

Вячеслав Иванович Шпорт**Vyacheslav I. Shport****ИНЖЕНЕР В СОВРЕМЕННОМ****ОБЩЕСТВЕ****ENGINEERING IN MODERN SOCIETY**

Шпорт Вячеслав Иванович — доктор технических наук, губернатор Хабаровского края.
E-mail: Gover@Adm.khb.ru

Vyacheslav I. Shport — Doctor in Engineering, Governor of Khabarovsk Region. E-mail: Gover@Adm.khb.ru

В 2009 году по данным социологии из шести миллионов студентов почти треть были будущие экономисты и управленцы, почти миллион — студенты других гуманитарных специальностей. Сегодня ясно, что такой подход не оправдал себя, так как ученые и инженеры создают лучшие условия жизни для людей. Нынешняя система взаимодействующих факторов должна способствовать мышлению, охватывающему научно-техническую область развития по схеме «наука — инженер — промышленность», где в центре находится инженер.

In 2009, according to statistical data, nearly a third of the 6 million university students were studying economics and business administration, another million were striving to get their degrees in other humanitarian subjects. Today it can be said that such an approach has proved impractical because it is scientists and engineers who make people's lives better and more comfortable. The existing system of interacting factors should facilitate a way of thinking in the research&engineering field that would be based upon a triad «research — engineer — industry» with an engineer in the center of it.

Ключевые слова: студент, экономист, система, фактор, мышление, «наука — инженер — промышленность».

Keywords: student, economist, system, factor, thinking, research – engineer – industry.

С переходом государства на рельсы рыночной экономики, который начался почти два десятка лет назад, рыночный механизм потребовал большого количества экономистов, юристов, менеджеров, пиарщиков, психологов.

Через два десятка лет инерция сохраняется. Молодежь по-прежнему идет учиться на эти специальности, хотя существующее ранжирование студентов по группам специальностей давно требует определенного пересмотра.

В 2009 году по данным социологии из шести миллионов студентов почти треть были будущие экономисты и управленцы, почти миллион — студенты дру-

гих гуманитарных специальностей. При этом, например, будущих приборостроителей сейчас в России не более пятидесяти тысяч человек.

Сегодня ясно, что такой подход не оправдал себя, так как ученые и инженеры создают лучшие условия жизни для людей, а нынешняя система взаимодействующих факторов, более чем когда-либо раньше, должна способствовать мышлению, охватывающему научно-техническую область развития по схеме «наука-инженер-промышленность», где в центре находится инженер.

Именно такая хорошо взаимоувязанная единая схема позволит динамично развиваться науке и промышленности Дальнего Востока, в частности Комсомольску-на-Амуре.

Речь идет, по сути, о необходимости увеличения специалистов инженеров, а также инженерного образования, в том числе для квалифицированных рабочих, так как на некоторых станках, стоимость которых достигает сотен тысяч и миллионов долларов, могут работать только квалифицированные операторы.

К счастью, сегодня ситуация развернулась в другую сторону. Хотя осознание проблемы пришло гораздо раньше, но на практике ситуация начала меняться недавно.

Общество поняло необходимость повышения престижа труда инженеров и развития инженерной мысли.

Необходимо поддерживать постоянную связь между учеными, инженерами, промышленниками, а также между ними и общественностью. Это происходит сейчас не совсем конструктивно, зачастую возникают конфликты.

Политика здесь играет важную роль. Являясь представителями и ответственными лицами общества, политики определяют желаемые и нежелательные последствия применения технологий и гарантируют, что соответствующие законы и инструкции будут выполняться.

Развитие науки и техники — это процесс перманентный, который невозможно ни затормозить, ни, тем более, остановить.

Сегодня нет человека и общества вне «техносферы», техника исторична, не стоит на месте, совершенствуется, обновляется. Она стремительно движется к полностью автоматизированным, компьютеризованным системам, роботам.

Относиться к этому можно по-разному. Технику можно любить, боготворить, ненавидеть. Технофобия — не открытие наших дней. В Древнем Китае были ортодоксы, которые носили воду из реки в бадье и не пользовались никакими механическими приспособлениями, которые на тот период уже существовали. А объясняли свои действия тем, что, используя технику, попадаешь от нее в зависимость и утрачиваешь свободу действий.

Зависимость человека от техники, так же как и проблема ответственности ученых и инженеров — это отдельные темы, над которыми я много думал и которых, возможно, коснусь в следующих публикациях. Тема, заявленная сегодня, более прикладная и прагматичная.

Технические инновации выступают как катализатор, импульс коренных изменений во всей систе-

Вячеслав Иванович Шпорт ИНЖЕНЕР В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ

ме человеческой жизни. И без квалифицированных инженеров, техников здесь никак не обойтись. Это — кадровый фундамент страны. Рассуждать о потребности в фундаменте излишне.

Сегодня наоборот мы видим возрождение профессии.

Хотя в период перестройки вместе с неэффективными производствами серьезно пострадала база многих ведущих отраслей страны. Взять, к примеру, оборонную отрасль. Предприятия оборонной промышленности, всегда отличавшиеся своим высокотехнологичным производством, вынуждены были перепрофилироваться на выпуск посуды, бритв, щеток, посудомоечных машин и прочих несложных товаров народного потребления.

Целые отрасли подверглись серьезной деформации, и ни о каком престиже инженерной профессии речи быть не могло. В чести стали буржуазные ценности, в обществе начала формироваться мода на определенные специальности. Молодежь, как указывалось выше, двинулась учиться на юристов, экономистов, пиарщиков, менеджеров, дизайнеров, психологов. Вузы с удовольствием принялись выполнять социальные заказы, которые действуют в обществе наравне с рыночными механизмами.

В результате получится явный перебор. Обществу не нужно столько юристов и экономистов, а уж тем более менеджеров. Я никогда не понимал, как можно стать, например, хорошим экономистом без базового инженерного образования в той области, где ты работаешь.

Что касается профессии менеджер, то многие абитуриенты, поступая учиться на этот факультет, вообще очень слабо представляют себе, чем будут заниматься.

Если отталкиваться от определения менеджмента как «управление производством, совокупность принципов, методов, средств и форм управления производством с целью повышения эффективности производства и его прибыльности», то доверить выпускнику факультета менеджмента руководить не только крупным производством, а даже небольшим цехом или строительным объектом — невозможно. Опять приходим к необходимости иметь базовое инженерное образование.

Хотя не так давно практика назначения на управленческие должности мастеров делать деньги (тех же менеджеров) существовала. Может где-то существует и сегодня. Но в большинстве все же возобладала здравая мысль, о том, что никакой менеджер, не являющийся квалифицированным инженером с опытом работы по специальности, не должен попадать в руководители. В противном случае современная жизнь будет все чаще сотрясаться техногенными катастрофами нарастающих масштабов.

Промышленность в России только-только возрождается. Мы едва начали выкарабкиваться из ямы, когда вся промышленность страны находилась в жутком застое и разрухе. Поступательное движение немного прервал кризис. Хотя возможно, что он оказал и свое положительное действие. Недаром в китайском языке слово «кризис» обозначается двумя иероглифами — «опасность» и «возможность».

Возрождающаяся промышленность требует целой армии квалифицированных инженеров. Не мерчен-

дайзеров и психологов, при всем уважении к этим профессиям. Их-то как раз достаточно. Поэтому у нашей с вами профессии большое будущее и серьезные перспективы.

Если конкретно говорить про Дальний Восток, про Хабаровский край, то он вообще объявлен национальным приоритетом страны. Если почитать программу развития Дальнего Востока до 2013 года, можно увидеть, какие глобальные проекты планируются осуществить здесь. Все они потребуют квалифицированных рабочих, техников, инженеров.

Сомнений в том, что инженерные кадры будут востребованы, нет. И престиж этой профессии будет расти. Потому что любое открытие от колеса и простейшего рычага до самолета «Суперджет—100» или фантастического коллаидера — плод инженерной мысли. Именно инженер своей деятельностью преобразовывает мир, переделывает его под нужды человечества, делает более интересным и комфортным, более приспособленным для жизни. И совершенно напрасно профессию инженера относят исключительно к техническому роду деятельности. Потому что труд инженера — не что иное, как творчество, искусство.

Писатель откладывает в сторону рукопись, актер уходит со сцены, режиссер кричит: «...снято!» — но материальный мир после этих действий остается прежним. Когда же занавес опускается за инженером — мир становится иным, богаче на одно или несколько изобретений, которые заметно меняют жизнь. Кроме того, людей нашей профессии отличает умение искать и находить новые нестандартные решения, стремление претворить их в жизнь.

Профессионализм инженера сочетается с самостоятельностью мысли, ответственностью, стремлением к постоянному самообразованию, предприимчивостью.

Нет перспектив у общества без инженерной мысли, без уважительного отношения общества к труду инженера. Это прекрасно понимает и высшее руководство страны. Президент России Дмитрий Медведев хочет, чтобы престиж профессии инженера в России повысился. Выступая в Санкт-Петербурге, он заявил: «В 1990-е произошло переориентирование, в результате которого престиж инженерного образования упал. Чтобы профессия инженера была популярной, нужно создавать современные производства и платить достойную зарплату. Никакими заклинаниями этого не добиться».

Очень простая и верная мысль. О престиже, долге и прочем можно говорить бесконечно, но лучшим подтверждением важности и значимости профессии станет достойная оплата. И я очень рад, что дело сдвинулось с мертвой точки, что зарплата инженера перестала быть поводом для шуток и анекдотов.

Тем более что заявленная недавно программа модернизации и инноваций выдвигает на передний план именно инженеров. Какая же без нас модернизация — так, одни слова.

Поздравляю Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет с изданием первого номера научного издания «Учёные записки КНАГТУ».

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATHEMATICS AND MECHANICSГнедин П. А., Дубровский И. Н.
P.A.Gnedin, I.N.Dubrovsky

01.02.01

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ
В КОМПЛЕКСНЫХ ВЕЛИЧИНАХ**
**MATHEMATICAL DESCRIPTION BY COMPLEX VALUES OF AN ASYNCHRONOUS
MACHINE**

Гнедин Павел Александрович — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: keapu@knastu.ru.

Pavel A. Gnedin — PhD in Engineering, senior lecture at the Department of Electro drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: keapu@knastu.ru.



Дубровский Игорь Николаевич — аспирант кафедры электромеханики, старший преподаватель военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: kem@knastu.ru.

Igor N. Dubrovsky —

PhD Candidate, Department of Electro mechanics, senior lecturer at the Military Department of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация: Получена система уравнений в комплексных величинах, описывающая переходные процессы в асинхронных машинах, статорные величины которой записаны в осях α , β , а роторные — в осях d , q . С помощью программного комплекса MatLab рассчитаны графики переходных процессов.

Summary: Presented is a system of complex-value equations describing transient processes in asynchronous machines, whose stator values are written on axes α , β , and rotor values – on axes d , q . Using Matlab software, diagrams of the transient processes have been calculated.

Ключевые слова: Асинхронная машина, комплексные величины, переходные процессы.

Keywords: asynchronous machine, complex values, transient processes.

