испытания, °С
Фосфорная	H_3PO_4	5 %	50
Соляная	HCl	5 %	50
Азотная	HNO_3	5 %	50
Сульфаминовая	NH_2SO_4H	5 %	65

Время проведения испытаний 1 ч.

Порядок проведения эксперимента представим ниже:

1. Приготовить раствор кислоты заданной концентрации.
2. Залить 100 мл раствора кислоты в стеклянный стакан объемом 250 мл.
3. Взвесить образец на аналитических весах с ценой деления 0,001 г. В нашем случае использовались лабораторные весы METTLER TOLEDO PB 403-S/Fact.
4. Установить заданную температуру раствора в стакане и поддерживать её на протяжении всего эксперимента.
5. Установить динамический режим движения раствора в стакане при помощи магнитной мешалки, которая обеспечивает постоянную циркуляцию раствора. Заданная частота вращения (165 ± 5) об/мин. В нашем случае использовалась магнитная мешалка с подогревом IKA C-MAG HS 7 digital IKAMAG, которая также обеспечивала поддержание заданной температуры раствора на протяжении всего эксперимента.
6. Бросить образец в раствор и засечь время.
7. По истечении времени вытащить образец.
8. Промыть образец в дистиллированной воде, просушить и взвесить на аналитических весах с ценой деления 0,001 г.
9. Зафиксировать полученные значения.

10. Оценить степень повреждения поверхности образца кислотой методом визуального контроля.

Результаты исследований очистки поверхности от отложений в среде различных растворов при заданных температурах приведены в табл. 2.

Таблица 2

Полученные результаты исследования

Реагент	Объем реагента, см ³	Температура, °С	Масса образца до очистки, г	Масса образца после очистки, г	Время реагирования, мин	Потери при очистке, %
H ₃ PO ₄	100	50	34,565	34,045	50	1,504
HCl	100	50	32,484	32,817	50	1,992
HNO ₃	100	50	31,022	30,625	50	1,280
NH ₂ SO ₄ H	100	65	33,040	32,621	65	1,268

Потери при очистке вычисляют по формуле

$$X = \frac{G_1}{G_2} \times 100,$$

где G_1 – масса накипи перешедшей в раствор, г; G_2 – начальная масса образца, г.

Согласно полученным расчётным результатам исследования, наибольшие потери при очистке соответствуют 5%-му раствору соляной кислоты.

Однако если обратить внимание на состояние очищенных образцов (см. рис. 2), то наглядно видно, что отложения удалены полностью на 100 %.

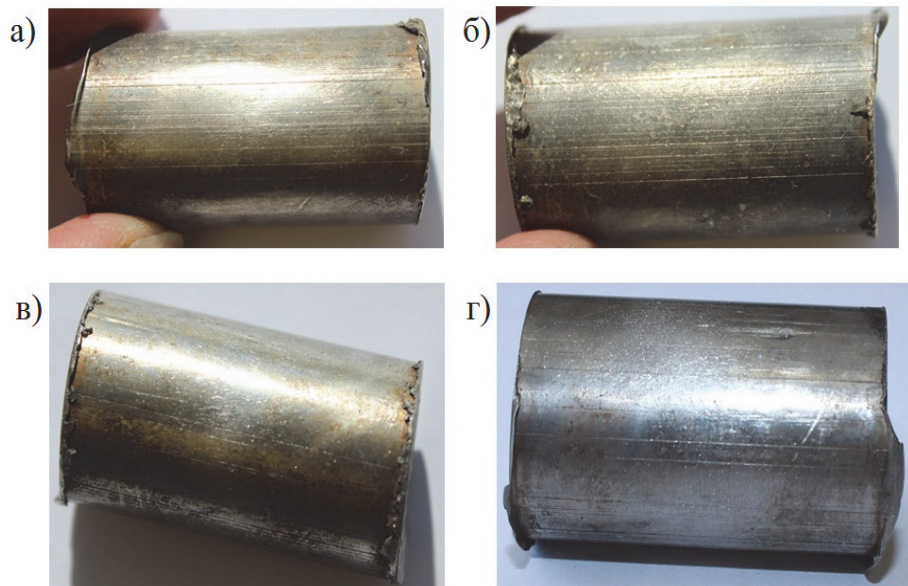


Рис. 2. Испытательный образец после очистки:

- а – очистка фосфорной кислотой H₃PO₄;
- б – очистка соляной кислотой HCl;
- в – очистка азотной кислотой HNO₃;
- г – очистка сульфаминовой кислотой NH₂SO₄H


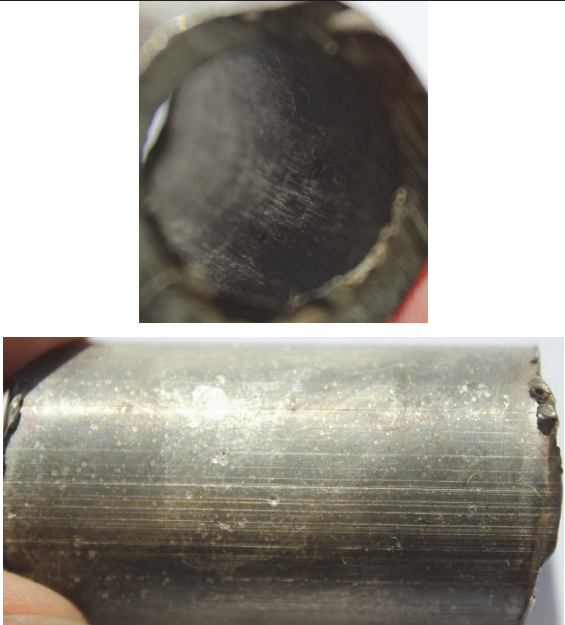
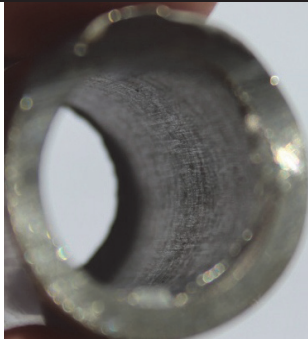
Последним этапом эксперимента является оценка испытательного образца на предмет повреждений раствором применяемых кислот, даже несмотря на то, что материалом образцов является кислотостойкая нержавеющая сталь X18H10T.

Результаты исследования

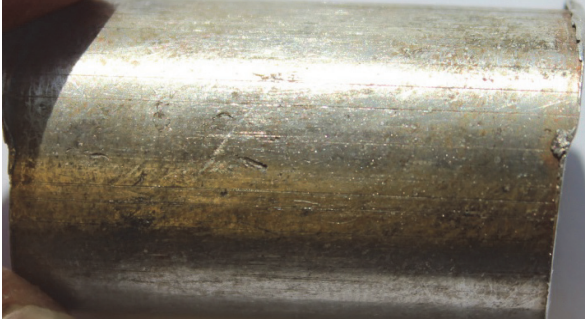
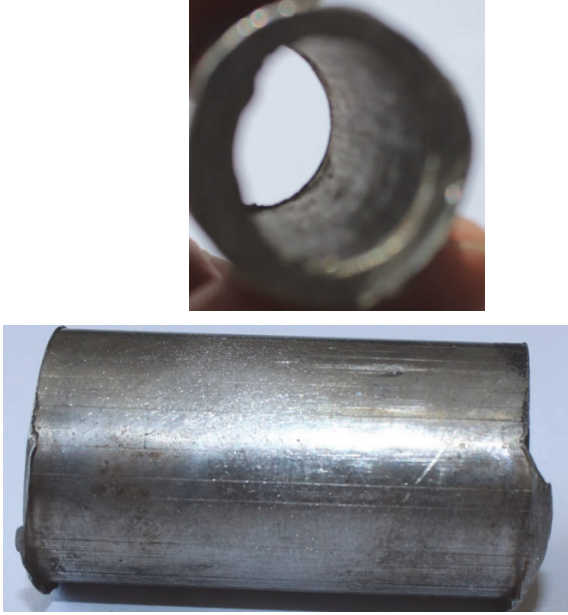
Результаты оценки сведен в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика степени повреждений испытательных образцов

Описание образца	Фото образца после очистки
<p>Образец 1 очищался при помощи 5%-го раствора фосфорной кислоты. Фосфорная кислота в силу своей слабости хорошо взаимодействует с различными типами сплавов, образуя тонкую фосфатную плёнку на пассивирующей стали и на некоторое время предохраняя ее от коррозии. На фото нет повреждений, вызванных применением кислоты, даже несмотря на то, что на трубе уже были повреждения в виде сплошных нитевидных поверхностных трещин (см. рис. 2).</p>	
<p>Образец 2 очищался при помощи 5%-го раствора соляной кислоты. Соляная кислота является очень агрессивной по отношению к металлам. В большей степени это обуславливается содержанием в ней ионов Cl⁻. На фото видно, что металл имеет тёмный оттенок, что свидетельствует об интенсивном прохождении реакции. При этом происходит межкристаллитная и язвенная коррозия, проходящая по границам зерен, и углубление нитевидных трещин. Применение раствора соляной кислоты в качестве реактива очистки нежелательно, поскольку даже при слабой концентрации кислоты, нержавеющий металл начинает корродировать.</p>	
<p>Образец 3 очищался при помощи 5%-го раствора азотной кислоты. На фото наглядно видно, что коррозионное разрушение стали вызвано коррозией по границам зерен. Также видны эрозивные повреждения. Ввиду наличия повреждений кислотой применение раствора азотной кислоты нежелательно, либо необходимо добавление ингибитора коррозии.</p>	

Продолжение табл. 3

Описание образца	Фото образца после очистки
	
<p>Образец 4 очищался при помощи 5%-го раствора сульфаминовой кислоты. Несмотря на то, что данный раствор полностью удалил все отложения, на фото чётко видна частая точечная коррозия, которая даёт слегка матовый блеск, что говорит о повреждении поверхности металла кислотой.</p>	

Выводы

Проанализировав состояние представленных образцов после очистки растворами кислот, были сделаны следующие выводы:

- применение растворов соляной, азотной и сульфаминовой кислот привели к ярковыраженному разрушению поверхности металла. Чтобы снизить разрушающее влияние на металл необходимо снизить концентрацию раствора, а также обязательно применить ингибиторы коррозии;
- применение раствора на основе фосфорной кислоты показало минимальные повреждения поверхности металла при достаточно высокой эффективности очистки.

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований разработана методика подбора эффективных растворов для очистки поверхности от отложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутепов, А. М. Общая химическая технология / А. М. Кутепов, Т. И. Бондарева, М. Г. Беренгартен. – М. : Химия, 1985. – 448 с.
2. Таранова, Л. В. Теплообменные аппараты и методы их расчета: учеб. пособие / Л. В. Таранова. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2009. – 150 с.
3. Зимняков, А. М. Анализ химических отложений теплового оборудования и способы их очистки / А. М. Зимняков, Р. В. Наумов // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. – 2010. – № 17. – С. 104-108.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
MATALLURGY AND MATERIALS

Верхотуров А. Д., Востриков Я. А., Рыбалкин А. А., Гнатик А. О.
A. D. Verkhoturov, Ya. A. Vostrikov, A. A. Rybalkin, A. O. Gnatik

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО СЛОЯ
ПРИ УПРОЧНЕНИИ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ
КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ**

**INCREASING THE EFFICIENCY OF THE ALLOYED LAYER FORMATION WHEN
HARDENING TUNGSTEN CARBIDE WITH COMBINED METHODS**

Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник института водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Mr. Anatoly D. Verkhoturov – Doctor of engineering, professor, senior research Fellow, institute of water and environmental problems, the far eastern branch of the Russian academy of sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Востриков Ярослав Алексеевич – инженер Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия Хабаровск). E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

Mr. Yaroslav A. Vostrikov – engineer, Far Eastern state transport university (Russia, Khabarovsk). E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

Рыбалкин Антон Андреевич – аспирант кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mmc727@rambler.ru.

Mr. Anton A. Rybalkin – post-graduate student, Mechanical engineering and metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mmc727@rambler.ru.

Гнатик Алина Олеговна – студент факультета экологии и химических технологий Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Gnatik Alina Olegovna – student, Faculty of Ecology and Chemical Technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В работе проведены исследования повышения работоспособности вольфрамсодержащих твердых сплавов за счет комбинации методов электроискрового легирования, электродуговой наплавки и лазерной обработки. Показано формирование легированного слоя толщиной более 1400 мкм с градиентным переходом свойств. Приведены параметры формирования островкового покрытия для повышения износостойкости методом лазерной обработки.

Summary. This article describes the research aimed at improving the tungsten carbide durability with the help of spark alloying methods, arc welding and laser processing. The paper presents the formation of the alloyed layer thickness of more than 1400 μm with gradient transition properties. The parameters of the islet coating formation for durability improvement by laser processing are represented.

Ключевые слова: электроискровое легирование, поверхностный слой, твёрдый сплав, износостойкость, микротвердость, электродуговая наплавка, лазерное оплавление, комбинированные методы.

Key words: electric spark alloying, the surface layer, hard alloy, wear resistance, micro hardness, arc welding, laser melting, combined methods.

УДК 621.793

Введение

В настоящее время в технике находят все большее применение тугоплавкие соединения и, в частности, вольфрамсодержащие твердые сплавы (ВТС), которые применяются для ряда ответственных деталей (режущий инструмент, буровые установки, пальцы шпалоподобных машин и т.д.).

Однако стоимость вольфрама на мировых рынках непрерывно растет с каждым годом, что остро ставит проблему рационального использования твердосплавного инструмента.

Одним из эффективных методов рационального использования, с учетом экономии вольфрама, является увеличение срока службы и работоспособности ВТС за счет повышения эксплуатационных свойств, методами поверхностного упрочнения.

В мировой практике упрочнение исполнительных поверхностей ВТС, как правило, получают методами химического (ХОП) и физического (ФОП) осаждения покрытий. Однако использование этих методов экономически эффективно только для серийных, крупных предприятий, которые не характерны для Дальневосточного региона. Установки для этих методов требуют сложного оборудования, существенных экономических вложений, квалифицированной рабочей силы. Недостатками метода газофазного осаждения являются также невозможность формировать композиционные покрытия сложного состава, высокая энергоёмкость процесса; вносит загрязнения в окружающую среду. В работе [1] проведен анализ наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения ВТС, подтверждающий вывод о неэффективности их использования для мелкосерийного и индивидуального производства.

Одним из перспективных методов в условиях мелкосерийного и индивидуального производства на Дальнем Востоке является метод электроискрового легирования (ЭИЛ), предложенный в 1943 г. выдающимися русскими учеными, супругами Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко. Метод ЭИЛ нашел применение для упрочнения режущего инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, благодаря возможности нанесения на поверхность любых токопроводящих материалов, в том числе и тугоплавких соединений [2].

Ранее [2; 3] попытки повышения эффективности формирования легированного слоя (ЛС) и его свойств осуществлялись за счет использования структуры и свойств электродного материала и подбора режимов упрочнения [4], однако это не позволяло существенно повысить толщину ЛС и улучшить его свойства. Недостатком метода ЭИЛ ВТС является небольшая толщина упрочняющего слоя (до 22-25 мкм), это особенно характерно при упрочнении материалов с высокой температурой плавления, например ВТС, что ограничивает более широкое использование этого метода в промышленности.

В связи с этим нами предложены гипотезы по повышению толщины и эксплуатационных свойств упрочняющего слоя для получения на поверхности ВТС композитных материалов с градиентной структурой и формирования островковых покрытий [5] с использованием комбинации методов ЭИЛ и электродуговой наплавки (ЭДН) и ЭИЛ и лазерной обработки (ЛО).

Достоинства ЭДН заключаются в том, что покрытия, полученные наплавкой, характеризуются отсутствием пор, высокими значениями модуля упругости и прочности на разрыв. Прочность соединения этих покрытий с основой соизмерима с прочностью материала детали. Лазерная обработка поверхностей металлов и сплавов относится к локальным методам термической обработки. Благодаря высокой плотности и мощности энергии обеспечиваются высокие скорости нагрева и охлаждения (10^4 - 10^8 °C/с) и малое время воздействия излучения на обрабатываемую поверхность, поэтому при лазерной обработке наблюдаются минимальное тепловое воздействие на обрабатываемую деталь и минимальное коробление детали. В работе [6] показано, что при лазерном упрочнении поверхности создаются износостойкие покрытия, однако применительно к ВТС такие исследования не проводились. Авторами [5] установлено, что на поверхности металла после разрушения ЭИЛ покрытия оставались участки («островки»), прочно соединенные с основой. Предполагается, что повышение износостойкости легированного слоя возможно за счет создания таких островков на ЭИЛ покрытии. Авторами [1; 2; 5; 6] приводились примеры повышения износостойкости металлических поверхностей за счет лазерной обработки

методом оплавления поверхности легированного слоя и методом термоупрочнения поверхности ВТС.

Благодаря сочетанию достоинств ЭИЛ и предлагаемых методов предполагалось повышение работоспособности ВТС. На основе предложенных гипотез целью работы является исследование процесса формирования ЛС и его свойств, полученного комбинацией методов ЭИЛ+ЭДН и ЭИЛ+ЛО.

Методы, материалы и оборудование

Для оценки эффективности процесса ЭИЛ использовали коэффициент $\gamma_{Св}$ [7]. Коэффициент $\gamma_{Св}$ может быть оценен как отношение величин, характеризующих те или иные физико-химические и эксплуатационные свойства ($С_{ВЛС}$) поверхностного слоя, к аналогичным величинам свойств ВТС в качестве основы ($С_{В0}$) без покрытия и может быть представлен величинами, характеризующими свойства твёрдости, жаростойкости, износостойкости и так далее, либо величиной одного из них. Таким образом, коэффициент $\gamma_{Св} = С_{ВЛС}/С_{В0}$. При этом значение основы всегда соответствует 100 %, а коэффициент эффективности может быть больше или меньше этого значения.

На основании предварительных исследований [8] по эффективности формирования поверхностного слоя выбраны электродные материалы. Выбор электродного материала основывался на его способности к повышению эффективности жаростойкости, износостойкости и микротвёрдости методом ЭИЛ ВТС. Рассмотрены следующие электродные материалы – среднеуглеродистая сталь 45, WC-15%Co спеченный при 1100 °С в Институте химии ДВО РАН, цирконсодержащий электрод Zr1, полученный в лаборатории кафедры «Подвижной состав железных дорог» ГОУ ВО ДВГУПС, безвольфрамовый твердый сплав TN20, состоящий из карбида титана TiC и связки Ni+Mo.

Из представленных электродов для ЭИЛ наибольшим повышением износостойкости ВТС (главный критерий выбора материала) по сравнению с упрочняемой основой является электрод Zr1 с показателем эффективности свойств легированного слоя в 222 % и электрод TN20 с показателем в 140 %. Приведенные электроды имеют наибольшие показатели в повышении жаростойкости и микротвёрдости. Описанные электродные материалы выбраны для повышения эффективности процесса ЭИЛ ВТС за счет повышения микротвёрдости и износостойкости комбинацией методов ЭИЛ+ЭДН и ЭИЛ+ЛО.

Для упрочнения поверхности ВТС и исследования массопереноса материала электродов анод/катод в процессе ЭИЛ использовали установку Корона 1101 с режимом работы $I_{ср.}$ 0.7 А; $U_{ср.}$ 40 В; $t_{имп}$ $12 \cdot 10^{-5}$ с; $\gamma_{ср}$ 50 имп/с; W 10.08 Дж/мин. Режимы на установках варьировались в пределах их технических характеристик. Использовались режимы ЭИЛ, обеспечивающие лучшую сплошность покрытия [9], полученные на основании кинетических зависимостей.

Для создания наплавочного слоя использовался тиристорный сварочный источник фирмы ESAB – Origio Mig – 500t. Работа по наплавке проволоки на твердый сплав производилась при следующих режимах – напряжение U 17.8-20.2 В, подача проволоки V 2 м/мин, рабочий ток I 80-90 А. Использовали проволоку ESAB сплошного сечения d 0.8 мм, с содержанием состав в мас. %: С 0.06-0.14, Mn 1.40-1.60, Si 0.80-1.0, P_{max} 0.025, S_{max} 0.025, данная проволока является наиболее распространенной на промышленных предприятиях. Во время наплавки использовали защитный газ – CO₂ 100 %. Характеристики наплавочной проволоки – предел текучести 440 Н/мм², предел прочности 540 единиц.

Для лазерной обработки использовалась установка СКАТ 301. Работа на данной установке проводилась на следующих режимах: мощность – 340 Вт, частота импульса – 0.73 Гц, скорость перемещения дорожки – 1 мм/с, фокусное расстояние 4 мм, длина волны излучения неодимового лазера в ближнем инфракрасном диапазоне – 1.06 мкм, энергия в импульсе – 0.82-0.87 Дж.

Металлографический анализ сплавов выполнялся с помощью микроскопа ЕС МЕТАМ РВ 22 и металлографического комплекса МПМ 3 ФЦ при увеличении $\times 1000$. Исследование микроструктуры велось на растровом электронном микроскопе HITACHI S3400n и оптическом микроскопе NIKON MA200. Исследования микротвёрдости образцов проводились методом индентирования на микротвёрдомере ПМТ-3М и микротвёрдомером SHIMADZU HMV-2T. Замеры

значения микротвердости проводились согласно ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».

Контроль качества покрытий по критерию износостойкости проводили методом микроабразивного износа на приборе CALOTEST CSM Instruments, при котором вал вращался со скоростью 2990 об/мин, время испытания выдерживалось до 20 мин, в случае быстрого истирания покрытия эксперимент прекращался раньше, контртело – шарик из подшипниковой стали диаметром 20 мм, точность измерения кратера составляла от 1 до 5 %, при покрытии в 25-30 мкм, диаметр кратера составлял 0.07-1.7 мкм. Испытания полученных образцов на периферийное трение скольжения осуществлялись на машине трения ИИ-5018 по ГОСТ 23.205-79 при нагрузке 500 кгс и рабочим временем 120 мин. Материалом контртела служила закаленная сталь 60 твердостью HRC 40-45.

Результаты и обсуждения

Работа выполнялась в два этапа. На первом этапе были проведены исследования влияния макроструктуры, полученной комбинацией методов ЭИЛ и ЛО на поверхности ВТС. На втором этапе разрабатывали и исследовали композитный материал с градиентным изменением свойств, полученный комбинацией методов ЭИЛ и ЭДН:

1 Повышение эффективности износостойкости ВТС за счет упрочнения комбинацией методов ЭИЛ и ЛО.

На рис. 1 приведена макроструктура защитного слоя на ВТС, полученная методом ЭИЛ и ЛО.

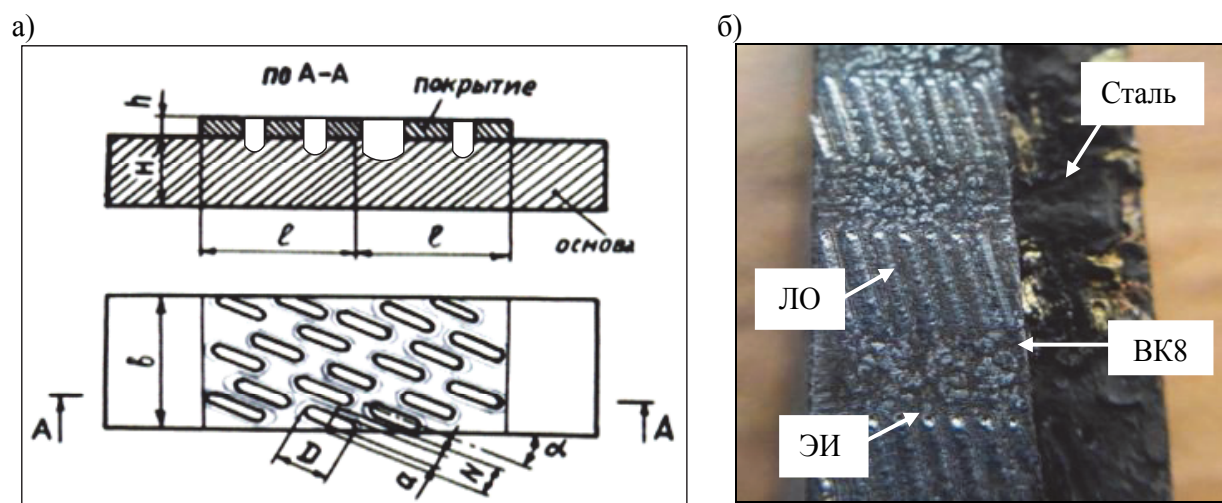


Рис. 1. Модель изменения микрорельефа ЭИЛ покрытия на ВТС ВК8:
а – модель островкового покрытия; б – ЭИЛ покрытие Zr1 + ЛО на ВК8

Предложенная модель островкового покрытия показана на рис. 1, а с экспериментально установленными размерами участков, оплаваемых лазером. По имеющимся в литературе данным [5], размеры локальных участков («островков») принимали равными: N 7 мм; D 10 мм и расположением к направлению скольжения и α 15°. Суммарная площадь заполненных металлом участков покрытия при сравнении с номинальной поверхностью составляет $F_{\text{пл}} = 0.62 F_{\text{ном}}$. На рис. 1, б показан результат комбинированного покрытия на твердом сплаве ВК8, полученного методом ЭИЛ электродом Zr1 и модификацией лазерной обработки рельефа легированного слоя, по предложенной модели островкового покрытия. Для проведения эксплуатационных испытаний твердый сплав припаяли к металлической подложке (сталь, см. рис. 1, б). По подобранным режимам ЭИЛ на всю упрочняемую поверхность ВТС (ВК8, см. рис. 1, б) нанесли легированный слой с учетом оптимального времени для получения максимальной сплошности покрытия. При этом толщина слоя ЭИЛ составляла в среднем 10 мкм. Полученное покрытие обработали

лазерным лучом по предложенной модели с образованием продолговатых зон глубокого оплавления по всей упрочняемой поверхности.

Применение на твердом сплаве специальной микрогеометрии, создаваемой лазерным термоупрочнением, на слое, образованном ЭИЛ, способствует увеличению ресурса работы, надежности и эффективности оборудования. Образующие покрытия представляют гетерогенный материал, износостойкость которого зависит от условий эксплуатации изделий в реальных производственных условиях, физико-химической природы материалов электродов и технологических параметров процесса.

На рис. 2 показана микроструктура твердого сплава ВК8 с комбинированным упрочняющим покрытием.

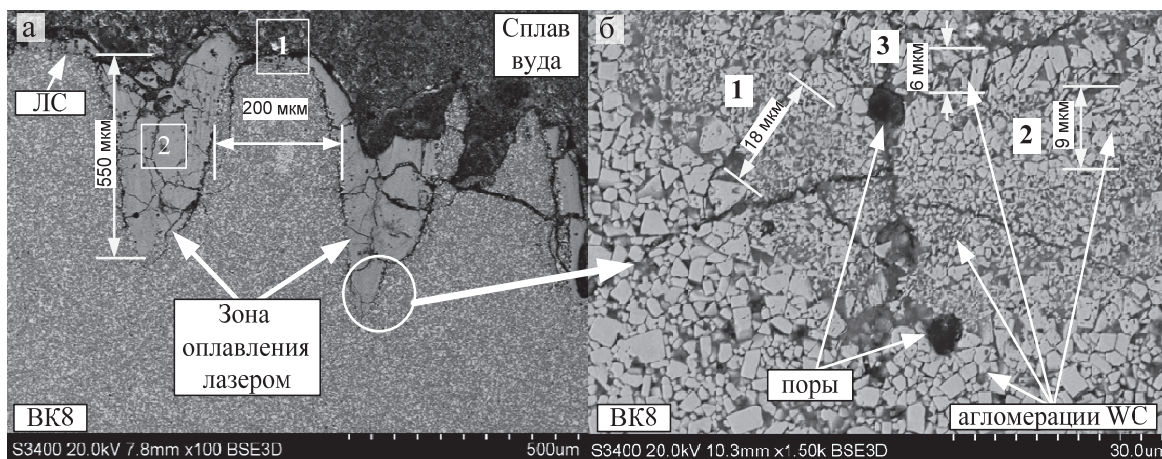


Рис. 2. Микроструктура поперечного шлифа ВК8: а – зоны оплавления легированного слоя Zr1 лазером x100; б – микроструктура нижней точки зоны оплавления лазером x1500

На рис. 2, а видно, что после воздействия ЛО образовались два сплавления, расстояние между которыми 200 мкм. Материал сплавленных участков состоит из закристаллизованного материала покрытия и основы твердого сплава. Из рис. 2, а видно, что легированный слой на поверхности твердого сплава имеет толщину 10 мкм. При этом воздействие лазерного луча расплавило слой и основу твердого сплава, образовав островки твердого сплава шириной 200 мкм, покрытые легированным слоем электрода Zr1. Глубина лазерного слоя составила на всех ВТС 500-563 мкм, соответственно и высота образованных островковых покрытий на ВТС примерно 500-563 мкм. Под локальным воздействием концентрированных потоков энергии в месте расплавления легированного слоя и твердого сплава происходит образование вытянутых зерен карбида вольфрама. В твердом сплаве, в месте воздействия лазерного луча, образуется зона термического влияния толщиной в среднем 90 мкм. На рис. 2, б показан участок нижней части зоны оплавления лазером – зона термического влияния на твердый сплав. В результате этого оплавления происходит измельчение зерен карбида вольфрама, тем самым образуя переходные зоны, состоящие из агломераций WC различной величины. Показано, что размер зерна в ВК8 в обычном состоянии составляет в среднем 3-4 мкм. В зоне термического влияния наблюдаются три переходных зоны различной ширины: зона 1 на рис. 2, б обозначена участком шириной 18 мкм, в котором размер зерна карбида вольфрама составляет от 0.7 до 1.2 мкм. При этом в зоне 2 шириной 9 мкм наблюдаются зерна размером 2.2-2.3 мкм, в зоне 3 видны вытянутые, переплавленные зерна карбида вольфрама размером 3-5.2 мкм, попавшие под прямое воздействие лазерного луча.

На рис. 2, а показаны зоны участка 1 – легированного слоя на твердом сплаве и участка 2 – зоны лазерного оплавления в твердом сплаве. Установлено, что при упрочнении безвольфрамовым твердым сплавом ТН20 в легированном слое наблюдается до 1.3 % титана, до 9.47 % кислорода, это указывает на образование в поверхностных слоях легированного слоя жаростойких и износостойких соединений и оксидов TiO_2 . При упрочнении ВТС электродом Zr1 образуется

тонкий слой, в котором содержится до 1.98 % циркония, до 9.30 % кислорода и в два раза больше углерода, чем при упрочнении ТН20, предполагается образование Zr_2O .

По проведенным ранее исследованиям [1] можно утверждать, что наличие циркония в легированном слое дает жаростойкие и износостойкие соединения, повышающие эксплуатационные свойства ВТС. Измельчение зерен карбидов вольфрама влияет на повышение микротвердости, а соответственно и на повышение износостойкости. В связи с этим микротвердость в зоне оплавления лазером повысилась в два раза, эффективность комбинированного процесса ЭИЛ и лазерной обработки за счет повышения микротвердости составляет 203 %.

В табл. 1 показаны результаты эксплуатационных испытаний упрочненных ВТС различными электродными материалами и лазерным термоупрочнением.

Таблица 1

Эффективность повышения эксплуатационных свойств ВТС
 при комбинированном упрочнении методом ЭИЛ и ЛО

Исследуемый ВТС	Эффективность износостойкости покрытия, %	Эффективность микротвердости покрытия, %
ВК8 (Не покрыт)	100.0	100.0
ВК8+ТН20+ЛО	116.7	105.6
ВК8+Zr1+ЛО	140.0	116
Т15К6 (Не покрыт)	100.0	100.0
Т15К6 +ТН20+ЛО	140.0	121.26
Т15К6 + Zr1+ЛО	77.8	101

Как видно из табл. 1, эффективность процесса ЭИЛ ВТС за счет повышения износостойкости у некоторых образцов увеличилась на 40 %, при этом заметно снижение эффективности при упрочнении ВТС Т15К6 электродом Zr. Снижение износостойкости можно объяснить возникновением хрупких оксидных соединений в поверхностном слое и возникновением микротрещин при воздействии концентрированных потоков энергии. Материал Zr склонен к образованию хрупких оксидов Zr_2O и в случае с упрочнением ВТС группы ТК образованию оксида – TiO_2 . Под действием нагрузки, во время исследования износостойкости, поверхностный слой начал разрушаться и тем самым увеличил износ образца.

Применение лазерного упрочнения приведет к более экономному расходованию дорогостоящих, дефицитных твердосплавных инструментальных материалов, позволит значительно повысить производительность труда, снизить расходы на производство и эксплуатацию инструмента и тем самым обеспечить выпуск высококачественной продукции. Применение предлагаемой методики повышения износостойкости рекомендовано на сталях и твердых сплавах, не ответственных деталей железнодорожного транспорта, где допускается высокая шероховатость.

2 Повышение толщины защитного слоя и создание композитного покрытия с градиентным переходом свойств упрочнением поверхности ВТС комбинацией методов ЭИЛ и ЭДН.

Данные по проведению наплавочных работ на ВТС в литературе носят разрозненный характер и не систематизированы [10]. Для определения режима электродуговой наплавки на твердый сплав проведен модельный эксперимент (см. рис. 3).