В настоящее время большинство математических программных систем и пакетов программ, предназначенных для автоматизации математических расчетов, позволяют при решении систем дифферен-

циальных и алгебраических уравнений численными методами использовать комплексные числа. В связи с этим открывается возможность перейти от классического описания асинхронной машины, когда записывается два уравнения: отдельно для вещественной и комплексной осей, к написанию одного уравнения с использованием комплексных чисел. Данный подход позволяет также в одной системе дифференциальных и алгебраических уравнений использовать одновременно переменные в различных осях: статорные величины в осях α , β , а роторные в осях d , q .

Запишем систему дифференциальных и алгебраических уравнений в комплексных величинах, описывающую переходные процессы в асинхронных машинах с помощью работы [1].

Уравнение для напряжений статора в комплексной плоскости α , β (в [1,824] формула 69-31):

$$\tilde{U}_{1(\alpha,\beta)} = R_1 \cdot \tilde{I}_{1(\alpha,\beta)} + \frac{d\tilde{\Psi}_{1(\alpha,\beta)}}{dt} \quad (1)$$

Материал поступил 02. 02. 2010 г.

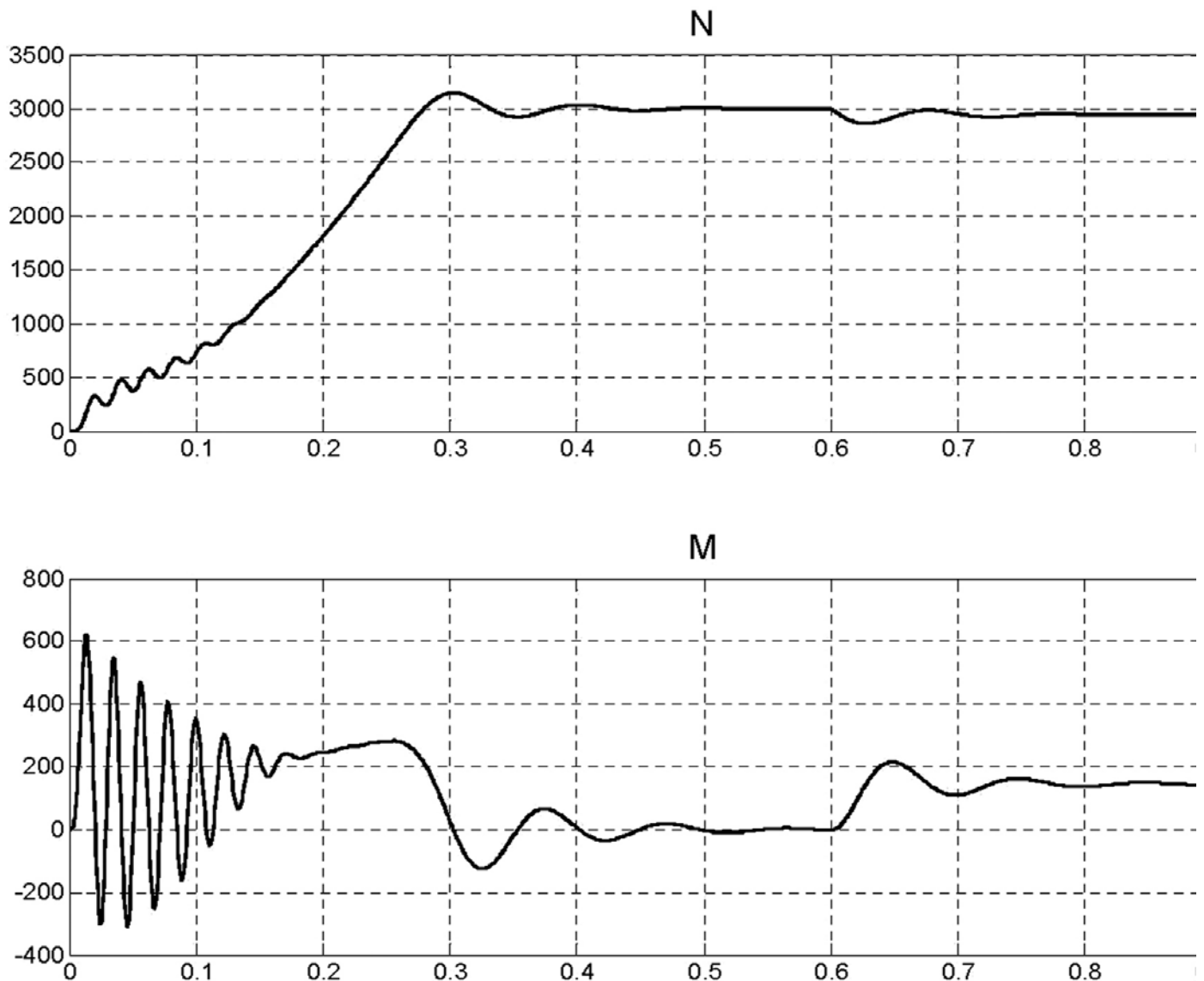


Рис. 1. Графики переходных процессов для частоты вращения вала и электромагнитного момента в режиме пуска и наброса нагрузки

Уравнение для напряжений ротора в комплексной плоскости d, q (в [1,825] формула 69-32):

$$\vec{U}_{2(d,q)} = R_2 \cdot \vec{I}_{2(d,q)} + \frac{d\vec{\Psi}_{2(d,q)}}{dt} \quad (2)$$

Результирующая комплексная функция потокосцепления статора, выражается через результирующие комплексные функции токов статора и ротора (в [1,824] формула 69-29):

$$\vec{\Psi}_{1(\alpha,\beta)} = L_1 \cdot \vec{I}_{1(\alpha,\beta)} + L_{12m} \cdot \vec{I}_{2(d,q)} \cdot e^{j\alpha} \quad (3)$$

где $\alpha = p \cdot \gamma$ — угол между осями α, β и d, q;

p — число пар полюсов;
 γ — угол между осями фаз A и a.

Результирующая комплексная функция потокосцепления ротора, выражается через результирующие комплексные функции токов статора и ротора (в [1,824] формула 69-30):

$$\vec{\Psi}_{2(d,q)} = L_2 \cdot \vec{I}_{2(d,q)} + L_{12m} \cdot \vec{I}_{1(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\alpha} \quad (4)$$

Электромагнитный момент рассчитывается по формулам (в [1,829] формулы 69-44 и 69-45):

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \text{Im}(\vec{\Psi}_{1(\alpha,\beta)} \cdot \vec{I}_{1(\alpha,\beta)}^*) = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \text{Im}(\vec{\Psi}_{2(d,q)} \cdot \vec{I}_{2(d,q)}^*) \quad (5)$$

Уравнение движения ротора (в [1,816] формула 69-11):

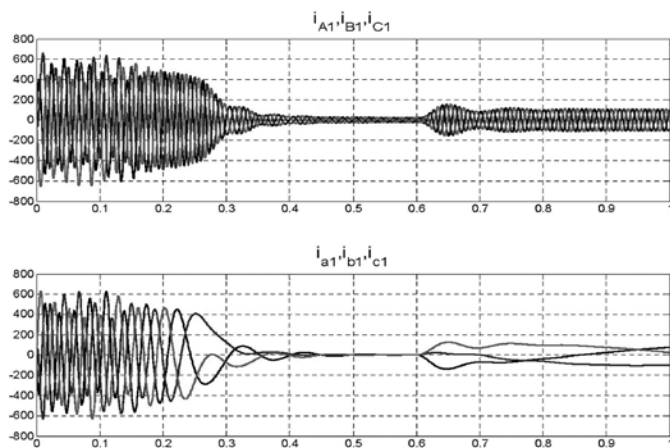


Рис. 2. Графики переходных процессов для токов статора и ротора в режиме пуска и наброса нагрузки

$$M + M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

Искомую систему уравнений можно записать, выразив производные потокосцеплений из (1) и (2), токи из (3) и (4) и производную скорости из (6):

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\psi}_{1(\alpha,\beta)}}{dt} = \tilde{U}_{1(\alpha,\beta)} - R_1 \cdot \tilde{I}_{1(\alpha,\beta)} \\ \frac{d\tilde{\psi}_{2(d,q)}}{dt} = \tilde{U}_{2(d,q)} - R_2 \cdot \tilde{I}_{2(d,q)} \\ \tilde{I}_{1(\alpha,\beta)} = \frac{\tilde{\psi}_{1(\alpha,\beta)} \cdot L_2 - \tilde{\psi}_{2(d,q)} \cdot L_{12m} \cdot e^{j\gamma}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12m}^2} \\ \tilde{I}_{2(d,q)} = \frac{\tilde{\psi}_{2(d,q)} \cdot L_1 - \tilde{\psi}_{1(\alpha,\beta)} \cdot L_{12m} \cdot e^{-j\gamma}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12m}^2} \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \text{Im}(\tilde{\psi}_{1(\alpha,\beta)}^* \cdot \tilde{I}_{1(\alpha,\beta)}) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M + M_c}{J} \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, мы имеем систему уравнений, состоящую из семи уравнений, в которой представле-

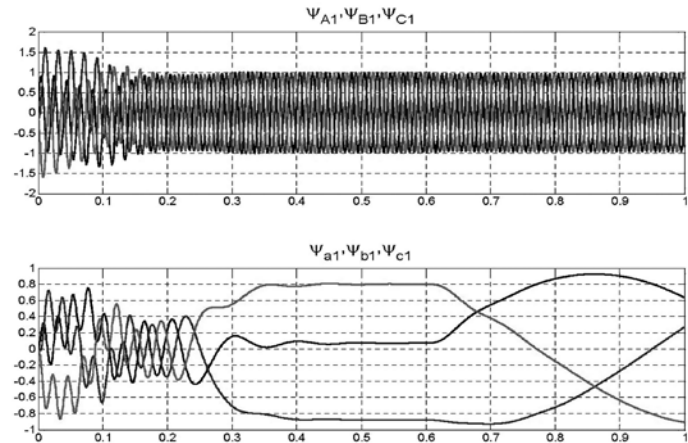


Рис. 3. Графики переходных процессов для потокосцеплений статора и ротора в режиме пуска и наброса нагрузки

ны все электрические и механические переменные. Статорные величины записаны здесь в осях α, β , а роторные — в осях d, q .

Выражение фазных величин через результирующие комплексные функции также представлено в работе [1,820]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix} = \text{Re} \left[\tilde{I}_{1(\alpha,\beta)} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{4\pi}{3}} \\ e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \right] \\ \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = \text{Re} \left[\tilde{I}_{2(d,q)} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{4\pi}{3}} \\ e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \right] \end{cases} \quad (8)$$

На рис. 1-3 представлены графики переходных процессов, полученные при решении системы уравнений (7) с помощью программы MatLab для асинхронного двигателя с номинальными данными: $P_n=45$ кВт, КПД=91%, $\cos\varphi=0.9$, $n_n=2946$ об /мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980. — 928 с., ил.

Феоктистов С. И., Белых С. В., Станкевич А. В., Кривенок А. А., Первалов А. А.