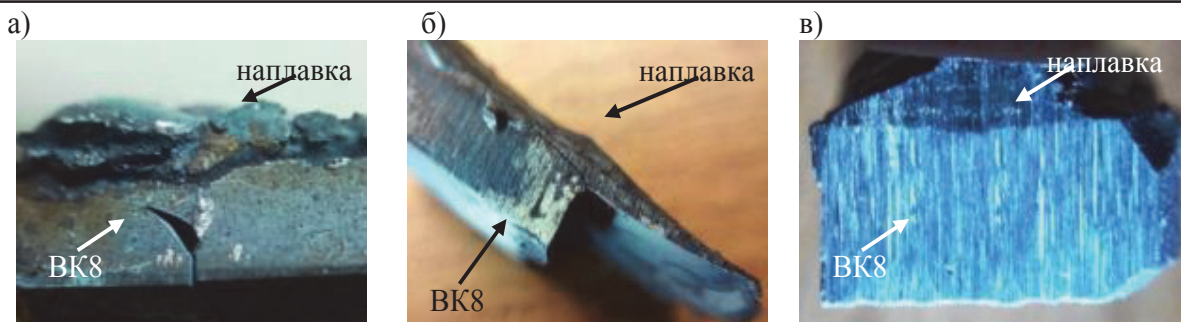


Рис. 3. Макроструктура твердого сплава ВК8: а – ВК8 с трещиной поперек $\times 18$; б – ВК8, расколовшийся на две части $\times 18$; в – ВК8 без видимых трещин $\times 18$

Наплавка проводилась плавящимся электродом в среде CO_2 . Установлено, что при высоких режимах тока происходит интенсивное выделение тепла, вследствие этого твердый сплав нагревается до $300\text{ }^\circ\text{C}$ и происходит сплавление расплавленного металла с ВТС. При этом в некоторых случаях наблюдается диффузионная зона расплавленного металла на глубину до 70 % от общей толщины твердосплавной пластины. В процессе быстрого остывания в металле возникают сжимающие напряжения, которые разрушают ВТС (см. рис. 3, а). При проведении комбинированного упрочнения ВТС (см. рис. 3, б) методом ЭИЛ электродом с содержанием связей Ni-Mo (твердый сплав ТН20) и методом ЭДН установлено, что твердый сплав разрушается только в местах зоны сплавления наплавленного металла. Режим соблюдался аналогично первому эксперименту – напряжение U 35.7-41.2 В, подача проволоки V 3 м/мин, рабочий ток I 100-120 А. Диффузионная зона в данном случае достигает до 25 % от общей толщины твердосплавной пластины. На основе полученных результатов выдвинуто предположение о возможности сохранения твердого сплава при уменьшении силы тока, напряжении и замедлении скорости подачи проволоки в процессе наплавки на ВТС. Опытным путем определены режимы наплавки для получения сплошного слоя и сохранения целостности твердого сплава (см. рис. 3, в), при этом толщина наплавленного валика достигала 2000 мкм. Диффузионная зона в основу ВТС расплавленного металла составляла до 15 %. Однако в результате нанесения наплавленного металла на ВТС в его поверхности появляются микродефекты в виде трещин и пор, определить которые возможно только при высоком увеличении (более $\times 800$) в микроскоп. Низкая твердость наплавки (500-600 Нv) указывает на возможность разрушения (отслоения) поверхностного слоя от твердого сплава во время эксплуатации.

Предлагается гипотеза о создании композитного защитного слоя высокой толщины с повышенной износостойкостью на поверхности ВТС за счет градиентного перехода свойств (микротвердости) от поверхности наплавленного слоя к основе твердого сплава. Для проверки выдвинутой гипотезы предлагается использовать метод электроискрового легирования. В качестве электрода для электроискрового легирования предлагается электрод ТН20.

На рис. 4 показаны микроструктуры твердого сплава ВК8 после комбинированного упрочнения методом ЭДН и ЭИЛ.

На рис. 4 показана микроструктура наплавленного слоя, упрочненного электродом ТН20 методом ЭИЛ. Структура наплавленной стали имеет феррито-перлитную фазу, что подтверждается микротвердостью в указанных местах: феррит – 80 Нv, перлит – 340 Нv, толщина легированного слоя (см. рис. 4, а участок 7) составляет 57.5 мкм, а толщина переходного слоя (см. рис. 4, а участок 6) к наплавке – 5.15 мкм. На рис. 4, б показана микроструктура твердого сплава ВК8, легированного слоя электродом ТН20 методом ЭИЛ и наплавочного слоя, а также переходных зон указанных слоев. Участком 1 обозначена зона толщиной 120-140 мкм, насыщенная углеродом. Между легированным слоем и твердым сплавом образовалась переходная зона толщиной 5 мкм (см. рис. 4, б участок 2), толщина легированного слоя составляет 20 мкм (см. рис. 4, б участок 3), участком 4 обозначена зона сплавления легированного слоя и наплавочного слоя.

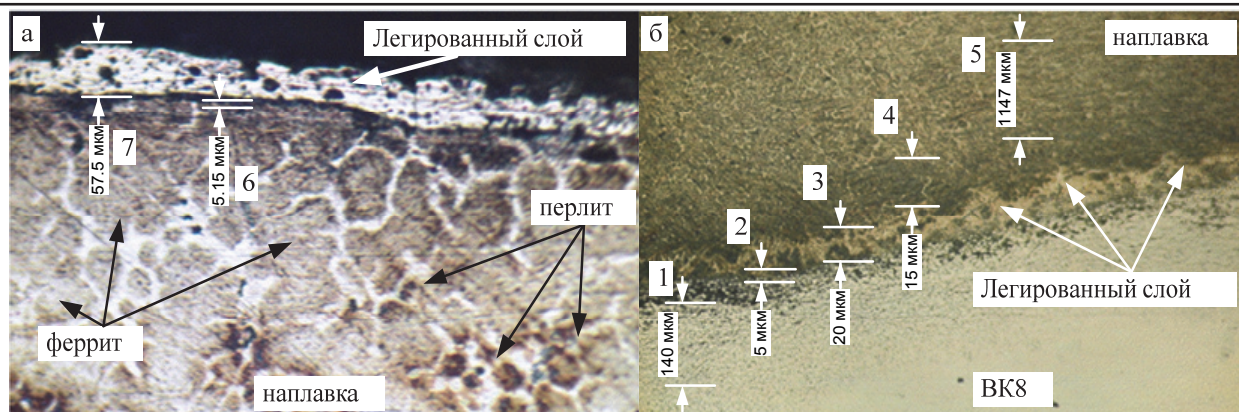


Рис. 4. Микроструктура слоя: а – наплавочный слой легированный электродом ТН20 х800; б – комбинация слоев на твердом сплаве ВК8 х600

На рис. 5 представлена микроструктура защитного слоя.

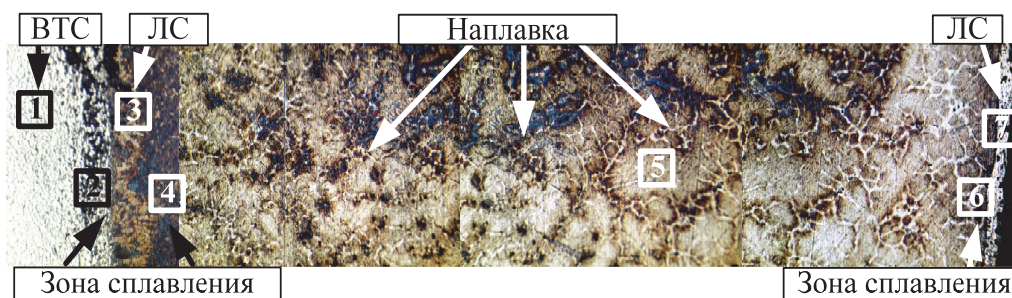


Рис. 5. Микроструктура защитного слоя. Участки 1-7 показывают место химического анализа и измерения микротвердости

На приведенном рис. 5 показан упрочняющий слой общей толщиной от ЭИЛ до ВТС – 1467 мкм, толщина наплавочного слоя (участок 5) составила 1385 мкм. Замечено, что указанные переходные зоны и слои различаются микротвердостью, цветом и различным химическим составом. Нумерация участков, показанная на рис. 4-5, соответствует зонам с различным химическим составом и различной микротвердостью. Так, участок 1 (Уч. 1) – это основа упрочняемого, вольфрамсодержащего твердого сплава ВК8. Участком 2 (Уч. 2) отмечена диффузионная зона между легированным слоем, полученным методом ЭИЛ и упрочняемым твердым сплавом. Легированный слой показан на участке 3 (Уч. 3), имеет общую диффузионную зону с ВТС (участок 3) и общую диффузионную зону с наплавленным слоем – участок 4 (Уч. 4). Слой, полученный методом электродуговой наплавки, обозначен участком 5 (Уч. 5) и имеет наибольшую толщину. При упрочнении наплавленного слоя методом ЭИЛ, образовалась диффузионная зона между легированным слоем и наплавленным металлом на участке 6 (Уч. 6), при этом легированный слой обозначен участком 7 (Уч. 7).

В табл. 2 приведен химический состав участков 1-7 (см. рис. 5) защитного слоя на ВТС.

Из таблицы видно, что концентрация углерода повышается от твердого сплава к поверхности наплавочного слоя, это объясняется диффузионными процессами углерода из твердого сплава к поверхности под воздействием высоких температур при наплавке. Повышенная концентрация углерода (почти в два раза) связана с воздействием электроискрового легирования на наплавочный металл. Титан диффундировал в твердый сплав и в наплавочный слой при ЭИЛ электродом ТН20, железо также перенеслось в поверхностный слой твердого сплава. На основании проделанных экспериментов по исследованию повышения эффективности процесса ЭИЛ ВТС электродами ТН20 и сталь 45 предполагается, что наличие в твердом сплаве железа и

титана повышает жаростойкость и износостойкость, а также наличие указанных металлов на поверхности наплавочного слоя повысит его микротвердость и износостойкость.

Таблица 2

Химический состав поверхности после ЭИЛ ВК8 и его ЭДН

Химический элемент	Уч. 1	Уч. 2	Уч. 3	Уч. 4	Уч. 5	Уч. 6	Уч. 7
C	8.07	7.83	8.29	8.09	9.18	14.17	14.26
O	4.76	5.61	10.56	3.82		4.19	8.72
Ti	0.18	0.74	1.88	0.43	0.00	0.79	2.03
Mn		0.38	0.50	0.78	1.20	0.77	
Fe	7.32	15.87	28.55	64.49	77.99	47.17	9.38
Co	5.16	6.30	7.60	4.29	0.87	2.72	5.92
Ni	0.00	0.00	0.17	0.14	0.06	0.02	0.01
Mo	0.00	0.74	0.00	0.00	0.93	0.00	0.23
Ta	0.45	1.15	1.35	0.61	0.03	1.05	2.82
W	73.54	59.52	39.82	17.35	9.36	28.81	55.90

На рис. 6 показано изменение микротвердости в основных и переходных слоях защитного покрытия от твердого сплава ВК8 к поверхности покрытия.



Рис. 6. Распределение микротвердости защитного слоя

Средние значения микротвердости полученных слоев представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения микротвердости защитного покрытия в HV

Уч. 1	Уч. 2	Уч. 3	Уч. 4	Уч. 5	Уч. 6	Уч. 7
1398.30	1263.53	1463.61	1129.95	777.35	1103.44	1249.70

Как видно из табл. 3, соблюдается градиентный переход от поверхности защитного слоя к основе твердого сплава.

Создание композитных материалов на поверхности твердых сплавов применимо для восстановления и упрочнения деталей на железнодорожном транспорте. Это могут быть ответственные детали, такие как автосцепка вагонов, замки автосцепки, пальцы шпалоподбивочных машин, упрочнение режущего инструмента, штамповой оснастки и других изделий.

Выводы

1. Впервые предложены гипотезы и методологические подходы к решению проблемы повышения работоспособности ВТС методом ЭИЛ и комбинацией методов ЭИЛ и ЭДН и методов ЭИЛ и ЛО.

2. Впервые предложен новый подход к получению композитного материала комбинацией методов упрочнения ЭИЛ и ЭДН на ВТС с градиентным переходом свойств.

3. Получен композитный слой на упрочняемом ВТС с градиентным переходом микротвердости от поверхности к основе, толщиной более 1300 мкм, с сочетанием мягкой и твердой упрочняющих фаз, при этом в зоне взаимодействия градиентных слоев наблюдаются диффузионное взаимодействие и зоны взаимной кристаллизации.

4. В два раза повышена износостойкость при сухом трении титановольфрамсодержащих твердых сплавов за счет комбинации методов ЭИЛ и ЛО.

5. Исследован процесс повышения износостойкости за счет создания островкового покрытия методом ЭИЛ и ЛО. Показано, что в местах глубокого лазерного оплавления формируется несколько переходных зон.

6. Показано, что образованное с помощью ЛО островковое покрытие с расстоянием островков порядка 7-10 мм повышает износостойкость твердого сплава на 70 % больше по сравнению с его основой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Формирование и свойства композиционных эил-покрытий на сталях ШХ15 и Р6М5 с использованием новых керамических материалов [текст] / И. А. Подчерняева, А. Д. Верхотуров, Л. А. Коневцов, Я. А. Востриков // Упрочняющие технологии и покрытия. – № 2. – 2014. – С. 34-39.

2. Верещака, А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.

3. Верхотуров, А. Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей [текст] / А. Д. Верхотуров, И. М. Муха. – Киев: Техніка, 1982. – 181 с.

4. Электродные материалы для электроискрового легирования [текст] / А. Д. Верхотуров, И. А. Подчерняева, Л. Ф. Прядко, Ф. Ф. Егоров; отв. ред. М. Д. Смолин, АН СССР, Дальневост. науч. центр, Ин-т горн. дела. – М.: Наука, 1988. – 222 с.

5. Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610392 от 23.01.2007 по заявке № 2006613256 // В. Д. Власенко, Ю. И. Мулин. Программа расчета технологических параметров процесса электроискрового легирования для образования функциональных поверхностей.

6. Ляшенко, Б. А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б. А. Ляшенко, А. Я. Мовшович, А. И. Долматов // Технологические системы. – 2001. – № 4(10). – С. 17-25.

7. Верхотуров, А. Д. К вопросу о критерии эффективности процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров, Л. А. Коневцов, И. А. Астапов // Вестник АмГУ. – 2007. – № 39. – С. 6-9.

8. Верхотуров, А. Д. Научные основы формирования легированного слоя и создания электродных материалов при электроискровом легировании: дис. ... д-р техн. наук / А. Д. Верхотуров. – Киев, 1984. – 532 с.

9. Коневцов, Л. А. Повышение работоспособности режущего инструмента из вольфрамсодержащих твердых сплавов электроискровым легированием металлами и боридами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Леонид Алексеевич Коневцов. – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – 154 с.

10. Инновационные подходы к развитию предприятий, отраслей, комплексов. В 2 кн. К 2: моногр. / авт. кол.: А. Д. Верхотуров, В. М. Макиенко, А. В. Угляница [и др.]. – Одесса: Куприенко С.В., 2015. – 209 с.



Полянская И. Л., Филисюк Н. В.
I. L. Polyanskaya, N. V. Filisyuk

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯ НА СВОЙСТВА СТАЛИ

STUDY OF DURATION INFLUENCE OF ARTIFICIAL AGING ON THE PROPERTIES OF STEEL

Полянская Ирина Леонидовна – кандидат технических наук Уральского государственного университета путей сообщения (филиал в г. Тюмени) (Россия, Тюмень). E-mail: polyanskaya_il@inbox.ru.

Ms. Irina L. Polyanskaya – PhD in Engineering, Ural State Railway Transport University (affiliated in Tyumen) (Russia, Tyumen). E-mail: polyanskaya_il@inbox.ru.

Филисюк Нина Васильевна – старший преподаватель Тюменского индустриального университета (Россия, Тюмень). E-mail: klv@mail.ru.

Ms. Nina V. Filisyuk – senior lecturer, Industrial University of Tyumen (Russia, Tyumen). E-mail: klv@mail.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты исследований искусственного деформационного старения трубных сталей. Изменения температуры ускоряют процессы старения стали, в результате которых происходит изменение ее микроструктуры. Определено влияние деформационного старения на механические свойства стали при испытаниях на ударную вязкость.

Summary. The article presents the studies of artificial strain aging of pipe steels. Changes in temperature accelerate the aging process, which resulted in a change of its microstructure. The effect of strain aging on the mechanical properties of the steel in toughness tests is determined.

Ключевые слова: деформационное старение, дислокации, охрупчивание, перестаривание, трубная сталь, ударная вязкость, температура старения.

Key words: strain aging, dislocation, embrittlement, overaging, pipe steel, toughness, aging temperature.

УДК 621.791.011

Введение

Старение металла – это изменение его свойств во времени при комнатной температуре при длительном вылеживании (естественное старение) или при повышенных температурах в ходе специальной термической обработки (искусственное старение), а также изменение свойств при вылеживании или эксплуатации при различных температурах после холодной пластической деформации. Имеется специальный класс сталей и сплавов, для которых старение является заключительной термической обработкой [1; 8; 12].

Работы по изучению старения Fe-C сплавов показали, что общая закономерность распада пересыщенного раствора аналогична закономерностям, наблюдаемым в цветных сплавах, при этом старение идет за счет внедрения примесей (углерода и азота).

В основном, изучают два вида старения:

1) Старение после закалки. Это явление связано с распадом пересыщенного твердого раствора, скорость которого определяется температурой старения, химическим составом стали и количеством дефектов кристаллического старения.

2) Деформационное старение. Это явление связано с изменением свойств во времени после холодной и пластической деформации. В зависимости от вида деформации различают статическое старение (сопровождается перераспределением атомов углерода и азота в твердом растворе после холодной деформации) и динамическое (перераспределение атомов происходит в процессе пластической деформации).

При деформационном старении в стали появляется большое количество «свежих» дислокаций, которые при достаточной их подвижности способны взаимодействовать с атомами углерода и азота. Различают следующие стадии деформационного старения:

1) Первая стадия – увеличение количества атомов углерода и азота на дислокациях, которое приводит к уменьшению расчетных расстояний между точками закреплений дислокаций (L_C), росту площадки текучести и упрочнению металла.

2) Вторая стадия – увеличение количества атомов углерода и азота на дислокациях, сопровождающееся дальнейшим упрочнением уже без изменения L_C и длины площадки текучести.

3) Образование частиц устойчивой фазы. Эта стадия характеризуется значительным повышением предела текучести и охрупчиванием.

4) Коалесценция частиц устойчивой фазы, выделившихся на предыдущей стадии – характеризуется увеличением расчетных расстояний между точками закрепления дислокаций L_C и, как следствие, снижением прочности. Именно эта стадия имеется в виду, когда говорят о перестаривании.

Кроме этого при длительном старении наряду с коалесценцией происходит смена мест преимущественного расположения частиц в связи с неизбежным различием уровня свободной энергии системы [8; 12]. В общем случае повышение длительности старения приводит к смене мест расположения частиц (карбидов железа) в следующей последовательности: матрица → дислокации → границы зерен.

Методика проведения исследований

Оценку склонности стали к деформационному старению проводили в соответствии с ГОСТ 7268-82*. Темплеты, представленные на исследование, вырезаны из трубопроводов, в которых в той или иной степени произошли процессы старения.

Из темплетов вырезались заготовки $12 \times 12 \times 250$ мм для изготовления ударных образцов и заготовки размерами $20 \times 5 \times 60$ мм (начальная ширина \times толщина \times рабочая длина). Заготовки с нанесенной на них сеткой подвергали деформации растяжением из расчета получения $(10 \pm 0,5)$ % остаточного удлинения. Вид заготовок до и после деформации показан на рис. 1.

Согласно СНиП 2.05.06-85*, которым руководствуются при строительстве магистральных трубопроводов, ударную вязкость следует определять на образцах Шарпи (ГОСТ 9454-78*). Радиус концентратора напряжения у этих образцов составляет $(0,25 \pm 0,025)$ мм. Данное условие требует проведения более жестких испытаний, позволяющих гарантировать безопасность трубопроводов в процессе эксплуатации, для этого ударная вязкость при минимальной температуре эксплуатации трубопроводов на образцах Шарпи должна быть не менее $39,2$ Дж/см². Минимальной температурой эксплуатации нефтепроводов в соответствии с ТУ 14-3-1698-2000 и СП 34-101-98 является температура -5 °С.

Для измерения работы удара и ударной вязкости изготавливались образцы с V-образным надрезом. Старение после деформации проводили при температуре (250 ± 10) °С. Длительность старения составляла 0, 1, 10, 100, 500 и 1000 ч.

После этого проводили испытания на растяжение и ударный изгиб. Испытания на растяжение проводили при температуре $+20$ °С, испытания на ударный изгиб: -40 °С на образцах Шарпи.

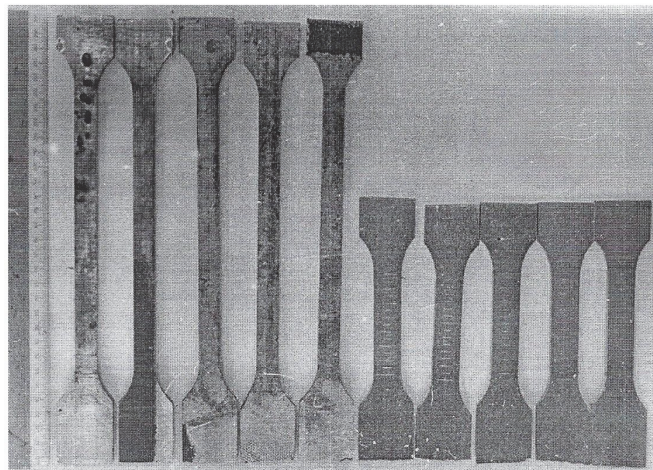
Поскольку при строительстве трубопроводов при укладке трубы в траншею имеет место холодная деформация, то при дальнейшей эксплуатации должно иметь место и деформационное старение [6; 8]. В связи с этим представляет интерес оценить склонность исследуемых сталей к деформационному старению.

Оценку склонности стали к деформационному старению проводили по ГОСТ 7268-82*. Суть метода заключалась в том, что определялась работа удара или ударная вязкость стали, подвергнутой холодной пластической деформации и искусственному старению, и сравнивалась с работой удара или ударной вязкостью стали в исходном состоянии с определением показателя склонности стали к старению S , который определялся как

$$C = \frac{KC - KCA}{KCA} \cdot 100,$$

где KC – среднее арифметическое значение ударной вязкости в исходном состоянии; KCA – среднее арифметическое значение ударной вязкости стали после старения.

а)



б)

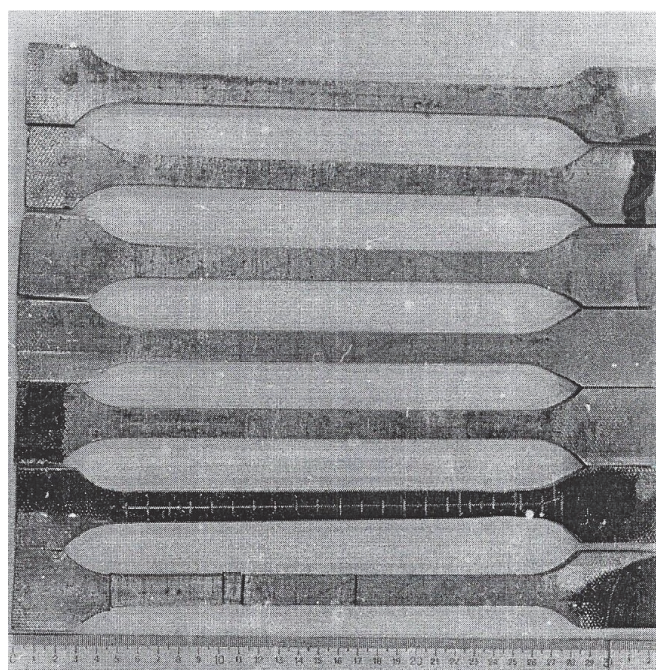


Рис. 1. Вид образцов для испытания склонности стали к деформационному старению:
а – исходные заготовки; б – вид заготовок после деформации растяжением 10 %

Сравнивались между собой только те результаты, которые получены при одном и том же способе деформации заготовок на одинаковых типах образцов. Искусственное старение проводили при температуре $(250 \pm 10)^\circ\text{C}$ в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе.

Схема вырезки образцов из трубы представлена рис. 2.

Данные, полученные при измерении, подтверждаются исследованиями микроструктуры, т.к. известно, что изменения проходят на уровне тончайших микроскопических структур.

Для оценки изменений применяли качественный и количественный анализы.

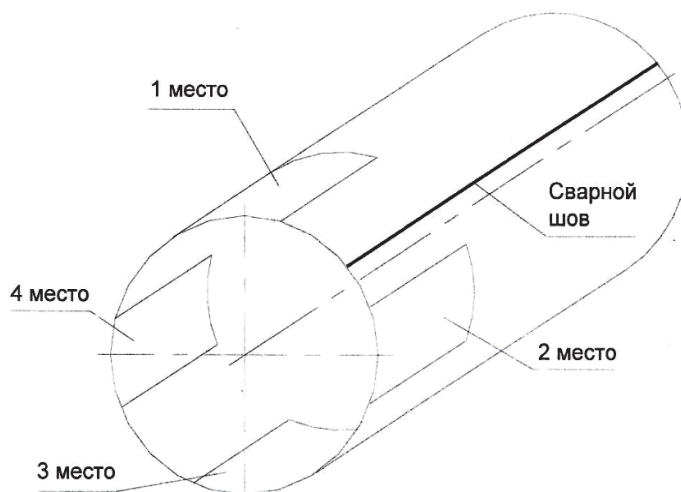


Рис. 2. Схема вырезки заготовок из трубы

Качественный анализ микроструктуры включал в себя оценку таких показателей, как форма, размер и границы зерен, выделения на границах зерен.

Количественный структурный анализ включал определение процентного содержания этих зерен путем вычисления занимаемой ими площади методом точечного счета. Исследования проводились в пяти партиях образцов. Подсчет проводили в пяти полях зрения шлифов из каждой опытной партии [11].

Результаты исследований

Основой резкой текучести является быстрое увеличение числа подвижных дислокаций в начале пластического течения. Для их появления требуется выполнение двух условий:

1) в исходном состоянии в образце число подвижных дислокаций должно быть очень малым;

2) число подвижных дислокаций должно быстро увеличиваться по тому или иному механизму в самом начале деформации.

Резкое увеличение числа подвижных дислокаций возможно:

1) за счет разблокировки ранее закрепленных дислокаций (отрыв от примесных атмосфер, обход частиц второй фазы поперечным сложением и т.п.);

2) за счет образования новых дислокаций;

3) за счет размножения в результате взаимодействия.

Недостаток подвижных дислокаций в исходном образце может быть связан либо с высоким совершенством структуры, либо с закреплением имеющихся дислокаций. Такое закрепление может быть достигнуто образованием примесных атмосфер на дислокациях в процессе старения.

Разрушение образцов происходит по типу, который называют «конус-чашечка». Разрушение «конус-чашечка» занимает промежуточное место между хрупким и вязким разрушениями. Часто под термином вязкого разрушения понимают именно этот тип разрушения.

После механических испытаний исследуемые образцы имеют хорошо выраженную шейку (см. рис. 3).

Макроскопическая картина разрушения при испытании на растяжение с образованием излома «конус-чашечка» выглядит следующим образом: по мере увеличения нагрузки образец удлиняется и уменьшается в сечении, причем изменения равномерно распределяются по рабочей длине образца; на определенном этапе процесса (обычно после достижения максимального значения нагрузки) наблюдается потеря устойчивости деформации и образуется локальное уменьшение сечения образца – шейка; в результате этого во внутренних областях образца возникает объемное напряженное состояние – трехосное растяжение, накладывающееся на внешнее осевое растяже-

ние; заключительный этап процесса – разрыв образцов. Разрушение начинается с образования мелких пустот – пор, которые, сливаясь, образуют центральную трещину.

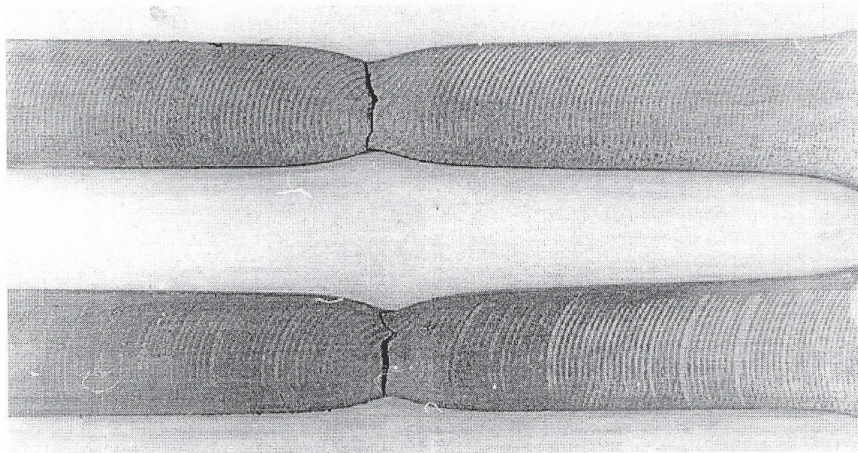


Рис. 3. Вид образцов после испытания на растяжение

В большинстве случаев трещина появляется в центре сечения, а затем начинает распространяться в обе стороны по направлению к боковой поверхности, образуя дно будущей чашечки. По приближению к поверхности трещина поворачивает под углом $\approx 45^\circ$ к первоначальному направлению и выходит на поверхность, образуя коническую часть излома.

Диаграммы растяжения состаренных образцов показаны на рис. 4. Диаграммы 1 и 1' соответствуют образцу, который после деформации на 10 % без старения был подвергнут повторному нагружению, диаграмма 2 – образцу, который после деформации был состарен в течение 1 ч при 250°C . Как видно из рис. 4, на диаграмме появляется площадка текучести длиной l_1 . При увеличении длительности старения до 10 ч на диаграмме появляется зуб текучести, длина площадки текучести и предел текучести возрастают. Эти изменения говорят о том, что при увеличении длительности старения с 1 до 10 ч количество точек закрепления дислокаций возросло, а расчетное расстояние между точками закрепления L_C уменьшилось.

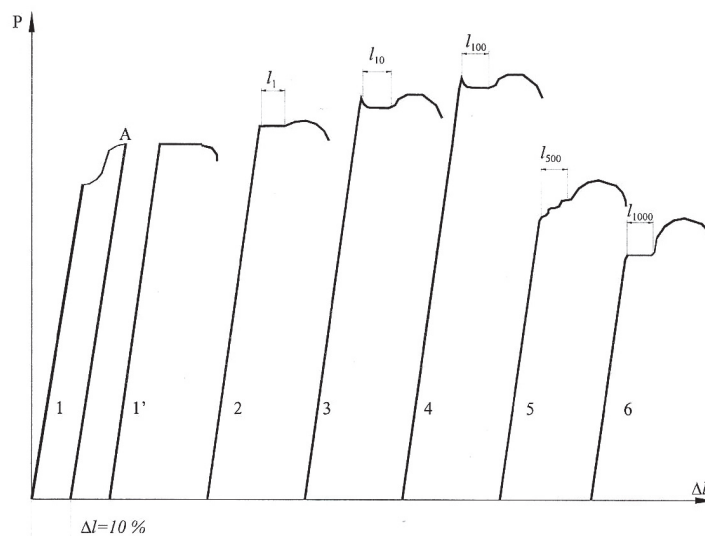


Рис. 4. Диаграммы растяжения состаренных образцов с различными режимами старения: 1 – деформация 10 %; 1' – повторное нагружение 1-го образца; 2 – деформация 10 % + $250^\circ\text{C} \times 1$ ч; 3 – деформация 10 % + $250^\circ\text{C} \times 10$ ч; 4 – деформация 10 % + $250^\circ\text{C} \times 100$ ч; 5 – деформация 10 % + $250^\circ\text{C} \times 500$ ч; 6 – деформация 10 % + $250^\circ\text{C} \times 1000$ ч; $l_1, l_{10}, l_{100}, l_{500}$ – длины площадок текучести; $l_1 < l_{10}, l_{10} = l_{100} = l_{500}$

При длительности старения 100 ч достигается максимальный эффект упрочнения, а длина площадки текучести не изменяется. Это свидетельствует о том, что на дислокациях сформировалась устойчивая фаза. Скорее всего, это цементит Fe_2C .

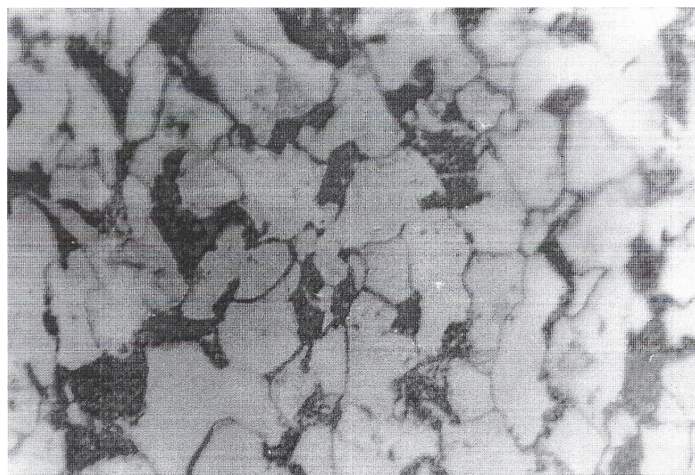
При длительности старения 500 ч предел текучести уменьшается. Это свидетельствует о том, что началась коалесценция карбидных частиц (рост более крупных частиц за счет растворения мелких). В результате этого процесса количество точек закреплений на дислокациях уменьшается, а прочность падает. Иначе говоря, при старении 500 ч происходит перестаривание стали. То же наблюдается при старении в течение 1000 ч.

Характер диаграммы растяжения перестаренного образца существенно отличается от других диаграмм: во-первых, на диаграмме растяжения отсутствует зуб текучести; во-вторых, на кривой наблюдается несколько площадок текучести.

Все это однозначно свидетельствует об уменьшении количества точек закреплений на дислокациях.

Микроструктурный анализ показывает, что при длительном старении происходит смена мест выделений карбидных частиц [11]. На рис. 5, а показана структура стали после старения в течение 100 ч. Как видно из рис. 5, а, в объеме зерен имеются отдельные черные точки (карбиды железа). На границах зерен карбида железа практически нет.