05.07.02

S.I.Feoktistov, S.V.Belov, A.V.Stankevitch, A.A.Krivenok, A.A.Perevalov

АППРОКСИМАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КОНТУРА ДУГАМИ ПРИ КОНТРОЛЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ APPROXIMATION OF CONTOUR GEOMETRY BY CURVES WHILE CONTROLLING THE ACCURACY OF MANUFACTURE OF PARTS AND COMPONENTS FOR AIRBORN DEVICES



Феоктистов Сергей Иванович — доктор технических наук, профессор, декан ССФ
Sergey I. Feoktistov — Doctor in Engineering, Professor



Кривенок Антон Александрович — программист ОАО «КНААПО»
Anton A. Krivenok — programmer, JSC «КнаАПО»



Белых Сергей Викторович — кандидат технических наук, доцент
Sergey V. Belykh — PhD in Engineering, Associate Professor, E-mail: belykh.sergey@mail.ru



Первалов Анатолий Анатольевич — аспирант
Anatoly A. Perevalov — PhD candidate



Станкевич Антон Владиславович — начальник научно-производственной лаборатории технологических процессов ОАО «КНААПО»
Anton V. Stankevitch — Head of Research and Production Lab for Manufacturing Processes, JSC «КнаАПО»

Аннотация: Рассмотрены проблемы контроля деталей авиационного назначения, получаемых методами гибки. Обосновано применение аппроксимации дугами набора точек, полученных в результате контроля с использованием. Дано решение для определения дуги, проходящей через набор точек с различными граничными условиями. Приведена оценка влияния граничных условий аппроксимации на точность получаемой кривой.

Summary: The problems of accuracy control for aviation technology parts and components produced by

forming/bending are looked into. Approximation by curves of a set of points acquired as the result of accuracy control using... was proven. A solution for the task of determining a curve going through a set of points with different boundary conditions is provided. Estimation of the impact of the boundary conditions of approximation upon the accuracy of the resulting curve is carried out.

Ключевые слова: аппроксимация, геометрия контура, дуга.

Keywords: approximation, contour geometry, curve.

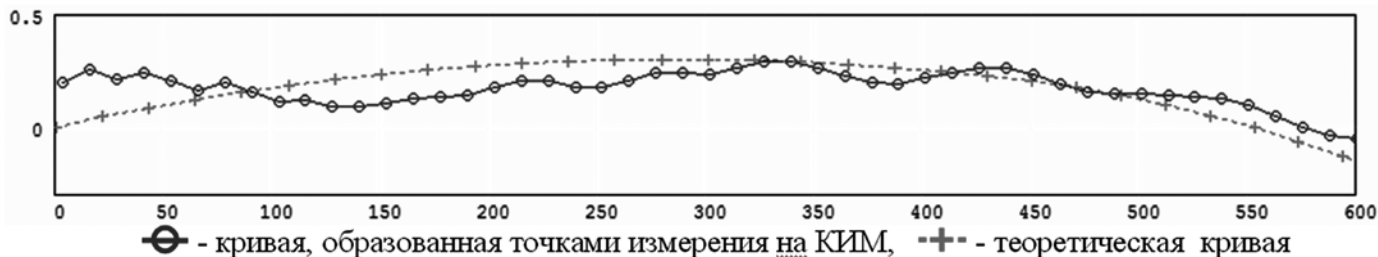


Рис. 1. Начальный участок плоских кривых, полученных функциональным и экспериментальным путем

Жесткая конкуренция на рынке авиационной продукции требует от производителей сокращения сроков производства, снижения стоимости изготовления продукции при повышении качества деталей. Решение этих противоречивых задач возможно при автоматизации технологических процессов и сокращении цепочки технологической увязки элементов планера. Уход от жестких носителей форм и размеров (плазы, шаблоны, эталоны и т.д.) и внедрение систем электронного описания изделия требует пересмотра всей цепочки технологии изготовления и контроля деталей самолета.

В конструкции летательных аппаратов широко применяются детали, при изготовлении которых используются операции холодной штамповки. Разброс механических и геометрических характеристик заготовок от партии к партии может сильно сказываться на процессе деформирования и соответственно влиять на точность готовых деталей. Эта особенность значительно затрудняет процесс автоматизации данного вида производства, требуя введения трудоемких операций ручной доводки деталей ЛА до полного прилегания к контрольной оснастке. В связи с этим на ОАО «КНААПО» отработывается методика корректировки управляющих программ для гибочного станка с ЧПУ по результатам измерения геометрии первой детали в партии.

В процессе контроля геометрии готовой детали современные контрольно-измерительные машины (КИМ) позволяют получить облако точек обмера, и, расположив в нем электронную модель детали, можно сделать вывод, насколько соответствует или не соответствует готовая деталь ее электронной модели. Однако для корректировки управляющих программ необходимо оперировать значениями радиусов кривизн на определенных участках. Для определения формы кривой, проходящей через набор точек, используются различные методы аппроксимации. Ряд исследований, проведенных в этой области, показывают на то, что наиболее точно такую кривую можно описать, используя b-сплайны. При этом следует учитывать, что в процессе изготовления и контроля детали накапливается погрешность и на участке детали с условно постоянным радиусом контрольные точки замера на КИМ могут иметь некоторый разброс, что соответственно приведет к получению локальных значений кривизн в некоторых точках, значительно отличающихся от ожидаемых, а в некоторых местах будем иметь кривизну противоположного знака (см. рис. 1). Принимая во внимание тот факт, что управле-

ние ЧПУ ведется дискретно, а при расчете используется значение требуемого радиуса изгиба, то можно говорить о необходимости применения аппроксимации в виде дуг для оценки кривизны детали.

Предположим, что нам необходимо изготовить некоторую деталь, контур которой можно разделить на конечное число участков с условно постоянным радиусом. К числу таких деталей ЛА можно отнести шпангоуты, стрингеры и т.д. Задачей контроля готовой детали является определение значения радиуса дуги на каждом участке.

Определение кривизны

Определение радиусов кривизны контура во всех расчетных точках можно решить, заменяя радиусы кривизны расчетного контура радиусами окружностей, проходящих через каждые три точки этого контура.

Математическая модель этой операции реализуется простыми зависимостями, получаемыми на основе решения системы уравнений окружности, проходящей через три точки (рис. 2):

$$\begin{cases} (X_c - x_{i-1})^2 + (Y_c - y_{i-1})^2 = R^2, \\ (X_c - x_i)^2 + (Y_c - y_i)^2 = R^2, \\ (X_c - x_{i+1})^2 + (Y_c - y_{i+1})^2 = R^2. \end{cases}$$

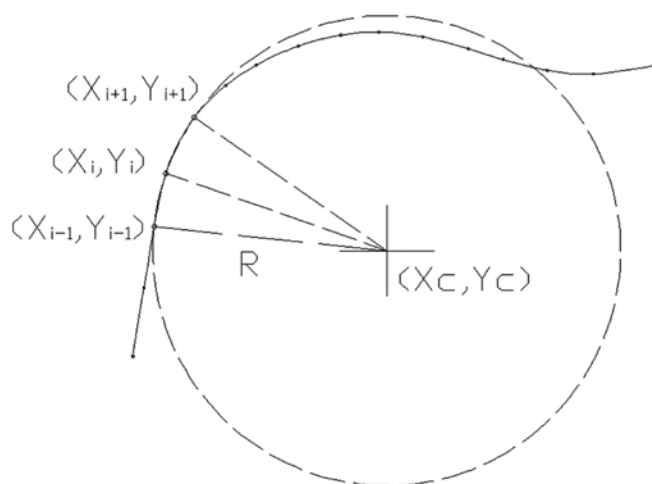


Рис. 2. Схема определения радиуса кривизны в точках рабочего контура

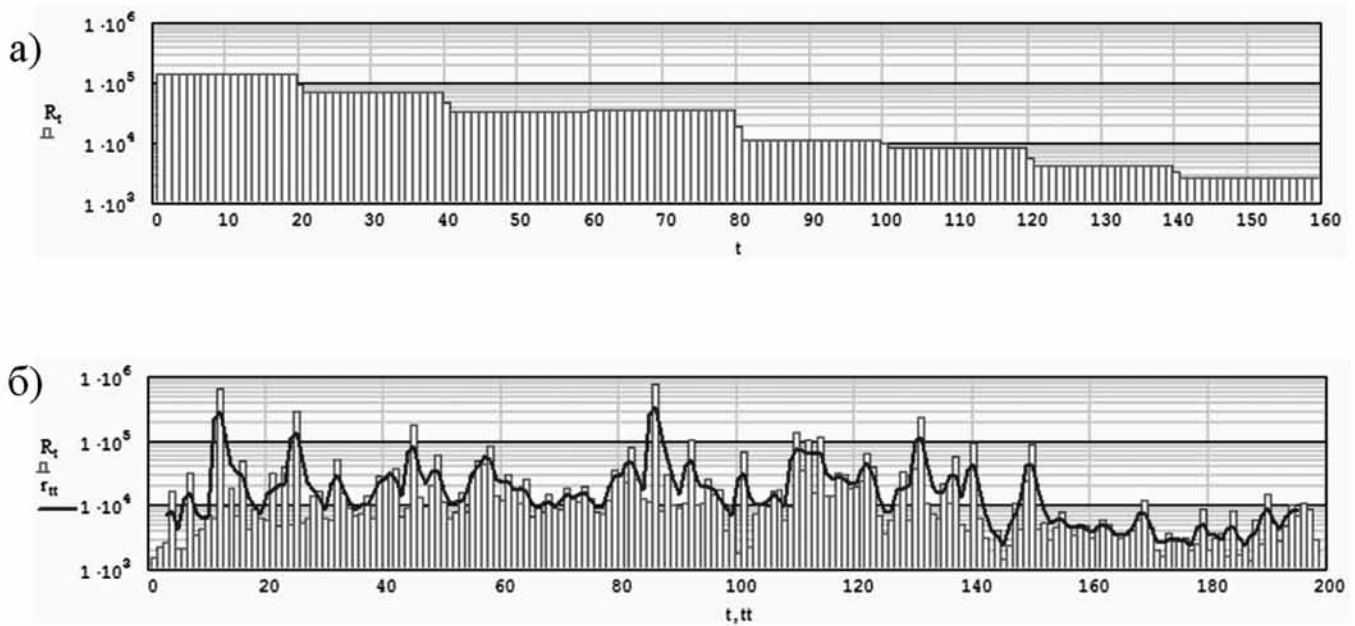


Рис. 3. Радиусы кривизны рассматриваемых контуров
 а — функционально рассчитанная кривая
 б — экспериментальная кривая с усреднением радиусов

$$\begin{cases} (X_c - x_i)^2 + (Y_c - y_i)^2 = (X_c - x_{i-1})^2 + (Y_c - y_{i-1})^2, \\ (X_c - x_i)^2 + (Y_c - y_i)^2 = (X_c - x_{i+1})^2 + (Y_c - y_{i+1})^2. \end{cases}$$

Для трех последовательных точек контура $i-1, i, i+1$ эта система имеет единственное решение в виде:

$$X_c = \frac{(x_{i-1} - x_i)(y_i^2 - y_{i+1}^2 + x_i^2 - x_i^2) + (x_i - x_{i+1})(x_i^2 - x_{i-1}^2 + y_i^2 - y_{i-1}^2)}{2[(x_i - x_{i+1})(y_{i-1} - y_i) - (x_{i-1} - x_i)(y_i - y_{i+1})]},$$

$$Y_c = \frac{x_i^2 - x_{i-1}^2 + y_i^2 - y_{i-1}^2 - 2X_c(y_{i-1} - y_i)}{2(x_{i-1} - x_i)},$$

$$R = \sqrt{(X_c - x_i)^2 + (Y_c - y_i)^2},$$

где x_i, y_i — координаты точек кривой, R — расчетный радиус кривизны в точках.