а)



б)

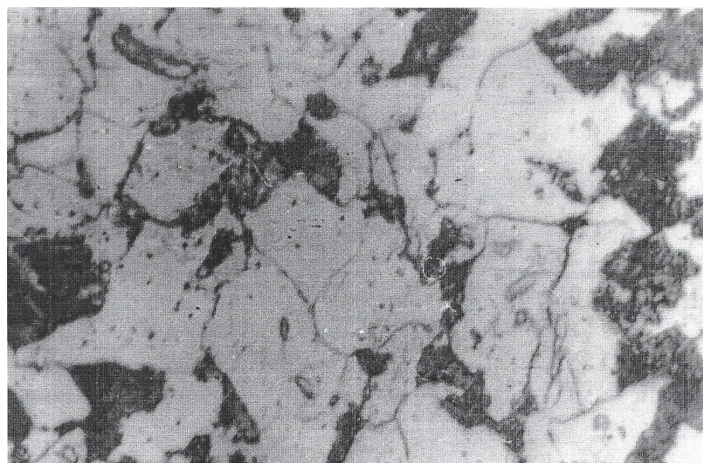


Рис. 5. Микроструктура стали после старения в течение 100 ч (а) и 500 ч (б)

На рис. 5, б показана структура стали после старения в течение 500 ч. Как видно из рис. 5, б, количество цементитных частиц в объеме зерен возросло. Возросло и количество выделений на границах зерен. Необходимо отметить, что карбидные частицы, видимые на рис. 5 в объ-

еме зерен, на самом деле находятся на дислокациях. Просто дислокации в данном увеличении не видны. Увеличение количества карбидных частиц при старении в течение 500 ч по сравнению со старением в течение 100 ч – кажущееся явление.

Данный эффект обусловлен не увеличением количества, а увеличением размеров карбидов (коалесценцией), в результате чего невидимые ранее частицы становятся видимыми. В целом же плотность выделений при увеличении длительности старения уменьшается, о чем свидетельствует снижение прочности стали.

Результаты испытаний на динамический изгиб приведены в табл. 1. Как видно из данных, приведенных в табл. 1, старение приводит к охрупчиванию стали, причем величина KVC^{40} практически не зависит от длительности старения до 500 ч. При дальнейшем старении стали ударная вязкость возрастает.

Таблица 1

Значения ударной вязкости KVC^{40} , Дж/см²

Номер испытания	Длительность старения, ч					
	0	1	10	100	500	1000
1	24,0	1,25	1,25	3,75	1,75	13,1
2	19,8	1,25	1,50	1,25	2,75	14,9
3	21,6	3,75	4,75	1,25	1,50	8,5

Исследования, проведенные нами ранее, показали, что при длительности эксплуатации (более 30 лет) процессы старения развиваются настолько, что предел текучести стали становится ниже значений, регламентированных ГОСТ 19282-73*. Результаты этих исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний механических свойств стали 14ХГСА после 30 лет эксплуатации

Номер места	Параметр		
	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Удлинение δ , %
Значение по ГОСТ 19282-73* (поперечные образцы)	490	345	22
1-е место	$\frac{495...505}{500...507}$	$\frac{327...331}{340...345}$	$\frac{24}{24}$
	$\frac{472...474}{485...495}$	$\frac{305...321}{325...327}$	$\frac{25}{24}$
2-е место	$\frac{490...506}{505...510}$	$\frac{338...341}{345...347}$	$\frac{27}{25}$
	$\frac{506...512}{515...520}$	$\frac{340...342}{345...348}$	$\frac{26}{25}$

Примечание. В числителе даны свойства стали вдоль прокатки, в знаменателе – поперек прокатки

В табл. 3 приводятся значения ударной вязкости при различных температурах.

Обращает на себя внимание очень высокий уровень ударной вязкости у исследуемой стали. Образцы не разрушались при испытании при температуре -80 °С, и даже при -180 °С уровень ударной вязкости близок к значениям, которые регламентируются ГОСТом для этой стали при температуре -40 °С. Высокие значения ударной вязкости обусловлены особенностями разрушения при испытаниях, которые, в свою очередь, зависят от структуры стали.

Значение ударной вязкости (KCU , Дж/см²) стали 14ХГСА после 30 лет эксплуатации

Номер места	Температура испытания, °С					Значение по ГОСТ 19282-73*
	+20	-40	-60	-80	-180	
1-е место	$\frac{\text{Не сломался}}{78...95}$	$\frac{\text{Не сломался}}{51,2...60}$	$\frac{\text{Не сломался}}{27,5...38,7}$	$\frac{\text{Не сломался}}{-}$	$\frac{27,5}{-}$	При -40 °С ударная вязкость >39
2-е место	$\frac{\text{Не сломался}}{115...120}$	$\frac{\text{Не сломался}}{55...75}$	$\frac{\text{Не сломался}}{39...42}$	$\frac{122,5...140,5}{-}$	$\frac{30}{-}$	
3-е место	$\frac{\text{Не сломался}}{85...95}$	$\frac{\text{Не сломался}}{48...70}$	$\frac{\text{Не сломался}}{30,5...38}$	$\frac{\text{Не сломался}}{-}$	$\frac{35}{-}$	
4-е место	$\frac{\text{Не сломался}}{76...90}$	$\frac{\text{Не сломался}}{57...75}$	$\frac{\text{Не сломался}}{26...35}$	$\frac{\text{Не сломался}}{-}$	$\frac{29,5}{-}$	

Примечание. В числителе даны значения ударной вязкости вдоль прокатки; в знаменателе – поперек прокатки

Выводы

Проведенные исследования показывают, что в процессе длительной эксплуатации в металле труб прошли процессы старения, но уровень его свойств на сегодняшний день достаточно высокий, и он соответствует ГОСТ 19282-73* и СНиП 2.05.06-85*.

Однако необходимо иметь в виду, что процессы старения в металле будут развиваться дальше. Поэтому естественно встает вопрос, что ожидается в перспективе. В связи с этим представляется интересным проследить изменение свойств металла при искусственном старении. Повышение температуры ускорит процессы старения и позволит определить влияние различных стадий старения на свойства стали.

Необходимо отметить, что снижение прочности не только повышает вероятность разрушений, но и создает проблемы при ремонте трубопроводов, поскольку труба легко теряет устойчивость при небольших нагрузках.

Таким образом, полученные результаты говорят о том, что при длительной эксплуатации трубопроводов возможны два вида негативных изменений свойств сталей:

- 1) охрупчивание;
- 2) снижение прочности.

Снижение прочности трубы обусловлено двумя причинами:

- 1) утоньшением стенки трубы в результате коррозионных процессов;
- 2) перестареванием трубы.

Оба этих фактора оказывают большое влияние на прочность трубопроводов. Чтобы минимизировать потери разрушений трубопроводов в результате перестаревания необходимо после 20-летнего срока эксплуатации проводить периодическую аттестацию трубопровода (рекомендуется один раз в 3 года) с целью определения изменения механических свойств металла и соответствие их нормативным документам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карнаухов, Л. А. Протектор буровых долот буровых / Л. А. Карнаухов, М. Л. Карнаухов // Обзорная информация ВНИИОЭНГ, сер. «Бурение». – Вып. 16. – М.: ВНИИОЭНГ, 1985. – 36 с.
2. Кисельман, М. Л. Износ и защита обсадных колонн при глубоком бурении / М. Л. Кисельман. – М.: Недра, 1971. – 208 с.
3. Криштал, М. А. Механизм диффузии в железных сплавах / М. А. Криштал. – М.: Металлургиздат, 1972. – 400 с.
4. Гумеров, А. Г. Старение труб нефтепроводов / А. Г. Гумеров, Р. С. Зайнуллин, К. М. Ямалеев, А. В. Росляков. – М.: Недра, 1995. – 223 с.



5. ГОСТ 7268-82. Сталь. Метод определения склонности стали к деформационному старению по испытанию на ударный изгиб. – Введ. 01.01.1983. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 4 с.
6. Полянская, И. Л. Изменение свойств трубных сталей в процессе длительной эксплуатации / И. Л. Полянская, Н. И. Красовская // Сборник научных трудов SWorld. – Вып. 4. – Т. 16. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2013. – С. 24-26.
7. Кораблев, В. А. Отчет по научно-исследовательской работе: Исследование механизма образования, формы, размеров и площади карбидной фазы при обычном отпуске и тепловой обработке в вакууме на износостойкость и долговечность шарнирных подшипников из стали 95X18Ш/ №78003824 от 01.12.1980.
8. Ячинский, А. А. Влияние структурно-фазового состава трубных сталей и их сварных соединений на сопротивление деформационному старению: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Ячинский. – М., 2006. – 142 с.
9. Полянская, И. Л. Изучение термической и вакуумной обработки на износостойкость стали 40X13, применяемой для изготовления ножей куттера / И. Л. Полянская, Д. Д. Байнашев, В. А. Кораблев // Материалы конференции национального первенства по научной аналитике открытого Европейско-Азиатского первенства по научной аналитике, Лондон, Великобритания, 15-20 марта 2012 г. – С. 69-73.
10. Полянская, И. Л. Изучение процессов, протекающих в закаленных углеродистых сталях при низком отпуске: монография / И. Л. Полянская, В. А. Кораблев. – Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», 2015. – 80 с.
11. Полянская, И. Л. Сталь 95X18Ш и влияние на ее свойства тепловой вакуумной обработки / И. Л. Полянская, И. В. Шушарина // Сборник научных трудов ТюмГАСУ за 2014 год. В 2 т. Т.1. – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2014. – С. 103-106.
12. Зорин, А. Е. Влияние упруго-пластической деформации на коррозионно-механические характеристики трубных сталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Е. Зорин. – М., 2009. – 18 с.
13. ГОСТ 10705-80. Трубы стальные электросварные. Технические условия. – Введ. 01.01.1982. – М.: Стандартинформ, 2005. – 10 с.

Полянская И. Л., Белова Л. В.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАКАЛКИ НА ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ ОТПУСКЕ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Полянская И. Л., Белова Л. В.

I. L. Polyanskaya, L.V. Belova

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАКАЛКИ НА ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ ОТПУСКЕ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

STUDY OF THE HARDENING TEMPERATURE INFLUENCE ON PROCESSES WHEN TEMPERING CARBON STEEL

Полянская Ирина Леонидовна – кандидат технических наук Уральского государственного университета путей сообщения (филиал в г. Тюмени) (Россия, Тюмень). E-mail: polyanskaya_il@inbox.ru.

Ms. Irina L. Polyanskaya – PhD in Engineering, Ural State Railway Transport University (affiliated in Tyumen) (Russia, Tyumen). E-mail: polyanskaya_il@inbox.ru.

Белова Лариса Владимировна – старший преподаватель Тюменского индустриального университета (Россия, Тюмень). E-mail: klv@mail.ru.

Ms. Larisa V. Belova – senior lecturer, Industrial University of Tyumen (Russia, Tyumen). E-mail: klv@mail.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты исследований изменений электросопротивления углеродистых сталей при низком отпуске и определено влияние температуры на величину электросопротивления. Анализ полученных результатов показал, что влияние углерода на величину электросопротивления на несколько порядков выше влияния дефектов кристаллического строения, изменения электросопротивления при отпуске закаленных сталей обусловлены перераспределением углерода.

Summary. The article presents the research results of carbon steel electrical resistance changes at low tempering and determines the effect of temperature on the electrical resistance. The analysis of the results showed that the influence of carbon on the value of the electrical resistance is higher than the influence of the crystal structure defects. The changes of the hardened steel electrical resistance are due to the redistribution of carbon.

Ключевые слова: закалка, температура закалки, температура отпуска, электросопротивление, удельное электросопротивление, закаленные стали.

Key words: hardening, hardening temperature, tempering temperature, electrical resistance, electrical resistivity, hardened steel.

УДК 669.111.35:539.4.015

Введение

Для надежной работы узлов механизмов трения и качения большое значение имеют их закалка и отпуск. Исследователи применяли различные температуры закалки для сталей практически одинакового состава. Так как температура закалки определяет степень растворения карбидов хрома в аустените, представляется интересным проследить влияние температуры закалки и степени растворения карбидов на процессы, протекающие при отпуске сталей.

Методика проведения исследований

Величину электросопротивления можно изучать как величину, отражающую не только внутренние превращения, возникающие при закалке, отпуске, изотермическом распаде аустенита и тому подобных обработках, но и явления, происходящие при дисперсионном твердении ферритных и аустенитных сталей, не испытывающих аллотропических превращений [4].

Измерение электросопротивления проводилось потенциометрическим методом на стандартной установке. В конструкцию установки по измерению электросопротивления были внесены изменения, после чего на ней стало возможным определять абсолютные значения электросопротивления одновременно у четырех образцов [8; 9].

Узел для размещения образцов представлен на рис. 1. Образцы 1 размещались в кварцевой трубке 6. Расстояние до всех четырех предметов от стенок трубки было одинаковым. К ним через керамические трубки 2 подводились токовые 4 и потенциальные 5 провода. Провода приваривались к образцам конденсаторной сваркой. Для получения равномерной температуры в зоне, где они находились, применялись экраны 3 из нержавеющей стали. Температура в этой зоне измерялась термопарой 8. Для получения вакуума не ниже 10 мм рт.ст. кварцевая трубка имела фланцевый затвор 7. Размер образцов для измерения электросопротивления составлял $2 \times 2 \times 2$ мм.

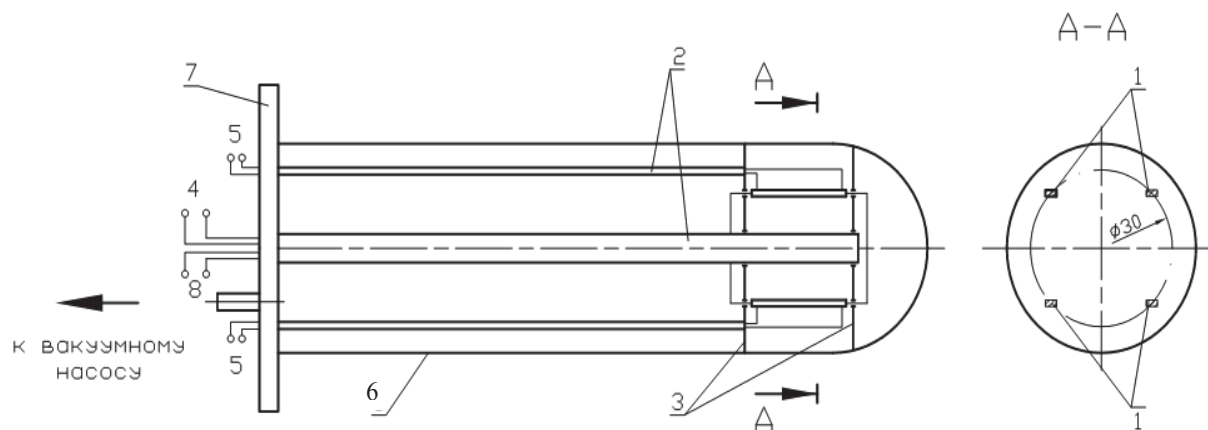


Рис. 1. Схема расположения образцов в кварцевой трубке при измерении электросопротивления:

- 1 – образцы; 2 – керамические трубки для токовых и потенциальных проводов;
- 3 – экраны из нержавеющей стали; 4 – токовые провода;
- 5 – потенциальные провода; 6 – кварцевая трубка;
- 7 – фланцевый затвор; 8 – термопара

Исследование проводилось на углеродистой стали 35 и хромистой стали 35Х4. Образцы этих сплавов нагревали в кварцевых трубках до различных температур (850, 950, 1100 и 1200 °С). Выдержка при нагреве до заданной температуры составляла 30 мин. Часть образцов обрабатывали по режиму +1200 °С в течение 4 ч. Охлаждение их проводили в 20%-ном растворе щелочи NaOH.

Температурная зависимость электросопротивления снималась в процессе циклического отпуска. Суть циклического отпуска заключалась в том, что образцы последовательно нагревали до различных температур, причем температурный интервал при отпуске составлял 25 °С.

Измерение электросопротивления производилось следующим образом. Вначале замерялось исходное значение электросопротивления при комнатной температуре (+20 °С) у закаленных образцов, затем производился их последовательный нагрев до нужных температур. После каждого нагрева образцы охлаждались до +20 °С и замерялось значение электросопротивления.

Время выдержки при нагреве сталей до заданной температуры составляло 5 мин, после чего образец охлаждали до комнатной температуры и проводили измерения значений электросопротивления.

Данная схема измерения электросопротивления имеет ряд преимуществ. Во-первых, влияние отпуска на распад мартенсита закаленных сталей здесь изучается на одном образце, что исключает погрешности, которые неизбежно возникают, если брать на каждую температуру по свежему образцу. Смена образца повлечет за собой разброс значений электросопротивления из-за изменения расстояния между потенциальными проводами за счет различий в химическом составе, условиях закалки, геометрии образцов и качестве контакта потенциальных проводов с ними. Во-вторых, эта схема измерения позволяет выявить влияние изменений в структуре образца на электросопротивление. Снимая зависимость электросопротивления образца от температуры отпуска при непрерывном нагреве, не удастся получить такой четкой зависимости потому, что влия-

ние температуры нагрева на электросопротивление на порядок больше, чем влияние структурных факторов.

О влиянии температуры закалки и отпуска на электросопротивление судили по величине

$$\frac{\Delta R}{R_0},$$

где $\Delta R = \frac{R_0 - R_T}{R_0}$ – электросопротивление закаленного образца при комнатной температуре, здесь

R_T – электросопротивление образца при комнатной температуре после нагрева; R_0 – электросопротивление закаленного образца при комнатной температуре после нагрева.

Для того чтобы более четко показать влияние температуры отпуска на величину электросопротивления, определяли температурный коэффициент электросопротивления. Величину температурного коэффициента электросопротивления рассчитывали по формуле [8; 3]

$$\alpha_R = \frac{\Delta R_T}{\Delta T} \cdot \frac{1}{R_0},$$

где $\Delta R_T = R_{T1} - R_{T2}$, $\Delta T = T_1 - T_2$. При этом R_{T1} и R_{T2} , T_1 и T_2 – текущие значения электросопротивления и температуры.

Результаты исследований

Нагрев до высоких температур при закалке приводит к значительным изменениям в структуре стали. Растет зерно, изменяется морфология мартенсита, увеличивается количество дефектов кристаллического строения, происходит перераспределение элементов в твердом растворе и т.д. Все эти факторы оказывают существенное влияние на процессы, протекающие при отпуске. Добавление хрома в сталь в значительной степени изменяет ее структуру, поэтому перед рассмотрением хромистых сталей нами была поставлена задача – исследовать влияние температуры закалки на процессы, протекающие при отпуске простой углеродистой стали.

Отражено влияние температуры закалки на величину удельного электросопротивления закаленных сталей.

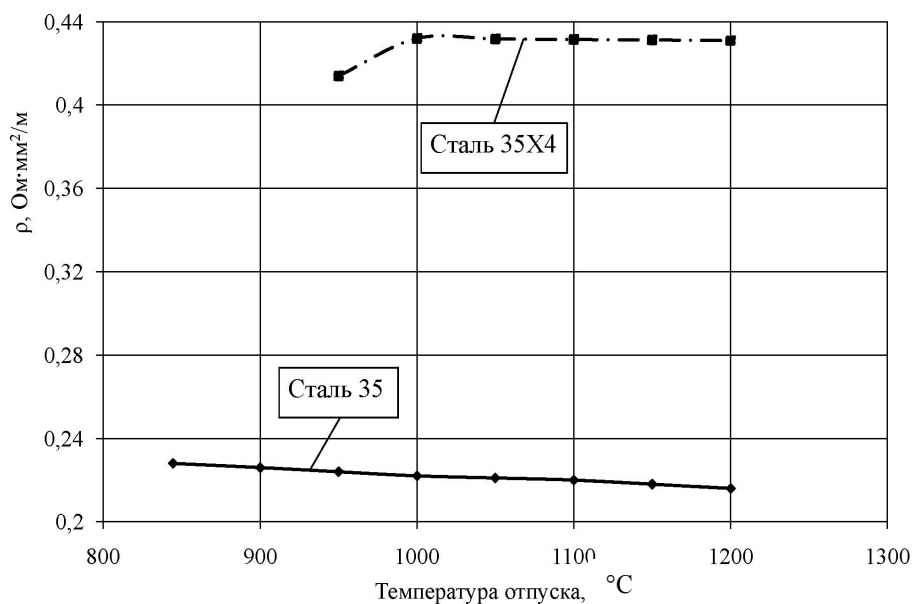


Рис. 2. Влияние температуры закалки на удельное электросопротивление стали 35 (сталь 35X4 приведена для сравнения)

Как видно из рис. 2 (кривая 1), электросопротивление стали 35 с повышением температуры закалки немного уменьшается.

На рис. 3 и 4 показано влияние температуры отпуска на величину удельного сопротивления для сталей 35 и 35Х4 соответственно.

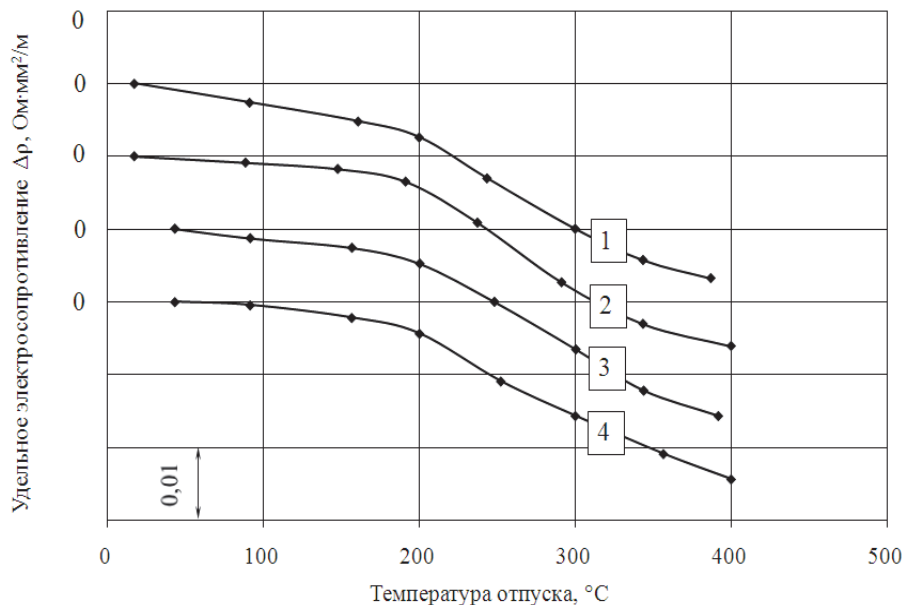


Рис. 3. Влияние температуры отпуска на удельное сопротивление ρ стали 35, закаленной с различных температур (выдержка при температуре закалки 4 ч):
1 – 850 °C; 2 – 950 °C; 3 – 1100 °C; 4 – 1200 °C

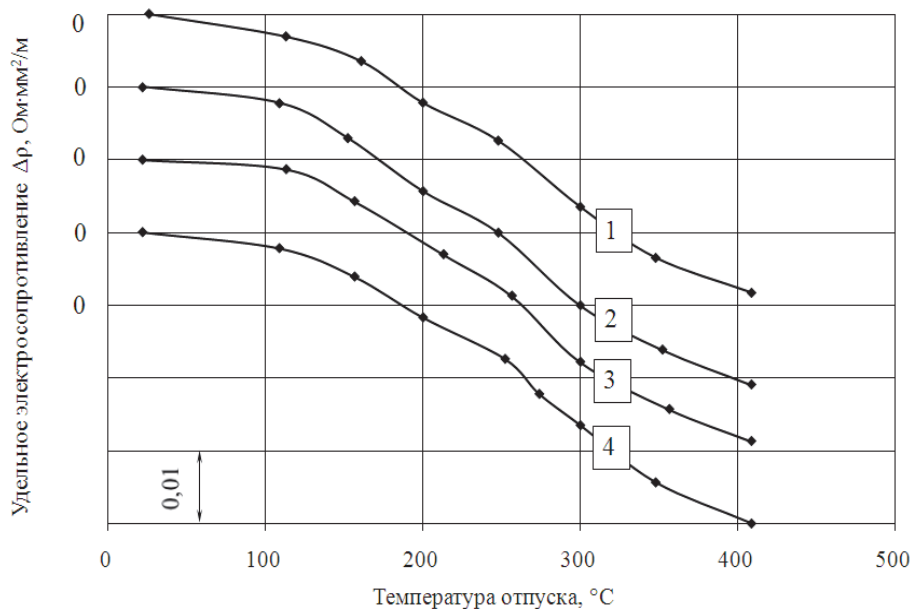


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на удельное электросопротивление ρ стали 35Х4, закаленной с различных температур (выдержка при температуре закалки 4 ч):
1 – 850 °C; 2 – 950 °C; 3 – 1100 °C; 4 – 1200 °C

Влияние на величину температурного коэффициента электросопротивления образцов, закаленных с различных температур, представлено для сталей 35 и 35X4 на рис. 5, 6 соответственно.

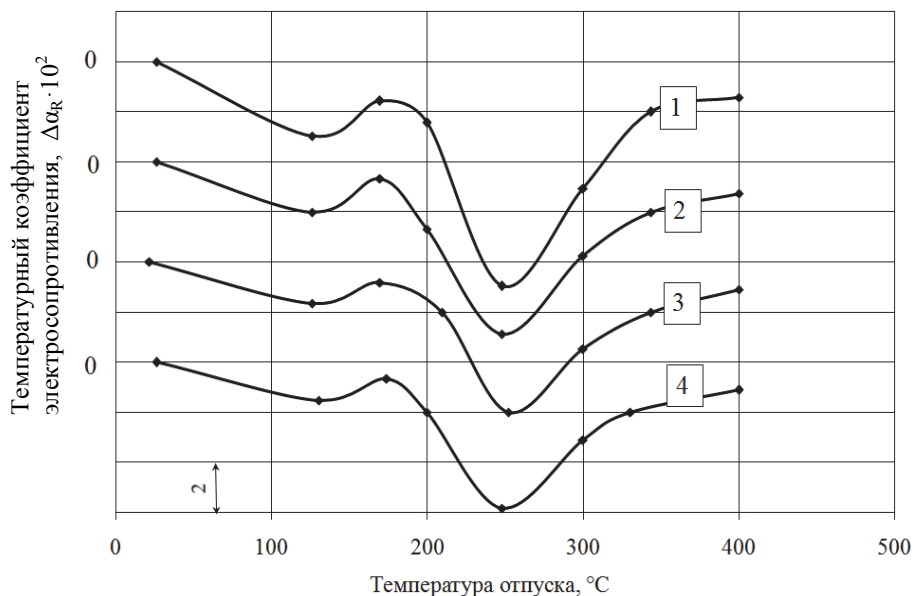


Рис. 5. Влияние температуры отпуска на величину температурного коэффициента электросопротивления α_R стали 35, закаленной с различных температур (выдержка при температуре закалки 4 ч):
1 – 850 $^{\circ}\text{C}$; 2 – 950 $^{\circ}\text{C}$; 3 – 1100 $^{\circ}\text{C}$; 4 – 1200 $^{\circ}\text{C}$

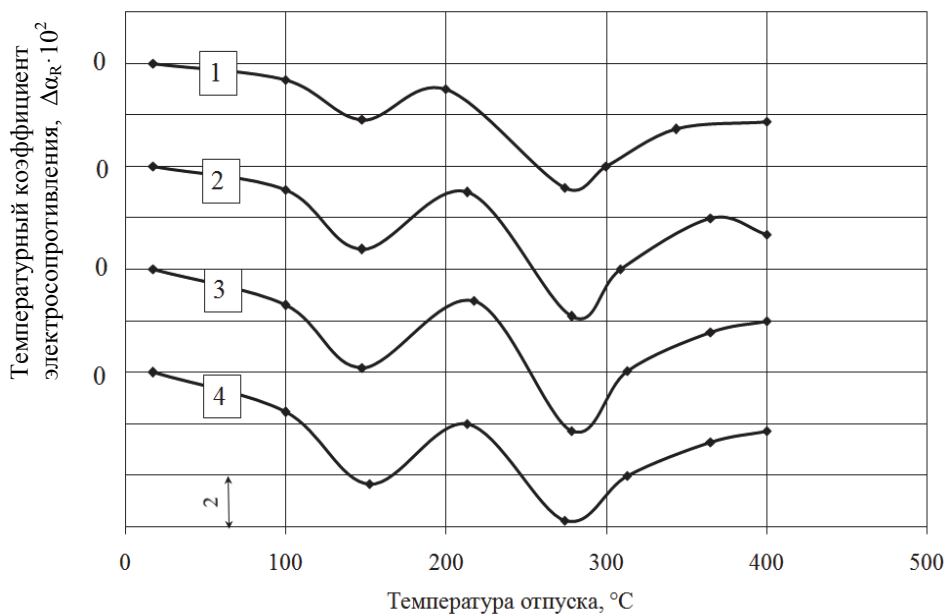


Рис. 6. Влияние температуры отпуска на величину температурного коэффициента электросопротивления α_R стали 35X4, закаленной с различных температур (выдержка при температуре закалки 4 ч):
1 – 850 $^{\circ}\text{C}$; 2 – 950 $^{\circ}\text{C}$; 3 – 1100 $^{\circ}\text{C}$; 4 – 1200 $^{\circ}\text{C}$

Как видно из данных, приведенных на рис. 5 и 6, электросопротивление закаленной стали 35 при отпуске изменяется немонотонно. Имеются области температур, в которых электросопротивление понижается более интенсивно.

Скорость изменения электросопротивления обусловлена процессами, которые протекают в закаленной стали при нагреве.

Величина температурного коэффициента характеризует скорость изменения электросопротивления. Чем больше эта величина, тем выше скорость падения электросопротивления при отпуске.

Особенно это хорошо видно по изменению величины α_R . На кривой $\alpha_R = f(t_{omn})$ имеются два пика. Первый пик наблюдается в интервале температур 20...150 °С, второй – в интервале 200...350 °С.

По данным авторов [11; 12], в стали 35 в интервале температур 20...150 °С происходит выделение углерода из α -твердого раствора в виде ϵ -карбида; при интервале температур 200...300 °С ϵ -карбид переходит в цементит. Согласно [1; 6], изменение физических свойств в интервале температур 20...150 °С обусловлено не ϵ -карбидом, а перераспределением углерода в α -твердом растворе и образованием зон, обогащенных углеродом. При температуре от 200 до 300 °С происходит образование цементита из зон, обогащенных углеродом [5; 8; 2].

Повышение температуры закалки от 850 до 1200 °С не изменяет характер температурной зависимости электросопротивления стали 35 при отпуске. Однако вместе с тем видно, что повышение температуры закалки приводит к уменьшению высоты пиков на кривой $\alpha_R = f(t_{omn})$. Интересно также отметить, что высота пика в интервале температур 20...150 °С намного ниже высоты пика в интервале 150...350 °С.

Обсуждение результатов исследования

Данные, полученные нами для стали 35, не позволяют сказать, чем обусловлено изменение электросопротивления в интервале температур 20...150 °С: образованием ϵ -карбида или образованием зон, обогащенных углеродом. Однако данные по стали 35X4 свидетельствуют косвенным образом о том, что изменение физических свойств исследуемых сталей при температурном интервале 20...150 °С обусловлено образованием зон, обогащенных углеродом, а не ϵ -карбидом; поэтому, исследуя изменения физических свойств закаленных сталей при отпуске, будем считать, что при температуре от 20 до 150 °С происходит образование зон, обогащенных углеродом, а в интервале температур 150...350 °С – образование цементита из зон, обогащенных углеродом.

Повышение температуры закалки от 850 до 1200 °С не изменяет характер температурной зависимости электросопротивления стали 35 при отпуске. Однако вместе с тем видно, что повышение температуры закалки приводит к уменьшению высоты пиков на кривой $\alpha_R = f(t_{omn})$. Интересно также отметить, что высота пика в интервале температур 20...150 °С намного ниже высоты пика в интервале 150...350 °С.

Выводы

Анализ литературных данных по влиянию различных факторов на величину электросопротивления и объемных эффектов в области температур 20...150 °С и 200...350 °С показывает, что его изменение в указанных температурных интервалах обусловлено, главным образом, перераспределением углерода. Это объясняется двумя причинами: во-первых, влияние углерода на электросопротивление на несколько порядков выше влияния дефектов кристаллического строения [8; 3; 9]; во-вторых, в исследуемом интервале температур плотность дефектов кристаллического строения практически не изменяется [8; 3; 9]. То, что изменения электросопротивления при отпуске закаленных сталей обусловлены перераспределением углерода, позволяет по степени изменения этих величин качественно судить о количестве углерода, участвующего в образовании зон в интервале температур 20...150 °С и цементита в интервале 200...300 °С.

Уменьшение высоты пиков на кривой $\alpha_R = f(t_{omn})$ с повышением температуры закалки свидетельствует об уменьшении количества углерода, принимающего участие в образовании зон и цементита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоус, М. В. Превращения при отпуске стали / М. В. Белоус, В. Т. Черепин, М. А. Васильев. – М.: Металлургия, 1973. – 230 с.
2. Конева, Н. А. Классификация дислокационных субструктур / Н. А. Конева, Э. В. Козлов, Л. И. Тришкина // Металлофизика. – 1991. – Т.13 (№ 10). – С. 49-58.
3. Кораблев, В. А. Влияние температуры закалки на процессы, протекающие при отпуске стали 35Х4 / В. А. Кораблев, А. П. Школенко // Термическая обработка и физика металлов. Вып. 9. Межвузовский сборник. – Свердловск: Изд-во УПИ им. С. М. Кирова, 1981. – С. 107-114.
4. Курдюмов, Г. В. Превращения в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – М.: Наука, 1977.– 273 с.
5. Кутсар, А. Р. Изучение превращений при отпуске стали методом ядерного гамма-резонанса / А. Р. Кутсар, Ю. А. Родионов, Г. Г. Исфандияров // Физика металлов и металловедение. – 1980. – Т. 49. – С. 645-648.
6. Лысак, Л. И. Физические основы термической обработки стали / Л. И. Лысак, Б. И. Николин. – Киев, 1975. – 304 с.
7. Новые материалы и технологии. Конструирование новых материалов и упрочняющих технологий / В. Е. Панин, В. А. Клименов, С. Г. Псахье [и др.]; под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1993. – 152 с.
8. Отчет по научно-исследовательской работе. Тема: В/д № 34-77 «Исследование механизма образования, формы, размеров и площади карбидной фазы при обычном отпуске и тепловой обработке в вакууме на износостойкость и долговечность шарнирных подшипников из стали 95Х18Ш» / рук. В. А. Кораблев; исполн. В. А. Кораблев [и др.]. – Тюмень: Тюменский индустриальный институт (ТИИ) им. Ленинского Комсомола, 1980. – 244 с.: № ГР 78003824.
9. Полянская, И. Л. Изучение процессов, протекающих в закаленных углеродистых сталях при низком отпуске: монография / И. Л. Полянская, В. А. Кораблев. – Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», 2015. – 80 с.
10. Сальдау, П. Я. Метод электропроводности при высоких температурах / П. Я. Сальдау. – М.: АН СССР, 1952. – С. 54-67.
11. Федоров, В. А. Влияние отжига на кинетику процессов охрупчивания аморфных сплавов / В. А. Федоров, А. В. Яковлев, А. Н. Капустин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 8(638). – С. 39-41.
12. Черепин, В. Т. Экспериментальная техника в металловедении / В. Т. Черепин. – Киев, 1968. – 351 с.