Используя полученные формулы, рассчитаем кривизну в каждой точке теоретической кривой и кривой, образованной точками измерения. На рисунке 3 хорошо видно, что радиусы кривизны рассчитанного контура точно совпали с заданными значениями. По радиусам кривой, образованной точками измерения, невозможно точно определить, какую кривизну имеют дуги этого контура, откуда следует, что даже при незначительных погрешностях, находящихся в пределах допуска, в измерении контура детали, результаты становятся непригодны для обработки.

Практика показала, что усреднение кривизны с различными количествами показаний не приводит к сколько-нибудь адекватному результату. Поэтому наиболее очевидным решением в данной ситуации является аппроксимация данных экспериментальной

геометрии некоторой дугой, лежащей в пределах контрольных точек.

Аппроксимация дугой окружности

Задача аппроксимации состоит в нахождении аналитического описания кривой, проходящей вблизи опорных точек. Базовыми элементами аппроксимирующих функций являются полиномы различных степеней, но в нашем случае, для оценки кривизн, наибольший интерес представляет аппроксимация дугой окружности.

Пусть имеется массив точек с координатами (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, n$, где n — общее количество точек, лежащих вдоль дуги окружности некоторого радиуса с некоторой погрешностью, характеризующей их разброс. Необходимо определить радиус данной дуги. Для решения этой задачи воспользуемся методом наименьших квадратов. Минимизация суммы квадратов отклоне-

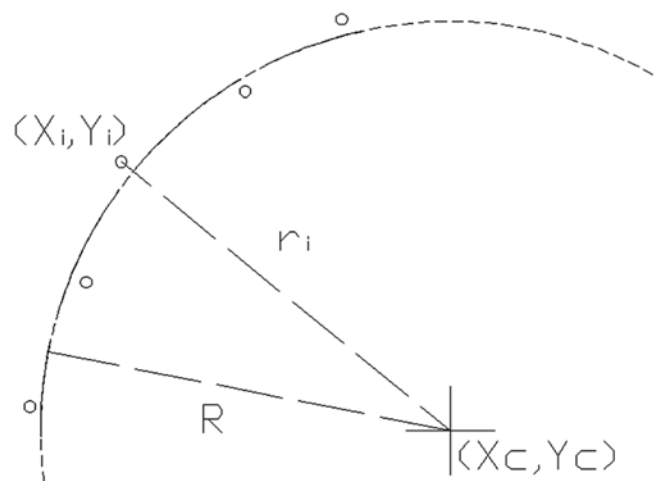


Рис. 4. Схема аппроксимации

ния экспериментальных координат от функции дуги окружности примет вид:

$$S = \sum_{i=1}^n (r_i^2 - R^2)^2 \rightarrow \min,$$

где r_i — расстояния координаты (x_i, y_i) до центра окружности (X_c, Y_c) , R — радиус этой окружности (рис. 4).

$$r_i^2 = (x_i - X_c)^2 + (y_i - Y_c)^2,$$

$$S = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 - 2x_i X_c - 2y_i Y_c + X_c^2 + Y_c^2 - R^2]^2. \quad (1)$$

Для упрощения выражения произвели замену, $Q = X_c^2 + Y_c^2 - R^2$, что позволило значительно упростить задачу:

$$S = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 - 2x_i X_c - 2y_i Y_c + Q]^2,$$

Условием минимума полученной функции является равенство нулю частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial X_c} = \sum_{i=1}^n [(x_i^2 + y_i^2 - 2x_i X_c - 2y_i Y_c + Q) \cdot (-4x_i)] = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial Y_c} = \sum_{i=1}^n [(x_i^2 + y_i^2 - 2x_i X_c - 2y_i Y_c + Q) \cdot (-4y_i)] = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial Q} = \sum_{i=1}^n [(x_i^2 + y_i^2 - 2x_i X_c - 2y_i Y_c + Q) \cdot 2] = 0. \end{cases}$$

В результате дифференцирования функции имеем систему линейных уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (4x_i^2 X_c + 4x_i y_i Y_c - 2x_i Q) = \sum_{i=1}^n (2x_i (x_i^2 + y_i^2)), \\ \sum_{i=1}^n (4x_i y_i X_c + 4y_i^2 Y_c - 2y_i Q) = \sum_{i=1}^n (2y_i (x_i^2 + y_i^2)), \\ \sum_{i=1}^n (2x_i X_c + 2y_i Y_c - Q) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 4 \sum_{i=1}^n x_i^2 & 4 \sum_{i=1}^n x_i y_i & -2 \sum_{i=1}^n x_i \\ 4 \sum_{i=1}^n x_i y_i & 4 \sum_{i=1}^n y_i^2 & -2 \sum_{i=1}^n y_i \\ 2 \sum_{i=1}^n x_i & 2 \sum_{i=1}^n y_i & -n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \sum_{i=1}^n (x_i^3 + x_i y_i^2) \\ 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2 y_i + y_i^3) \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \end{pmatrix}$$

Решая систему уравнений, получаем искомые значения. Учитывая проведённую ранее замену, вычислим радиус этой окружности

$$R = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 - Q}.$$

Уравнение траектории точки, формирующей дугу, имеет вид:

$$\begin{cases} x_i = X_c + R \cdot \cos(\alpha_i), \\ y_i = Y_c + R \cdot \sin(\alpha_i). \end{cases} \quad (2)$$

где $\alpha_i = \alpha_s + \frac{i}{n} \cdot \alpha L$,

$\alpha_s = k \cdot \pi + \arctg\left(\frac{y_s - Y_c}{x_s - X_c}\right)$ угол начала дуги k — зависит от четверти окружности, в которой находится начальная точка дуги;

$\alpha L = \frac{L}{R}$ этот угол выражает отношение длины к радиусу дуги и в зависимости от направления расчета точек имеет положительное, либо отрицательное значение.

Полученная дуга достаточно качественно «сглаживает» эксперимент, и полученные координаты годятся для дальнейшего их использования в корректировке. Для кривой, имеющей несколько отрезков с условно постоянным радиусом, необходимо искать свою дугу для каждого участка кривой.

Аппроксимация с известным началом дуги

Кривая, состоящая из нескольких дуг, должна быть непрерывной, т. е. окончание одной дуги должно быть началом следующей. Частным случаем аппроксимации, при котором требуется прохождение аппроксимирующей кривой через исходные опорные точки, является интерполяция. В нашу задачу добавилось условие, при котором дуга должна проходить через одну известную точку (рисунок 5).

Учитывая это условие, радиус окружности представим в следующем виде:

$$R^2 = (x_s - X_c)^2 + (y_s - Y_c)^2 = x_s^2 + y_s^2 - 2x_s X_c - 2y_s Y_c + X_c^2 + Y_c^2.$$

Поставив радиус в зависимость от начала дуги, выражение (1) сведётся к функции с двумя неизвестными:

$$S = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 - x_s^2 - y_s^2 + 2(x_s - x_i)X_c + 2(y_s - y_i)Y_c]^2. \quad (3)$$

Тогда система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial X_c} = -4 \sum_{i=1}^n [(x_i^2 + y_i^2 - x_s^2 - y_s^2 + 2(x_s - x_i)X_c + 2(y_s - y_i)Y_c)(x_s - x_i)] = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial Y_c} = -4 \sum_{i=1}^n [(x_i^2 + y_i^2 - x_s^2 - y_s^2 + 2(x_s - x_i)X_c + 2(y_s - y_i)Y_c)(y_s - y_i)] = 0. \end{cases}$$

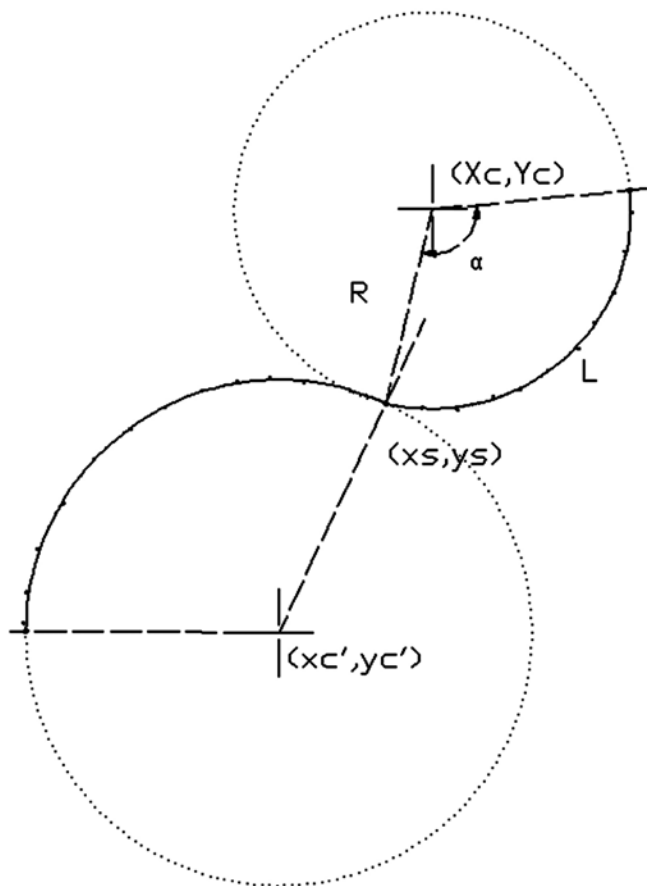


Рис. 5. Схема аппроксимации контура с учетом начала дуги

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [2(xs - x_i)Xc + 2(xs - x_i)(ys - y_i)Yc] &= \sum_{i=1}^n [(x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2)(x_i - xs)] \\ \sum_{i=1}^n [2(xs - x_i)(ys - y_i)Xc + 2(ys - y_i)^2 Yc] &= \sum_{i=1}^n [(x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2)(y_i - ys)] \\ \begin{pmatrix} 2 \sum_{i=1}^n (xs - x_i)^2 & 2 \sum_{i=1}^n (xs - x_i)(ys - y_i) \\ 2 \sum_{i=1}^n (xs - x_i)(ys - y_i) & 2 \sum_{i=1}^n (ys - y_i)^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Xc \\ Yc \end{pmatrix} &= \\ = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n [(x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2)(x_i - xs)] \\ \sum_{i=1}^n [(x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2)(y_i - ys)] \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Решая систему уравнений, получаем координаты центра окружности дуги. Используя полученный результат и начало дуги, определяем радиус искомой окружности

$$R = \sqrt{(xs - Xc)^2 + (ys - Yc)^2}$$

Расчет траектории точек дуги производится по формулам (2).