Бахматов П. В., Муравьев В. И., Физулаков Р. А.
P. V. Bakhmatov, V. I. Muravyev, R. A. Fizulakov

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ ТИТАНОВЫХ
КОНСТРУКЦИЙ (РЕБРИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ) В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИОННЫХ
НАГРУЗОК**

**FEATURES OF WELDED TITANIUM STRUCTURE ELEMENT DESTRUCTION
(RIBBED PANELS) UNDER VIBRATION LOADS**

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.

Mr. Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the department «Mechanical engineering and metallurgy», Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mim@knastu.ru.

Муравьев Василий Илларионович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.

Mr. Vasilii I. Muravyev – Doctor of Engineering, professor, Mechanical engineering and metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mim@knastu.ru.

Физулаков Роман Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: kmtnm@knastu.ru

Mr. Roman A. Fizulakov – PhD in Engineering., Associate Professor, Materials and New Materials Technology Department, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kmtnm@knastu.ru

Аннотация. В статье приведены данные по результатам экспериментальных исследований на вибрационную нагрузку сварных ребристых панелей из титанового сплава ВТ-20. Установлено, что в зонах крепления наблюдаются повышенные динамические знакопеременные напряжения, которые в сочетании с «жёстким» креплением образца создают благоприятные условия для зарождения и развития усталостных трещин, а концентраторы напряжений значительно сокращают время до образования очага разрушения. Исключение в этих зонах поверхностных дефектов не оказывает влияния на характер и кинетику разрушения. Конструкции из титановых сплавов, изготовленные при применении газолазерного раскроя заготовок по оптимальным режимам в среде технического азота и последующей термической обработке по вибронадежности, не уступают конструкциям, сделанным по традиционной технологии.

Summary. The article presents data on the experimental studies results of welded ribbed panel vibration load of the ВТ-20 titanium alloy. It was established that in the areas of attachment, there is elevated dynamic alternating stress, which in combination with the "hard" of the sample holder creates favorable conditions for the emergence and development of fatigue cracks, and stress concentrators greatly reduce the time before the formation of the hearth destruction. An exception in these zones of superficial defects do not affect the nature and kinetics of destruction. Construction of titanium alloys made in the application of gas-laser cutting blanks for optimal regimes in the technical environment of nitrogen and subsequent heat treatment on vibration reliability is not inferior to design, made by traditional technology.

Ключевые слова: циклическая прочность, динамические нагрузки, титановые ребристые сварные конструкции, режимы сварки, разрушения.

Key words: cyclic strength, dynamic loads, titanium ribbed welded structures, welding modes, destruction.

УДК 621.7.092

Как известно, реальные механические конструкции (в особенности конструкции авиационной и ракетной техники) часто эксплуатируются в условиях значительных вибрационных нагрузок. В связи с указанным характером эксплуатации при проектировании подобных аппаратов возникает необходимость учёта не только значений, реально действующих динамических нагрузок, но и их распределения по объёму конструкции, а при выборе конструкционного материала на первый план выходят не столько статические характеристики материала, сколько эксплуатационные характеристики, определяющие его долговечность.

В ходе циклического нагружения при относительно низких нагрузках в материале происходят микродеформации, приводящие к наклёпу в соответствующих областях, в результате чего образуются постепенно развивающиеся микротрещины, которые уменьшают «рабочую» область сечения конструкции и в дальнейшем приводят к мгновенному разрушению материала. Очевидно, что наличие дефектов (особенно поверхностных) в эксплуатируемых конструкциях оказывает значительное влияние как на процесс усталостного разрушения, так и на соответствующие усталостные характеристики материала.

Весь комплекс технологических операций изготовления сварных титановых ребристых панелей безусловно оказывает влияние на поверхностную дефектную структуру конструкции и, следовательно, на её эксплуатационные характеристики. В связи с чем исследование разрушения реальных авиационных ребристых конструкций в условиях вибрационных нагрузок представляет не только научный интерес, но и практическую значимость.

С этой целью были разработаны и изготовлены натурные образцы из сплава ВТ20 толщиной 1,2 мм (см. рис. 1). Конструкция опытного образца в миниатюре представляла собой характерный участок силовой панели летательного аппарата [1]. Образцы состоят из четырех сварных заготовок и двух стрингеров высотой 20 и 10 мм, раскроенных на лазерной установке BYSTRONIC-BYSTAR-3015 с использованием технического азота класса 4,5. Общий размер сварного образца 300×600 мм.

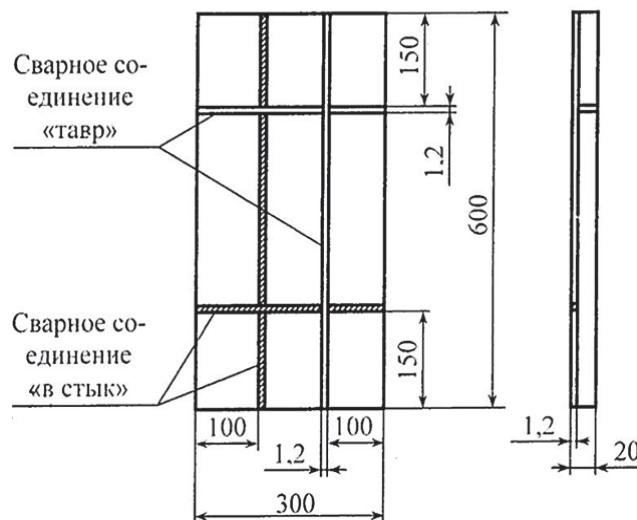


Рис. 1. Эскиз экспериментальных образцов

Сварку ААрдЭС проводили сквозным проплавом по инструкции НИАТ ПИ-1.4.898-88. Категория сварных соединений ААрдЭС сквозным проплавом и стыковых – 1. Рентген-контроль сварных соединений ААрдЭС.

Использовались сварные стыковые и тавровые соединения (сварка стрингеров) для более полного выяснения влияния газолазерной резки (ГЛР) на свойства сварного шва (СШ). С этой же целью СШ делали как в продольном, так и в поперечном направлении относительно прокатки. Кромки готовой к испытанию конструкции имели как фрезерованную, так и образованную ГЛР поверхность.

Отжиг готовой детали для снятия остаточных напряжений на кромках, вызванных ГЛР и последующей сваркой, проводили в вакуумной печи УВН-1545 при 650 °С, 1 ч.

Испытания проводились на вибраторе V954МКII. Образец крепился к столу виброустановки с помощью втулок Ø20 мм и высотой 40 мм. При испытаниях для увеличения динамических нагрузок применялся груз массой 250 г. Места установки грузов и схемы крепления образца приведены на рис. 2, 3.

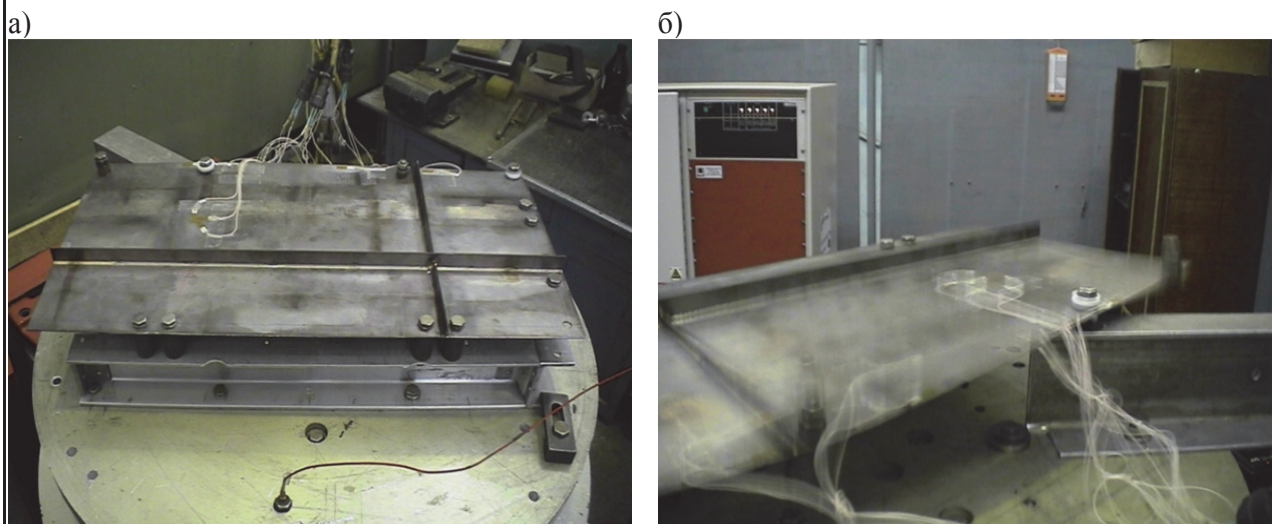


Рис. 2. Фото образца, закрепленного на вибростенде (а) и в процессе виброиспытания (б)

Для выбранных образцов и схем их крепления определялись резонансные частоты в диапазоне (10...400) Гц, а также проводились испытания на вибропрочность (испытания в условиях вибрационных нагрузок при резонансных частотах до разрушения конструкции). После разрушения конструкции проводились визуально-оптические, металлографические, рентгенографические и электронно-микроскопические исследования зон разрушения. Кроме того, в ходе испытаний регистрировались механические напряжения в характерных точках конструкции, схемы размещения тензодатчиков приведены на рис. 3. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

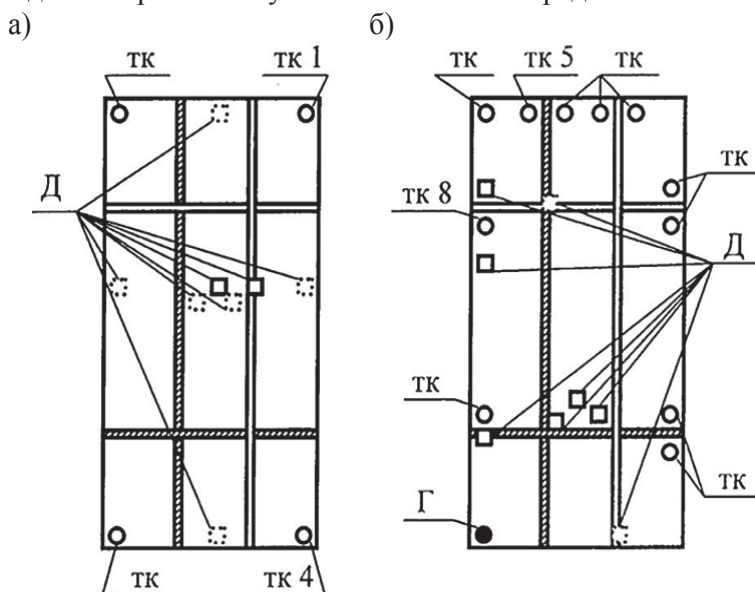


Рис. 3. Схемы испытания образцов
(Д – тензодатчик, тк – точка крепления образца,
Г – груз 250 и 420 г)

Режимы испытаний образцов

Схема крепления	Режим испытания		
	Частота, Гц	Виброперегрузка, g	Время испытания, ч
Рис. 3, а	49	5	13
	32	7	1,5
Рис. 3, б	38	6	0,5
	24	7	13

Видно, что схема крепления и частота вибрации оказывают значительное влияние на характер распределения нагрузки по объёму образца и, следовательно, на время зарождения и развития трещин. Максимальные напряжения возникают как в зонах повышенной жёсткости (зонах крепления образца, вблизи областей таврового соединения), так и в зонах максимальных деформаций.

В результате испытаний разрушение образцов произошло в зонах их крепления, при этом в образцах (см. рис. 4), закреплённых по схеме 1 (см. рис. 3, а), образование трещин произошло вблизи 1-й и 4-й точек крепления, а в образцах, закреплённых по схеме 2 (см. рис. 3, б), трещины появились вблизи 5-й и 8-й точек крепления.

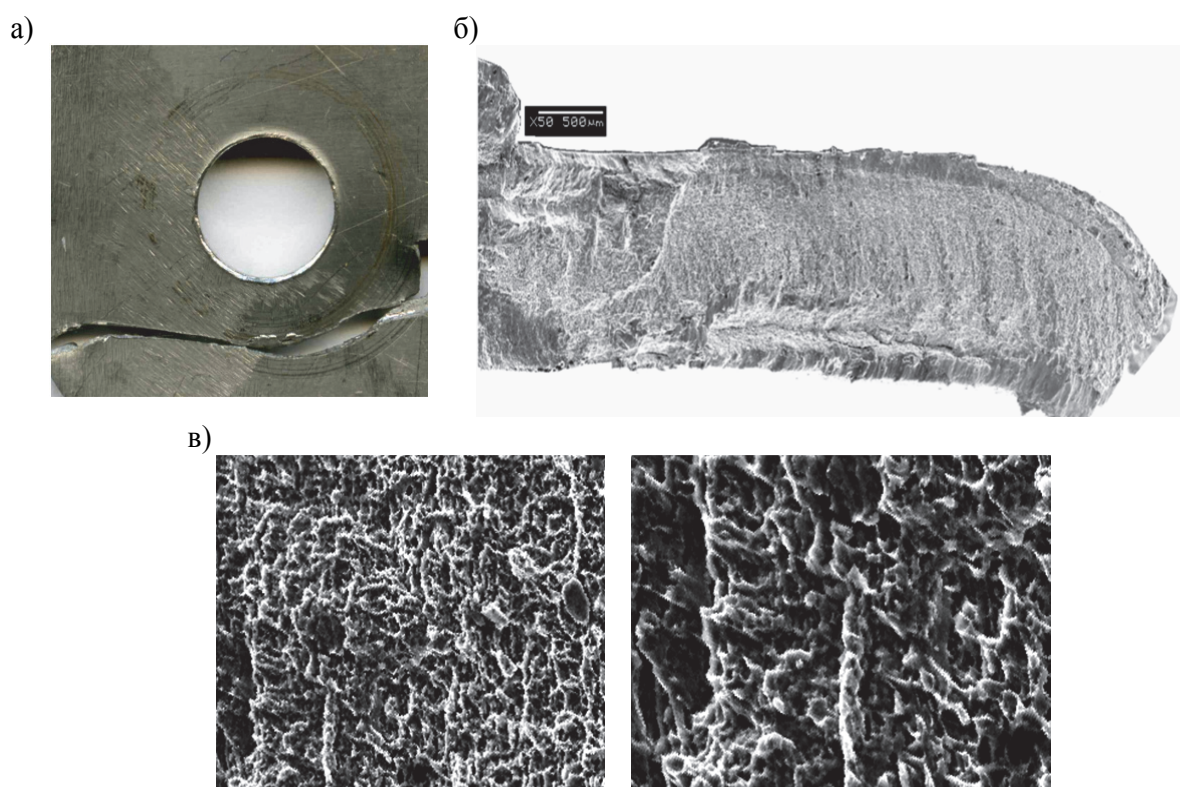


Рис. 4. Макроструктура зоны разрушения ТК8 и ТК5:

- а – следы контакта шайбы и развитие трещины по линии контакта шайбы;
- б – фрактограмма излома по месту разрушения (начало разрушения и смена направления разрушения); в – ячеистая структура излома и характерные ступеньки, остановки и развитие разрушения

Зарождение трещин происходило от местных поверхностных концентраторов напряжений (вмятины, риски, забоины и т.д.) на расстоянии порядка 2,5 мм от отверстий. Интересно, что более значительные концентраторы напряжений, расположенные на поверхности отверстий (заусенцы,

микротрещины), а также концентраторы, расположенные на расстоянии порядка 10 мм от места зарождения трещины (следы от ударного клейма, вмятины от крепёжных шайб), не оказали влияния на место зарождения трещины и послужили лишь местами остановки развития трещины. Развитие трещин происходило в основном по касательной к окружности, проходящей через точки крепления образца.

Анализ места и характера разрушения свидетельствует о том, что у всех образцов-имитаторов разрушение начинается в зоне максимальных напряжений: у мест жесткого крепления груза к образцу. Распространение разрушения происходит по большому кругу, точки крепления как бы ограничивают этот круг. Резонансная частота колебаний образца-имитатора к моменту остановки волны одного знака и появлению новой волны другого знака у зоны крепления, т.е. в этом месте происходит возвратно-поступательная смена знака напряжений при переходе «хлопуна» из выпуклого состояния в вогнутое, что вызывает максимум растягивающих напряжений. В точке крепления груза ТК8 (см. рис. 3) наблюдается кроме этого еще и максимум амплитуды колебаний (см. рис. 5).