На основе полученной математической модели аппроксимации контура был разработан алгоритм расчета кривизны контура набором дуг с исходными данными начала первой дуги и списка длин дуг (рисунок 6). В дан-

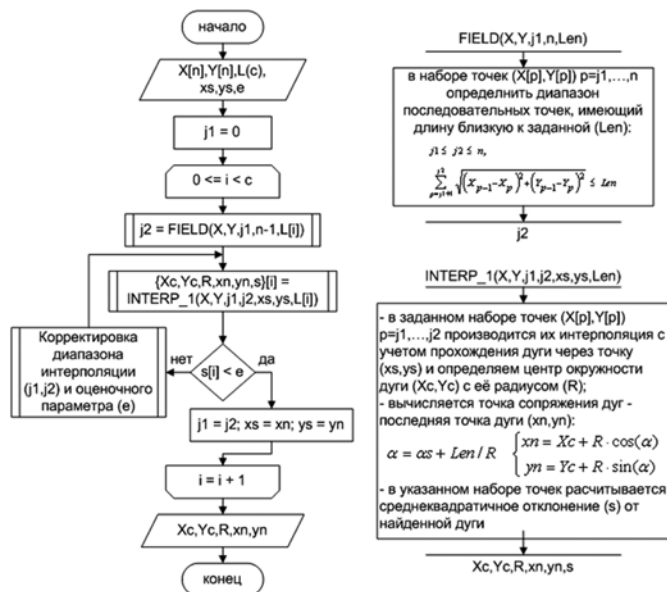


Рис. 6. Алгоритм расчета радиусов кривизны контура набором дуг с учетом точек сопряжения

ном алгоритме указывается первая точка контура (xs, ys), через которую пройдет первая искомая дуга. Кроме того, при аппроксимации исходного диапазона, определяемого по длине дуги (FIELD), среднеквадратичное отклонение может не удовлетворять заданной погрешности (e—оценочный параметр также может корректироваться), поэтому производится корректировка диапазона аппроксимации (j1, j2) путём расширения его до тех пор, пока отклонение не станет приемлемым. В зависимости от задачи, которую ставят перед этим модулем, методы корректировки могут сильно различаться и в значительной степени влиять на конечный результат.

Используя разработанный алгоритм, были проверены расчеты теоретического и экспериментального контура. На рисунке 7 показаны результаты отклонения исходных контуров от геометрии дуг, найденных интерполирующей функцией. Полученные результаты имеют отклонения значительно ниже существующих допусков на длинномерных деталях, что положительно характеризует разработанную математическую модель и алгоритм аппроксимации.

Однако, несмотря на достаточно хороший результат, такая аппроксимация не обеспечивает гладкости перехода геометрии между дугами кривой. В результатах отклонения видно, что точка перехода из одной дуги в другую имеет разную величину отклонения, что объясняется математической моделью интерполирующей функции. На рисунке 5 видно, что радиус одной дуги не лежит на одной прямой с радиусом другой дуги, это говорит о том, что нормали в точке перехода от одной дуги к другой не совпадают, что и приводит к переломам на кривой. Разница между этими отклонениями незначительная и значит перелом кривой почти незаметен.

Аппроксимация с известным началом дуги и зависимым центром

Для того чтобы минимизировать возможные переломы на кривой, добавим в формулу аппроксимации

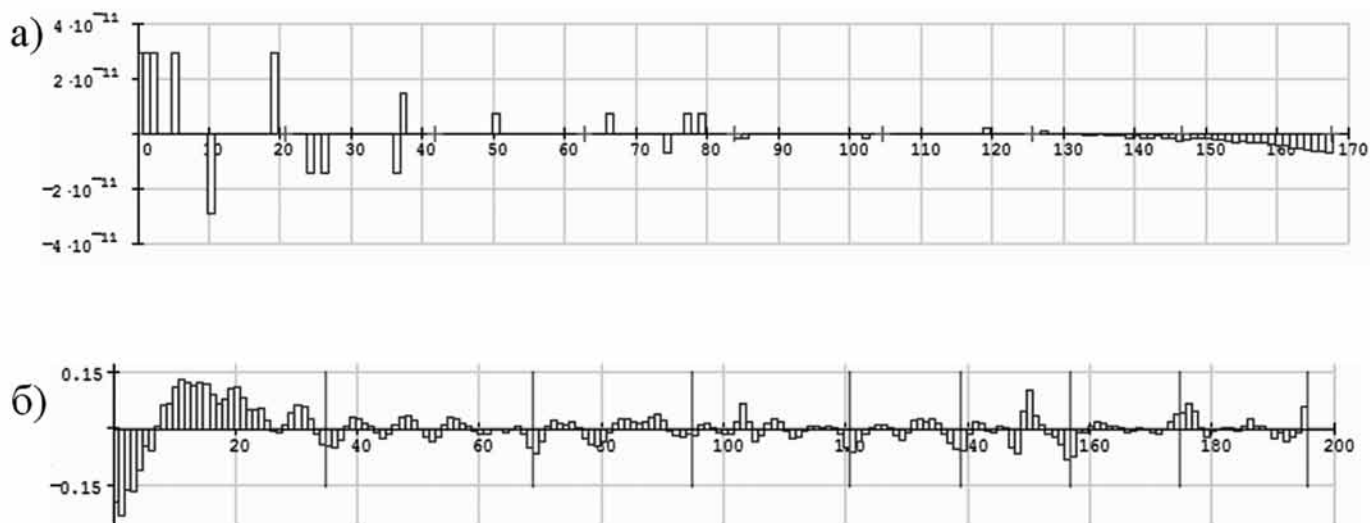


Рис. 7. Отклонения точек контура от геометрии дуг, полученных аппроксимацией:
 а — отклонения функциональной зависимой геометрии;
 б — отклонения экспериментальных данных

(3) ещё одно дополнительное условие:

$Yc = a(Xc - xc') + yc'$, где $a = \frac{ys - yc'}{xs - xc'}$ — угловой коэффициент прямой.

Центр окружности дуги должен располагаться на одной прямой, проходящей через центр окружно-

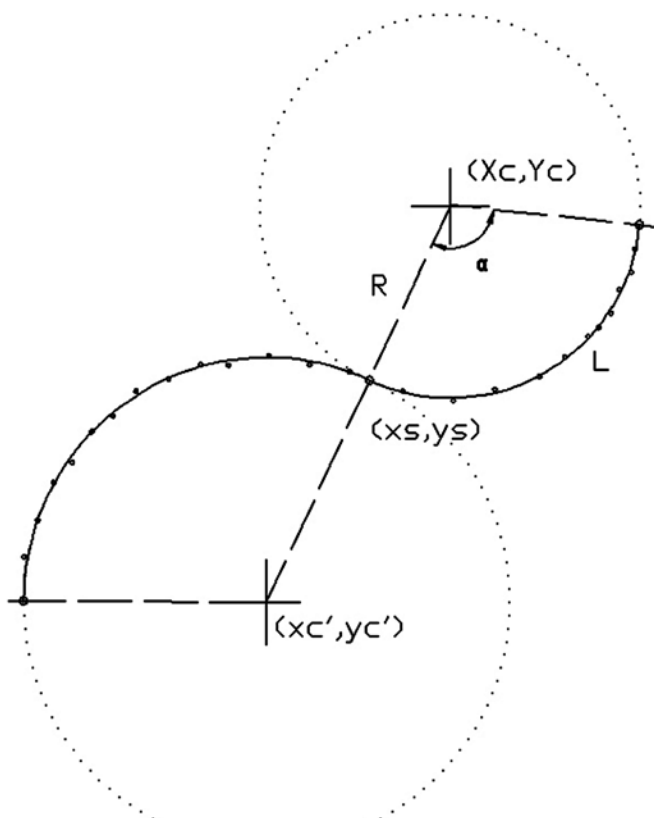


Рис. 8. Схема аппроксимации контура с учетом начала дуги и зависимым центром

сти предыдущей дуги и точку перехода между этими дугами (рисунком 8). Тогда получим уравнение:

$$S = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2 + 2(xs - x_i)Xc + 2(ys - y_i)(a \cdot Xc - a \cdot xc' + yc')]^2 =$$

$$= \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2 + 2(xs - x_i)Xc + 2a(ys - y_i)Xc + 2(ys - y_i)(yc' - a \cdot xc')]^2$$

$$S = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2 + 2(ys - y_i)(yc' - a \cdot xc') + 2(xs - x_i + a(ys - y_i))Xc]^2 \quad (4)$$

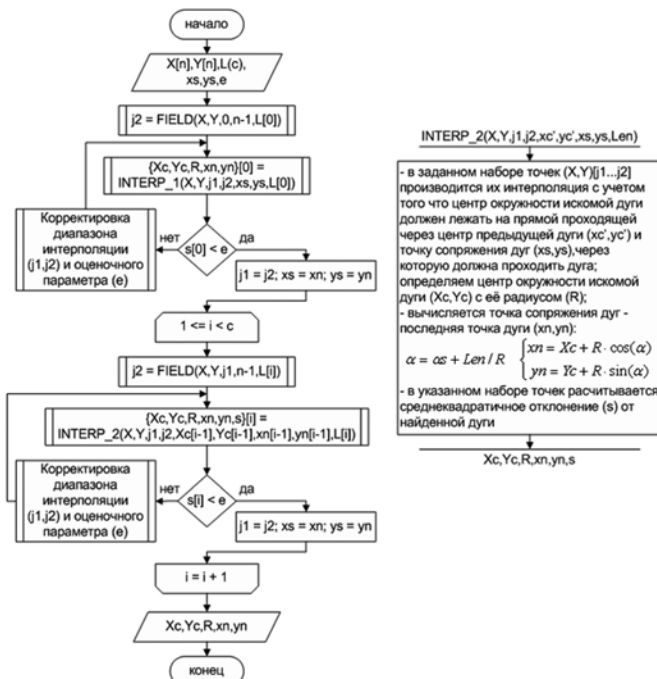


Рис. 9. Алгоритм расчета радиусов кривизны контура набором дуг с учетом точек сопряжения и зависимых центров

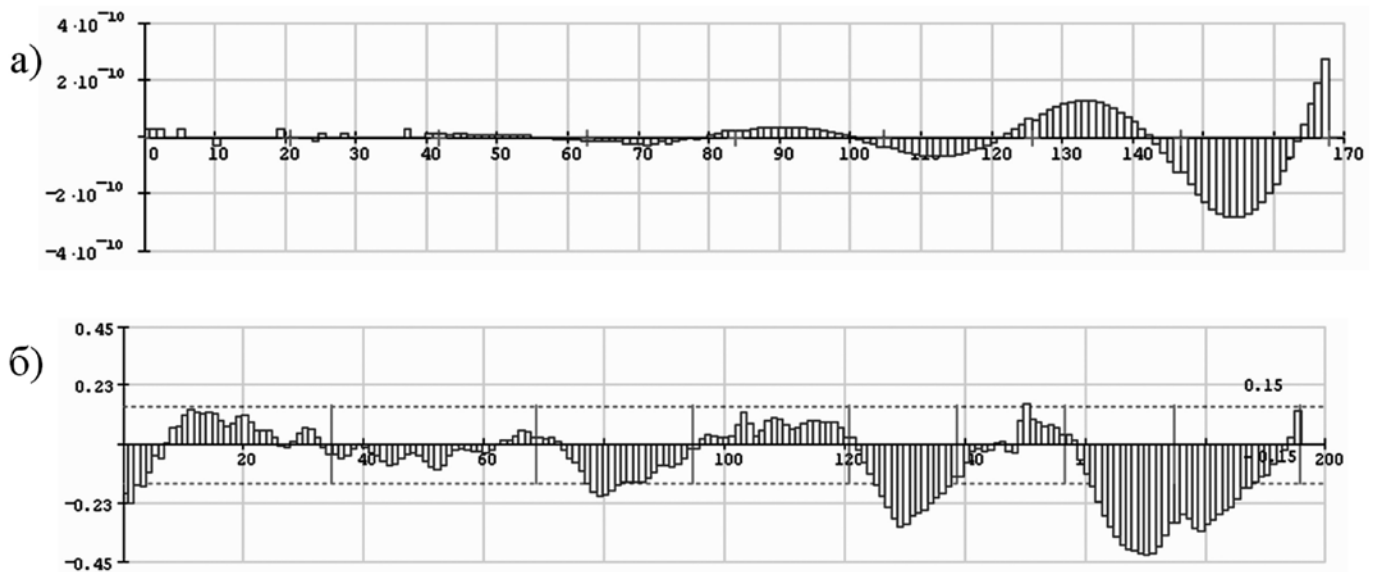


Рис. 10. Отклонения точек контура от геометрии дуг, полученных интерполяцией:
 а — отклонения функциональной зависимой геометрии;
 б — отклонения экспериментальных данных

В такой постановке задачи решается одно дифференциальное уравнение.

$$\frac{\partial S}{\partial Xc} = 4 \sum_{i=1}^n \left[\begin{array}{l} x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2 + \\ + 2(y_s - y_i)(yc' - a \cdot xc') + \\ + 2(xs - x_i + a(y_s - y_i))Xc \end{array} \right] = 0$$

$$4 \sum_{i=1}^n \left[\begin{array}{l} x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2 + \\ + 2(y_s - y_i)(yc' - a \cdot xc') \end{array} \right] (xs - x_i + a(y_s - y_i)) + 2(xs - x_i + a(y_s - y_i))^2 Xc = 0$$

$$8Xc \sum_{i=1}^n (xs - x_i + a(y_s - y_i))^2 = -4 \sum_{i=1}^n \left[\begin{array}{l} x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2 + \\ + 2(y_s - y_i)(yc' - a \cdot xc') \end{array} \right] (xs - x_i + a(y_s - y_i))$$

$$Xc = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 - xs^2 - ys^2 + 2(y_s - y_i)(yc' - a \cdot xc'))(xs - x_i + a(y_s - y_i))}{-2 \sum_{i=1}^n (xs - x_i + a(y_s - y_i))^2}$$

$$Yc = a(Xc - xc') + yc'$$

$$R = \sqrt{Xc^2 + Yc^2 - Q}$$

Полученные выражения позволяют обеспечить гладкость аппроксимации.

На рисунке 9 показан алгоритм, в котором, в отличие от предыдущего, применяются две аппроксимационные функции, первая дуга рассчитывается по схеме со свободным центром окружности, а все последующие дуги рассчитываются по схеме зависимых центров.

Полученной аппроксимационной схемой рассчитали теоретический и экспериментальный контуры. Результаты показали, что уменьшение числа свобод при аппроксимации приводит к накоплению ошибок, которые в некоторых случаях могут давать значительные отклонения (рисунок 10).

Разработанные методы аппроксимации дугами экспериментальных данных являются хорошим инструментом при анализе геометрии длинномерных деталей типа стрингеров летательного аппарата. Практика показала, что разработанные методика и алгоритмы позволяют с необходимой точностью оценивать геометрию контуров деталей, и позволяет оперативно в процессе серийного производства корректировать установку оборудования по результатам гибки первой детали от партии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феоктистов, С.И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности./С.И. Феоктистов.— Владивосток: Дальнаука, 2001. 183 с.
2. Выгодский М.Я., Справочник по высшей математике/М.Я. Выгодский.— М.: Наука, 1965-872 с.

Амплитов П.А., Фролов В.В.

P.A.Amplitov, V.V.Frolov

05.07.06

О МАНЕВРЕ ПО КУРСУ ЛЕГКОГО ЭКРАНОПЛАНА ТИПА А COURSE MANEUVERS OF A LIGHT WIG AIRCRAFT, A-TYPE



Амплитов Павел Андреевич — аспирант кафедры «Технология самолетостроения» КНАГТУ (г. Комсомольск-на-Амуре). Email: ampula@rambler.ru
Pavel A. Amplitov — PhD candidate at the Department of Aircraft Engineering of the State Komsomolsk-on-Amur Technical University

(Komsomolsk-on-Amur). Email: ampula@rambler.ru



Фролов Владимир Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Тех-нология самолетостроения» КНАГТУ (г. Комсомольск-на-Амуре).
Vladimir V. Frolov — PhD candidate and Associate Professor at the Dep. of Aircraft

Engineering of the State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация: В статье рассмотрены особенности маневрирования по курсу легкого экраноплана типа А. Выявлена связь между характеристиками разворота и некоторыми параметрами экраноплана. Обобщены основные способы повышения маневренности легкого экраноплана.

Summary: The paper deals with specificity of course maneuvering of a light WIG aircraft, A-type. Main methods for improving the maneuverability of a light WIG plane are reviewed.

Relationship between u-turn particularities and some parameters of a WIG aircraft are revealed.

Ключевые слова: Экраноплан, параметры, разворот.

Keywords: WIG aircraft, parameters, u-turn.

В целях конкурентоспособности по транспортной эффективности экраноплан (ЭП) должен двигаться со скоростью 180-230 км/ч, что соответствует крейсерским скоростям легких гидросамолетов. Эти скорости также позволяют уменьшить размеры несущих поверхностей ЭП по сравнению с гидросамолетами в связи с возможностью реализации у ЭП большей по величине удельной нагрузки на крыло

$$P_o^3 = \frac{P_o^\Gamma}{\Delta} \cdot \left(1 + \frac{\Delta C_{ya}}{C_y^\Gamma K_{max}} \right),$$

$$\text{или } P_o^3 = \frac{P_o^\Gamma}{\Delta} \cdot \frac{K_{max}^3}{K_{max}^\Gamma},$$

где P_o^Γ — удельная нагрузка на крыло у гидросамолета, даН/м²; Δ — относительная плотность, соответствующая высоте полета гидросамолета; $C_{y K_{max}}^\Gamma$ — коэффициент подъемной силы гидросамолета при полете на максимальном аэродинамическом качестве K_{max}^Γ ; K_{max}^3 — максимальное аэродинамическое качество ЭП; ΔC_{ya} — приращение коэффициента подъемной силы крыла экраноплана по сравнению с гидросамолетом при полете на режиме K_{max}

$$\Delta C_{ya} = C_y^3 K_{max} -$$

где $C_{y_{loc}}^3$ — коэффициент подъемной силы ЭП при K_{max}^3 .
Относительное уменьшение площади крыла ЭП при прочих равных условиях составит

$$\Delta \bar{S}^3 = 1 - \frac{1}{\Delta} \cdot \frac{K_{max}^3}{K_{max}^\Gamma}.$$

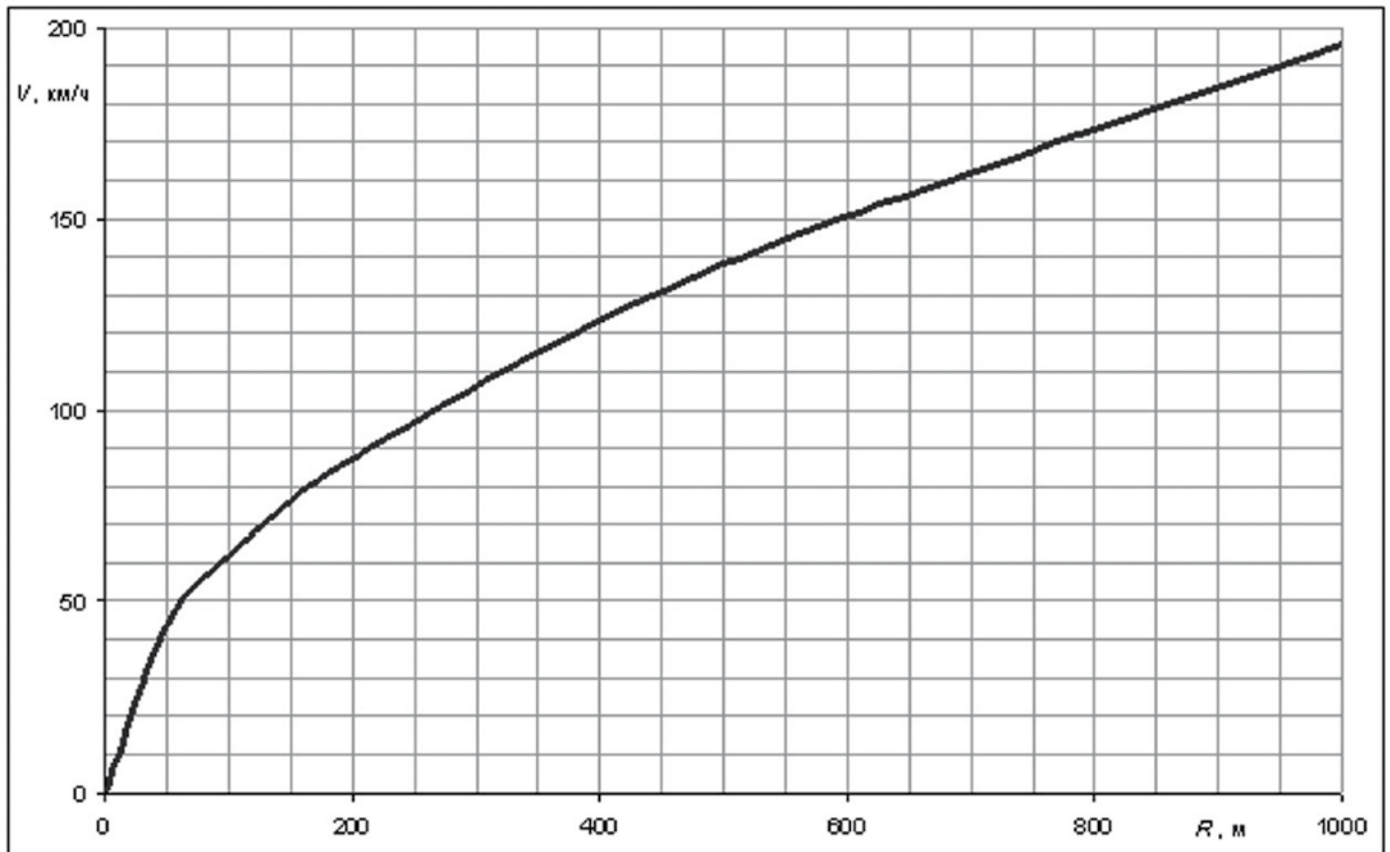


Рис. 1. К определению параметров разворота с боковой перегрузкой 0,3

Это дает определенный резерв в массе конструкции ЭП, способный повысить его весовую и экономическую эффективность.