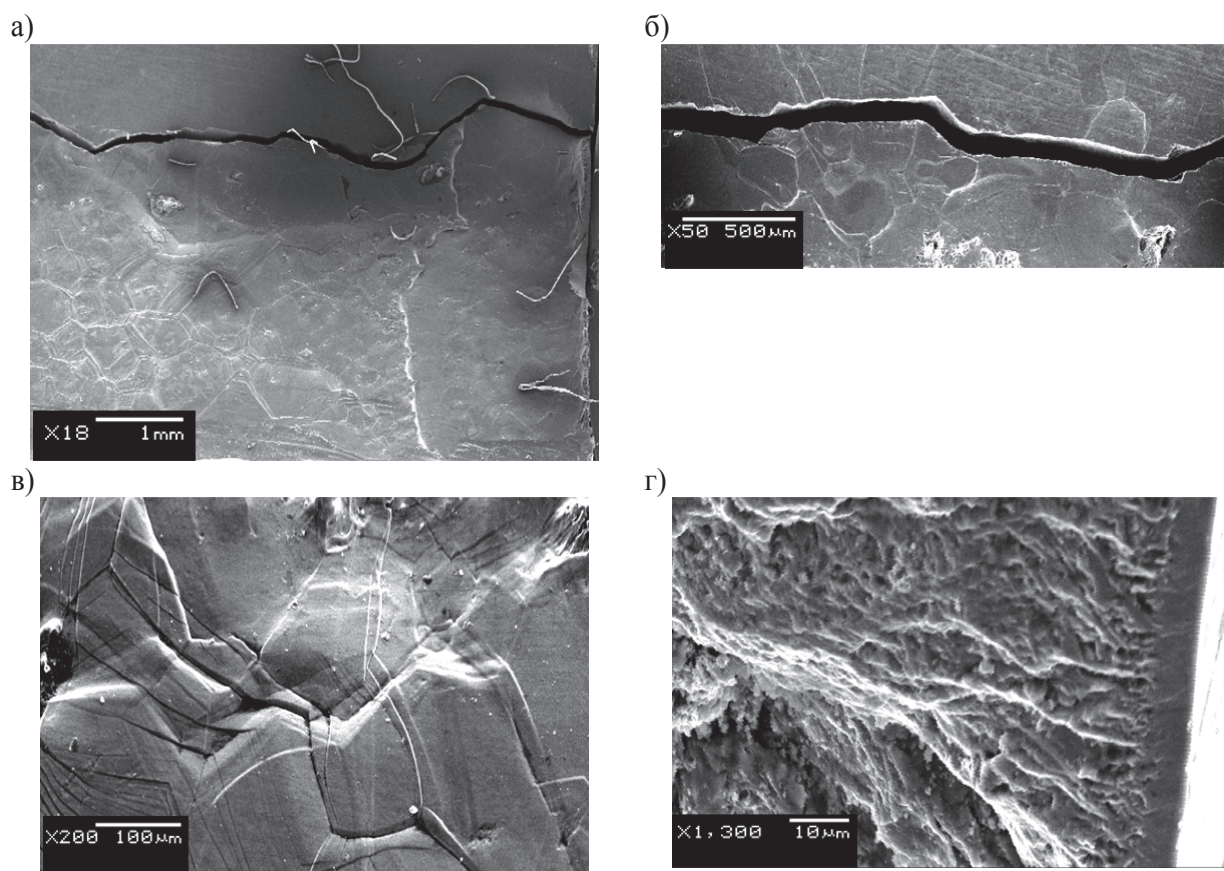


Рис. 5. Макроструктура зоны разрушения сварного шва в процессе виброиспытаний в точке крепления ТК8: а – начало разрушения от фрезерованной кромки с распространением по радиусу галтели; б – разрушение как по границам зерна, так и по зерну – транскристаллитное; в – двойникование в зерне и формирование микротрещин на стыке зерен; г – фрактограмма излома по месту разрушения: ступенчатый характер разрушения остановки и развитие разрушения

На всех образцах в точках крепления наблюдаются следы контакта шайбы с поверхностью образцов, но разрушение произошло только в ТК5 и ТК8 (см. рис. 3).

Подобное различие в образовании усталостных трещин можно объяснить исходя из следующего. В процессе виброиспытания, в различных точках образца-имитатора возникают области высокого уровня напряжений, близких к пределу текучести материала. По разному ведут себя эти

«области» в зоне жесткого крепления и в любой другой точке образца-имитатора из-за того, что в первом случае происходит жесткая остановка волны вибрации по сравнению со свободным перемещением ее в любой другой точке. При приближении волны вибрации к точке крепления уровень напряжений может превысить предел текучести материала и привести к появлению необратимой повреждаемости (скольжению, двойникованию), которая при достижении некоторого критического уровня плотности дефектов приводит к возникновению первоначальной поверхности трещины или очагу разрушения. Этим можно объяснить и тот факт, что первоначальная трещина усталости возникает не в месте максимального вмятия шайбы в материал образца-имитатора (см. рис. 2), а на некотором расстоянии от этого места, и дальнейшее распространение трещины идет уже по другой траектории.

Как видно из данных рис. 4-5, отсутствие следов пластической деформации в зоне появления макро- и микротрещин, сдвиговые процессы и двойникование в зерне и формирование микротрещин на стыке зерен – все это свидетельствует об усталостном разрушении образцов-имитаторов. Об этом свидетельствуют и результаты фрактографических исследований. Четко обнаруживаются зоны с фасеточным рельефом и смешанным фасеточным и ямочным рельефом, а также с зонами вытягивания на границе перехода от усталости к долому.

Таким образом, в зонах крепления образцов к вибростенду наблюдаются повышенные динамические знакопеременные напряжения, которые в сочетании с «жестким» креплением образца создают благоприятные условия для зарождения и развития усталостных трещин. Присутствие в указанных зонах поверхностных дефектов и других концентраторов напряжений значительно сокращает время до образования очага разрушения.

Исключение в этих зонах поверхностных дефектов, вызванных, например, концентраторами напряжений, порами в металле сварного шва, крупным зерном в ЗТВ, грубой механической обработкой и др., не оказывает влияния на характер и кинетику разрушения.

Приведенные исследования показали, что конструкции из титановых сплавов, изготовленные при применении газолазерного раскроя заготовок по оптимальным режимам в среде технического азота и последующей термической обработке по виброненадежности, не уступают конструкциям, изготовленным по традиционной технологии.

Учитывая вышесказанное, при расчёте и разработке технологии изготовления конструкций, эксплуатируемых в условиях вибрационных нагрузок, приоритетное внимание заслуживает вопрос исследования распределения напряжений и обеспечения в зонах повышенных напряжений (особенно в зонах «жестких» креплений) условий для надёжной и долговечной эксплуатации материала.

Выводы:

1. В процессе виброиспытаний в различных образцах-имитаторах возникают области высокого уровня напряжений, близких к пределу текучести материала, которые только в зоне жесткого крепления привели к появлению необратимой повреждаемости (скольжению, двойникованию), критическому уровню плотности дефектов и возникновению первоначальной поверхностной трещины в последующем к очагу разрушения.

2. Наличие высокого уровня напряжений, близкого к пределу текучести материала в точках, расположенных в зонах газолазерного раскроя кромок, сварки после газолазерного раскроя заготовок в процессе виброиспытаний к образованию очагов усталостного разрушения не привело.

3. Приведенные исследования показали, что конструкции из титановых сплавов, изготовленные при применении газолазерного раскроя заготовок по оптимальным режимам в среде технического азота и последующей термической обработке по виброненадежности, не уступают конструкциям, сделанным по традиционной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Испытания сварных натуральных образцов сплава ВТ-20 на вибропрочность / В. И. Муравьев, Р. А. Физулаков, В.П. Иванов, Е. Н. Новиков // «Авиация и космонавтика – 2005»: материалы 4-й Междунар. конф.; Москва, 10-11 октября 2005 г. – М.: Московский авиационный институт, 2005.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ
SCIENTIFIC LIFE

Виноградов С. В., Щелкунов Е. Б., Хрипкова В. А.
S. V. Vinogradov, Ye. B. Shchelkunov, V. A. Khripkova

БУДЕТ ЛИ ПРИЗНАН И ВОСТРЕБОВАН РОССИЙСКИЙ ЗНАК КАЧЕСТВА?

WILL RUSSIAN QUALITY MARK BE RECOGNIZED AND IN DEMAND?

Виноградов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский на Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Mr. Sergey V. Vinogradov – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Щелкунов Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский на Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

Mr. Yevgeny B. Shchelkunov – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Хрипкова Валерия Анатольевна – студент ФГБОУ ВО «Комсомольский на Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

Ms. Valeria A. Khripkova – a student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Аннотация. В условиях насыщения рынка товарами и услугами человек всегда сталкивается с проблемой выбора наилучшего. Особенно остро проблема выбора стала ощущаться, когда произошло расслоение сфер производства, в итоге появилась необходимость делегирования права выбора эксперта в данной области. В истории России, как и других стран, в момент формирования насыщенного рынка товаров появилась необходимость в идентификации производителей качественных товаров и услуг. Самым простым и доступным способом идентификации добросовестных производителей, товары которых прошли соответствующую процедуру оценки, стало использование геральдического знака в маркировке товара. В работе приведена краткая история использования Знака качества в России. Приведены правила, разработанные некоммерческой организацией «Роскачество» по отбору и оценке товаров, процедура подтверждения и регистрации права использования Знака качества. Проанализированы факторы, способствующие и препятствующие внедрению в повседневную практику маркировки наилучших товаров отечественного производства Знаком качества.

Summary. Nowadays the market is saturated with goods and services, people are always faced with the problem of selecting the best. The problem of choice became particularly acute when there was a separation of spheres of production. In the result, there was a need to delegate the right to choose an expert in this field. In the history of Russia, like in other countries, at the time of formation of a saturated market, there was a need to identify the manufacturer of high-quality goods and services. The easiest and most affordable way to identify honest manufacturers, whose products have passed the conformity assessment procedures, is the use of heraldic symbol in the goods description. The paper provides a brief history of quality marks in Russia. The article presents the rules developed by the non-profit organization "Roskachestvo" for the selection and evaluation of products, and the registration procedure of the right to use quality mark. The authors analyze factors promoting and impeding the introduction of the quality mark into the daily practice of marking the best domestic products.

Ключевые слова: Знак качества, геральдический символ, товар, услуга, производитель, экспертиза, Роскачество.

Key words: Quality mark, heraldic symbol, product, service, manufacturer, expertise, Roskachestvo.

УДК 676.012.43

В условиях насыщения рынка товарами и услугами человек всегда сталкивается с проблемой выбора наилучшего. Особенно остро проблема выбора стала ощущаться, когда произошло расслоение сфер производства, в итоге появилась необходимость делегирования права выбора эксперта в данной области.

Известен исторический факт, что в России для императорского дома Романовых поставлялся только наилучший товар, поэтому в 1824 г. купцов, поставивших товар, стали именовать «Поставщиками Двора Его Императорского Величества». Это звание было необходимо каждые два года подтверждать заново. В 1829 г. поставщики лучших товаров стали помещать на свои торговые щиты Государственный герб России. Этот период времени связывают с созданием рынка качественных товаров в России. В 1901 г. был утвержден графический знак для быстрой идентификации качественного товара (см. рис. 1).



Рис. 1. Знак качества России 1901 г.

В СССР в целях повышения эффективности производства и улучшения характеристик товаров 20 апреля 1967 г. был введен и регламентирован ГОСТ 1.9-67 знак качества. Знак качества применялся на всей территории Советского Союза во всех отраслях народного хозяйства. Аттестацию качества товаров в СССР производили уполномоченные Государственные комиссии, и только после этого по результатам аттестации принималось решение о праве использования производителем данного клейма. История нанесения клейма началась 22 апреля 1970 г. с электродвигателей, производимых на электромеханическом заводе в Москве [1].

Знак качества СССР (см. рис. 2) представляет собой видоизмененное изображение пятиконечной звезды – геральдического символа СССР. В эту фигуру вставлена буква «К», имеющая поворот на 90°. Она означает «Качество».

Клеймо наносилось на продукцию, упаковку, тару, этикетки и ярлыки, а также на документацию, сопровождающую товар.

Государственным стандартом регламентировались правила изображения знака на этикетках и упаковке товаров, право на нанесение присваивалось на срок до трех лет после аттестационной процедуры.

В 80-е гг. некоторые товары, отправляемые на экспорт, стали маркироваться слоганом «Made in USSR».

В 1991 г. произошел распад Советского Союза и возникла необходимость разработки новой системы стандартов. В то время появились такие национальные знаки качества, как «Народная марка», «Золотая марка», «Всероссийская марка качества» и некоторые другие, но они не стали популярными и не давали должного результата.



Рис. 2. Знак качества СССР

В современной России возрождение знака качества – ностальгия советского бренда. Знак качества должен еще стать технологией рекламы отечественных продуктов и товаров для того, чтобы укрепить доверие покупателей к российским товарам.

В 2014 г. Минпромторгом был объявлен конкурс по созданию знака качества, в котором приняли участие 484 проекта практически из всех регионов России.

Член оргкомитета конкурса, заместитель министра промышленности и торговли Виктор Евтухов кратко охарактеризовал результаты конкурса следующим образом: «Все представленные знаки выполнены на высоком уровне. Так, многие обыгрывают кириллическую букву «К» («качество») или латинскую Q («Quality»). Некоторые номинанты придумали логотип, взяв за основу узнаваемый знак качества СССР. Есть изображения, которые отсылают нас к знакомой символике – кремлевской звезде; не обошлось, конечно, и без изображения медведя. Есть работы, которые принципиально по-новому трактуют знак: например, «флаг качества» [1].



Рис. 3. Знак качества 2014 г.

Победу одержало изображение знака качества, представляющее собой знак в пятиугольнике – работа Дмитрия Мордвинцева (см. рис. 3) [2].

Как будет работать знак качества – вопрос непростой, но Минпромторг заверяет, что на себестоимости продукции это не скажется. Будет ли доверять рядовой покупатель продукции со знаком качества, судить трудно.

Весной этого года по инициативе правительства была создана некоммерческая организация Роскачество. Эта организация будет проводить добровольную сертификацию продукции на соответствие знаку качества. Их стратегия такова – к 2020 г. 20 % продаваемых в России товаров будут иметь национальный знак качества, а продажи такой продукции с учетом индекса потребительских цен должны увеличиться на 3 % в год, а к 2020 году достигнуть 5 %.

Процедура оценки исследуемых товаров, разработанная «Роскачество» заключается в следующем: эксперты приобретают образцы продукции, после чего образцы для чистоты эксперимента обезличивают и передают в аккредитованные лаборатории. Результаты исследований с помощью средств массовой информации доводятся до потребителей. Вся процедура получения Знака качества, включая сертификацию продукции, полностью бесплатна для производителей.

Для сохранения престижности знака, как это было в СССР, «Роскачество» планирует ограничить срок действия права маркировки товара «Знаком качества» в зависимости от категории товара на период в 2 – 3 года.

Согласно процедуре, разработанной «Роскачество», получение знака качества будет происходить в пять этапов [3]:

- 1) всерное исследование товаров в категории – 24 дня;
- 2) обработка протоколов исследования, оценка соответствия товаров стандартам – 10 дней;
- 3) публичная оферта – предложение о прохождении процедуры добровольной сертификации – 10 дней;
- 4) оценка производства – 14 дней;
- 5) получение российского Знака качества

Данная система позволяет надеяться, что знак качества будет работать, а производитель для того, чтобы подтвердить знак качества на своей продукции, постарается сохранить соответствующий уровень качества, и покупатель будет уверен в том, что качество продукции ему гарантировано.

Факт существования знака качества подтвержден, но как его будут использовать – пока не известно. Не известно также, будет ли в дальнейшем бесплатным его присвоение.

Заключение

В заключении можно отметить, что государственный знак качества официально вернулся в Россию, и практика отбора товаров будет отличаться от практики отбора времен СССР.

Компании, имеющие знак качества, должны стремиться гарантировать это качество и держать его на высоком уровне, и главным должно стать именно качество, а не цена. Поэтому перед производителями возникнет непростая дилемма: качественный продукт может стоить недешево. С другой стороны, победить на рынке, снизив цену – это значит производить не совсем качественный продукт, т.е. продукцию без «знака качества». Иностранцы же партнеры будут обращать внимание на наличие знака качества при заключении сделок на поставки российской продукции, что повышает имидж нашей страны.

Возвращение «Знака качества» – это правильная и своевременная идея. В борьбе за знак на упаковке местные производители перестанут экономить на компонентах, и снижение себестоимости не отразится на свойствах товара. Покупатели перестанут покупать некачественный продукт, недобросовестные производители уйдут, не выдержав конкуренции. Это значит, что возрождение советской схемы приведет к урегулированию рынка.

Сама по себе инициатива Минпромторга хорошая, но станет ли она хорошим делом, и будет ли востребован товар с новым логотипом гражданами России? На эти вопросы ответ даст время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Знак качества СССР на товарах и его история [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fb.ru/article/139573/znak-kachestva-sssr-na-tovarah-i-ego-istoriya> (дата обращения: 20.09.2016).
2. В Россию возвращается качество? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.biznes33.ru/news/business/v-rossiyu-vozvraschaetsya-kachestvo> (дата обращения: 20.09.2016).
3. Российский Знак качества, как получить государственный Знак качества товара [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://roskachestvo.gov.ru/sign> (дата обращения: 20.09.2016).