Однако эксплуатация на реках требует от ЭП повышенной маневренности по курсу (малого радиуса разворота), а наиболее эффективным средством уменьшения радиуса разворота является снижение скорости при сохранении заданной величины боковой перегрузки n_z (здесь и в дальнейшем будем считать ЭП материальной точкой):

$$n_z = V^2 / (g R),$$

откуда $R = V^2 / (g n_z),$

где R — радиус разворота, м.

Это актуально также потому, что у ЭП ограничен маневр по крену. Так же при маневрировании сказывается такой параметр, как время реакции пилота. Если брать данные по автотранспорту (см. прим. 1), то время реакции t_p (с) и дистанция l_p (м), пройденная транспортным средством, определяются по формулам

$$t_p = 0,025 V_a$$

$$l_p = 6,9 \cdot 10^{-3} V_a^2,$$

где V_a — скорость движения, км/ч.

Рассмотрим плоский поворот ЭП на 90° . При этом будем считать, что максимальное время реакции должно соответствовать половине поворота, то есть

$$l_p = 0,25 R \pi = 0,785 R$$

Тогда радиус разворота составит

$$R^I = 8,8 \cdot 10^{-3} V_a^2 = 11,4 \cdot 10^{-2} V^2,$$

что соответствует боковой перегрузке $n_z = 0,87$.

По опыту эксплуатации судов на подводных крыльях и судов на воздушной подушке [2], перегрузка

не должна превышать 0,3, тогда

$$R^{\text{II}} = 0,34 V^2$$

График, соответствующий этой формуле, приведен на рис. 1.

Общим недостатком плоского разворота является скольжение с углом дрейфа θ

$$\text{tg } \theta \approx \sqrt{\frac{2 m_0}{\rho S_{\text{бок}} R}}$$

где $S_{\text{бок}}$ — площадь боковой проекции экраноплана, находящейся в среде с плотностью ρ , м².

Опыт эксплуатации судов на воздушной подушке показывает, что угол дрейфа не должен превышать 25°. Уменьшить угол дрейфа и сократить отклонение аппарата от траектории разворота возможно при развороте с углом креном γ , тогда угол дрейфа определится из формулы

$$\text{tg } \theta \approx \sqrt{\frac{2 m_0 (V^2/R - g \text{tg } \gamma)}{\rho S_{\text{бок}} V^2}}$$

При движении крыла экраноплана в непосредственной близости от опорной поверхности степень поперечной статической устойчивости аппарата по крену достигает большой величины [1], что затрудняет управление по крену из-за значительного восстанавливающего момента.

Максимальное значение радиуса поворота R_{max} ограничивается условиями полета. Так, например, при повороте русла реки шириной 50 м на 90° максимальный радиус разворота составит порядка 100 м, для реализации которого необходима скорость

$$V = \sqrt{R g n_2} = \sqrt{100 \text{ м} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 0,3} = 17 \text{ м/с} = 61 \text{ км/ч}$$

Поэтому на узких и извилистых участках рек необходимо значительное снижение скорости полета.

Реализация такого режима движения ЭП возможна двумя способами:

— с контактом с поверхностью (гидродинамический, водоизмещающий режимы движения, разворот с касанием поверхности определёнными частями конструкции);

— без контакта с подстилающей поверхностью (использование статической воздушной подушки или подъемных двигателей; выходом из зоны влияния экрана для создания необходимого крена).

Недостатками первого способа являются повышенные перегрузки при движении, значительные ударные нагрузки. При развороте на гидродинамическом или водоизмещающем режиме — более длительный процесс перехода к крейсерскому режиму. Недостатком второго способа является возможное увеличение массы и усложнение конструкции за счет необходимости установки подъемных двигателей или организации воздушной подушки, либо наличия избытка тяги (мощности) и правильного регулирования двигателей. Реализация выхода из зоны влияния экрана также потребует надежной устойчивости и управляемости ЭП вне экрана. Однако при грамотно выбранных геометрических, весовых и энергетических параметрах ЭП, а также реализации системы управления двигателями переход от крейсерского режима к режиму малых скоростей и наоборот будет проходить без заметных перегрузок и ударов за необходимое время. Также при наличии подъемных двигателей (воздушной подушки) ЭП приобретает амфибийные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, В. И. Особенности аэродинамики, устойчивости и управляемости экра-ноплана\В. И. Жуков. — М. Издательский отдел ЦАГИ, 1997. — 81 с.
2. Колызаев, Б. А., Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания\Колызаев, Б. А., Косоруков А. И., Литвиненко В. А.. Л. — Судостроение, 1980. — 472 с., ил.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Перспективные технологии и новые разработки. Расчет безопасной скорости транспортного потока. Омск, «Промышленная Сибирь». Режим доступа: <http://www.sibpatent.ru/default.asp?khid=28495&sort=2&grnti=7331>

ЭНЕРГЕТИКА

POWER ENGINEERING

Романюк В. П.
V.P.Romanyuk

05.14.01

ОБ УЛУЧШЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЫТОВЫХ КОНДИЦИОНЕРОВ

IMPROVING ENERGY PARAMETERS OF DOMESTIC AIR-CONDITIONING SYSTEMS



Романюк Владимир Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры элек-тротехники Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: romaniuk@mail.ru
Vladimiv P.Romanyuk

– PhD in Engineering, Assistant Professor at the Electro-technical Engineering Department of the State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: romaniuk@mail.ru

Аннотация: Предложено два способа интенсификации охлаждения конденсатора бытового кондиционера, которые дают возможность снизить температуру конденсации с целью улучшения энергетических показателей прибора.

Summary: Two methods for better cooling of a condenser are suggested, which helps lower the temperature of condensation and improve energy parameters of the appliance.

Ключевые слова: Кондиционер, температура конденсации, потребляемая мощность.

Keywords: condenser, condensation temperature, consumed power.

В связи с все более широким распространением бытовых кондиционеров заметно возросла доля энергии, потребляемой ими в теплое время года, и, несмотря на достигнутые успехи, задача дальнейшего улучшения их энергетических показателей является достаточно актуальной. Повышая эффективность работы кондиционеров, можно добиться не только общего уменьшения энергопотребления, но и понизить величину максимума нагрузки энергосистемы в жаркую погоду.

Снижение мощности, потребляемой двигателем компрессора холодильной машины, может быть достигнуто уменьшением разности между температурой конденсации и температурой кипения хладагента. Известно, что холодильный коэффициент компресси-

онной холодильной установки (отношение ее холодопроизводительности к работе, затраченной на сжатие пара хладагента) находится как

$$\xi = \frac{h_3 - h_4}{h_2 - h_1},$$

где h_3 и h_4 – энтальпия хладагента на выходе и на входе в испаритель, соответственно;

h_2 и h_1 – энтальпия хладагента на выходе и на входе в компрессор, соответственно,

причем в цикле без регенерации и перегрева пара $h_1 = h_3$ [4].

Уменьшение температуры конденсации при неизменной температуре в испарителе вызывает снижение h_2 и h_4 , вследствие чего холодильный коэффициент возрастает. Один из возможных путей снижения температуры конденсации – интенсификация охлаждения конденсатора, который представляет собой оребренный трубчатый теплообменник с обдувом наружным воздухом.

Первый предлагаемый способ улучшения охлаждения конденсатора заключается в использовании для этого водяного конденсата, который выпадает на испарителе при работе кондиционера, и который обычно сливается на улицу или в канализацию. Если этот конденсат подавать в наружный блок кондиционера и орошать им конденсатор, то теплосъем с его поверхности будет проходить более интенсивно. Для иллюстрации сказанного и определения возможного при таком орошении снижения потребляемой компрессором мощности, проведем расчет, взяв для примера параметры кондиционера LG-K 1860, холодопроизводительность которого составляет $Q_x = 5,27$ кВт, потребляемая мощность $P = 1,9$ кВт, воздухопроизводительность вентилятора наружного блока $V_n = 42$ м³/мин, внутреннего — $V_b = 12$ м³/мин [2].

Пусть во внутренний блок кондиционера поступает воздух, имеющий температуру 25 °С и относительное влагосодержание $\psi_{b1} = 0,6$. Удельное влагосодержание входящего воздуха составляет $d_{b1} = \psi_{b1} \cdot d_{s25} = 0,0122$ кг паров воды на 1 кг сухого воздуха ($d_{s25} = 0,0203$ кг/кг – влагосодержание насыщенного влажного воздуха при температуре 25 °С) [1].

Уравнение теплового баланса испарителя:

$$Q_x = G_B \cdot (h_{B2} - h_{B1}),$$

где $G_B = \rho_{20} \cdot V_b / 60 = 0,234$ кг/с – расход воздуха через испаритель (плотность воздуха при температуре 20 °С $\rho_{20} = 1,19$ кг/м³);

$h_{B1} = 56,24$ и h_{B2} – энтальпия входящего и выходящего воздуха, соответственно, кДж/кг.

Отсюда

$$h_{B2} = h_{B1} - \frac{Q_x}{G_B} = 33,5 \text{ кДж/кг}.$$

Этому значению энтальпии соответствует влажный насыщенный воздух ($\psi_{b2} = 1$) с температурой 11,7 °С и удельным влагосодержанием $d_{b2} = 0,00867$ кг/кг. Количество конденсата, выпадающего на поверхность испарителя в единицу времени:

$$G_K = G_B \cdot (d_{B1} - d_{B2}) = 0,000826 \text{ кг/с}.$$

Пусть в наружный блок кондиционера поступает воздух, имеющий температуру 30 °С и относительное влагосодержание $\psi_{n1} = 0,9$. Его удельное влагосодержание составляет $d_{n1} = \psi_{n1} \cdot d_{s30} = 0,0248$ кг/кг,

Поступила в редакцию 10.01.2010

энтальпия – $h_{N1} = 93,6$ кДж/кг.

Уравнение теплового баланса для конденсатора без орошения (принимая, что с его поверхности снимается и тепло, отбираемое у воздуха в помещении, и мощность, потребляемая компрессором):

$$Q_X + P = G_H \cdot (h_{N2} - h_{N1}),$$

где $G_H = \rho_{20} \cdot V_H / 60 = 0,833$ кг/с – расход воздуха через конденсатор;

h_{N2} – энтальпия выходящего воздуха, кДж/кг.

Из уравнения получаем

$$h_{N2} = h_{N1} + \frac{Q_X + P}{G_H} = 102,21 \text{ кДж/кг},$$

удельное влагосодержание воздуха не меняется. Этим параметрам соответствует температура $38,2$ °С.

При орошении конденсатора влагосодержание выходящего из него воздуха возрастает вследствие испарения воды:

$$d_{H2} = d_{H1} + \frac{G_K}{G_H} = 0,0258 \text{ кг/кг}.$$

Уравнение теплового баланса приобретает следующий вид:

$$Q_X + P + G_K \cdot h_K = G_H \cdot (h_{N2} - h_{N1}),$$

где $h_K = 49,16$ кДж/кг – энтальпия конденсата при температуре $11,7$ °С.

Следовательно,

$$Q_X + P + G_K \cdot h_K = G_H \cdot (h_{N2} - h_{N1}),$$

Полученным значениям влагосодержания и энтальпии соответствует температура $35,7$ °С, относительное влагосодержание выходящего воздуха составит $0,7$. Таким образом, орошение приводит к снижению температуры выходящего из конденсатора воздуха на $2,5$ °С. Можно принять, что на эту же величину снизится и температура конденсации.

Для воздушных конденсаторов разность между температурой конденсации и температурой выходящего воздуха составляет $10...15$ °С [3], поэтому будем считать, что без орошения конденсатора температура конденсации составляет 50 °С, а с орошением – $47,5$ °С. Принимая температуру кипения хладагента в испарителе равной 5 °С (на ≈ 15 °С ниже средней температуры проходящего через испаритель воздуха) и температуру переохлажденного жидкого хладагента на 3 °С ниже температуры конденсации для фреона R22, определяем энтальпии хладагента, необходимые для расчета холодильного коэффициента (см. прим. 1).

Без орошения конденсатора: энтальпия пара на выходе из испарителя (на входе в компрессор) $h_1 = 407,15$ кДж/кг; энтальпия пара на выходе из компрессора $h_2 = 437,22$ кДж/кг; энтальпия жидкого хладагента, поступающего в испаритель $h_4 = 259,11$ кДж/кг. Холодильный коэффициент для этого режима

$$\xi = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = 4,92 \text{ кДж/кг}.$$

С орошением конденсатора: энтальпии – $h_1 = 407,15$ кДж/кг, $h_2 = 435,71$ кДж/кг, $h_4 = 255,71$ кДж/кг; холодильный коэффициент $\xi = 5,3$.

Таким образом, при принятых параметрах наружного воздуха и воздуха в помещении испарение на конденсаторе наружного блока водяного конденсата, удаляемого из внутреннего блока, позволяет более чем на 7% повысить холодильный коэффициент агре-

гата и в той же степени снизить работу, необходимую для сжатия пара, а следовательно, и потребляемую компрессором кондиционера мощность.

Второй предлагаемый способ улучшения энергетических показателей кондиционера заключается в использовании для охлаждения конденсатора водопроводной воды, расходуемой на бытовые нужды. Для полностью водяного охлаждения требуется слишком много воды, поэтому водяное охлаждение должно быть дополнительным к обычному, воздушному. Горячий пар, нагнетаемый компрессором, будет последовательно проходить через два конденсатора. Первый – с обдувом наружным воздухом, второй – водяной, представляющий собой бак определенного объема с водопроводной водой, внутри которого расположены трубки с хладагентом. По мере расходования подогретой воды бак должен пополняться холодной водой. Пока температура хладагента на выходе из водяного конденсатора достаточно низкая, вентилятор воздушного конденсатора не включается, и основная часть тепла от охлаждаемого пара отбирается водой. При прогреве воды и повышении температуры хладагента до определенного уровня, зависящего от температуры наружного воздуха, система управления кондиционера должна включить вентилятор воздушного конденсатора. Так как для конденсаторов с водяным охлаждением температура конденсации на $4...6$ °С выше температуры воды [3], то получить температуру конденсации, равную 50 °С (как при охлаждении воздухом с температурой 30 °С) можно при температуре воды $44...46$ °С. Если принять, что начальная температура воды 18 °С, объем бака $0,5$ м³, то кондиционер из рассмотренного выше примера, выделяющий на конденсаторе тепловую мощность $Q_X + P = 7,2$ кВт, при непрерывной работе будет прогревать указанное количество воды до температуры 45 °С в течение более 2 ч. Всё это время температура конденсации будет ниже, чем при воздушном охлаждении, поэтому будет понижена и мощность, потребляемая компрессором.

Установка подобных систем может быть рациональной при строительстве частных домов, особенно при отсутствии централизованного горячего водоснабжения. Вода, подаваемая в автономный водонагреватель такого дома, будет предварительно подогреваться теплом кондиционера, следовательно, снижение энергопотребления кондиционера будет дополнено более существенным снижением энергопотребления водонагревателя. Емкость бака водяного конденсатора должна быть согласована с суточным расходом воды так, чтобы теплой воды, получаемой при дневной работе кондиционера, было достаточно для обеспечения вечернего водопотребления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов С. Н. Холодильная техника: Свойства веществ: Справочник / С. Н. Богданов, О. П. Иванов, А. В. Куприянова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. Машиностроение, 1976. – 166 с.
2. Коляда В. В. Кондиционеры. Принципы работы, монтаж, установка, эксплуатация и рекомендации по ремонту / В. В. Коляда. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 240 с.
3. Курылев Е. С. Холодильные установки: Учебник для вузов / Курылев Е. С., Оносовский В. В., Румянцев Ю. Д. – СПб.: Политехника, 1999. – 576 с.
4. Холодильные машины: Учебник для вузов / Под общ. ред. И. А. Сакуна. – Л.: Машиностроение, 1985. – 511 с.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. CoolPack Version 1,46 – A Collection of Simulation Tools for Refrigeration © 1998-2001 Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark. Режим доступа <http://www.et.dtu.dk/CoolPack>

Степанов А.Н.

РАСЧЕТ ВНЕШНЕГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БЫТОВЫХ ПРИБОРОВ

Степанов А. Н.

05.14.01

A. N. Stepanov

РАСЧЕТ ВНЕШНЕГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БЫТОВЫХ ПРИБОРОВ CALCULATION OF THE OUTER ROTATING MAGNETIC FIELD OF DOMESTIC APPLIANCES



Степанов Анатолий Николаевич, к. т. н., проф., декан ЭТФ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре) e-mail Prof.Stepanova@mail.ru

Anatoly N. Stepanov — PhD in engineering, Professor, Dean of the Electro-technical

Engineering Department of the State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация: Изложена методика моделирования и расчета внешнего магнитного поля бытовых приборов. Вращающееся магнитное поле однофазной электрической машины можно смоделировать двумя рамками, оси которых сдвинуты в пространстве на угол 90 градусов и по которым протекают токи, сдвинутые по фазе также на угол 90 градусов.

Summary: The paper proposes a methodology for calculation and simulation of an outer magnetic field of domestic appliances. The rotating magnetic field of a single-phase electric machine can be simulated by two conducting frames, whose axes have been 90-degree shifted in space, and through which currents do flow with the same phase-shift.

The directions in which the field has the maximum strength are identified, along with the directions in which the field fades away. At a specific ratio of frame dimensions the field of the frames can be modeled by the field of a system made of infinitely long wires.

Ключевые слова: Бытовые приборы, магнитное поле, моделирование, расчет

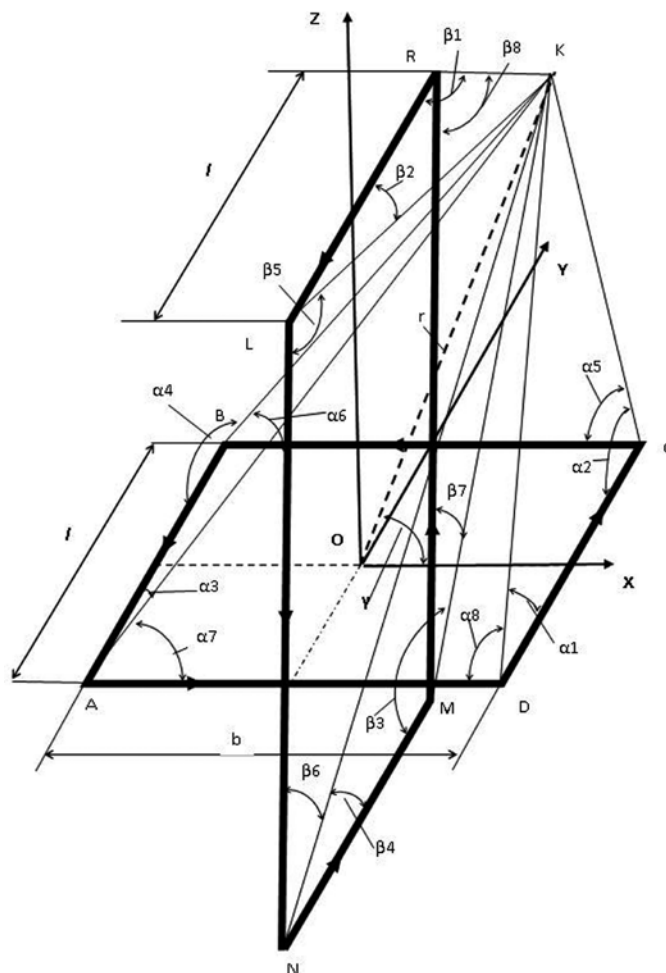


Рис. 1.

Keywords: domestic appliances, magnetic field, simulation, calculation

Во многих устройствах и приборах одним из основных непосредственных источников магнитного поля являются электрические машины. Как известно, вращающееся магнитное поле однофазной электрической машины можно смоделировать двумя рамками, оси которых сдвинуты в пространстве на угол 90 градусов и по которым протекают токи, сдвинутые по фазе также на угол 90 градусов.

Рассмотрим расчет такого магнитного поля от двух взаимно перпендикулярных прямоугольных одинаковых рамок с переменными токами

$$i_1 = I_m \sin \omega t \quad \text{и} \quad i_2 = I_m \sin(\omega t + \pi/2).$$

Пусть рамки ABCD и LNMR имеют размеры $l \times b$ и токи в рамках направлены так, как показано на рис. 1. Для расчета поля в произвольной точке K будем использовать векторный потенциал и комплексный метод. Вначале определим комплексное значение векторного потенциала в точке K от каждого прямолиней-

Поступила в редколлегию 19.01.2010.

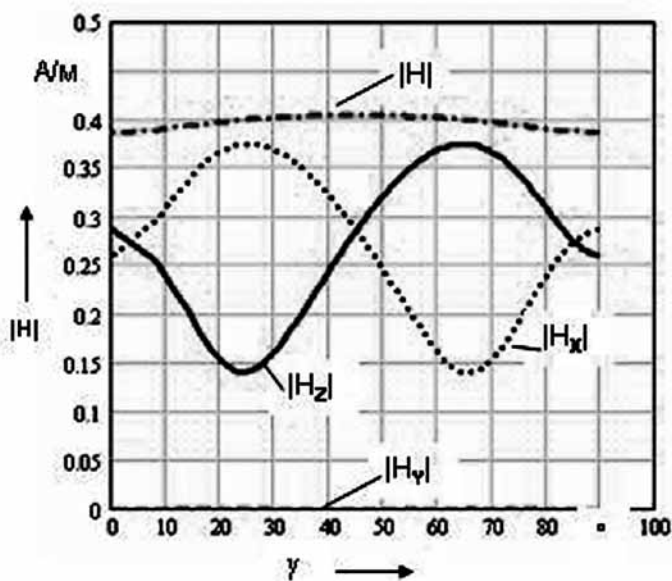


Рис. 2.

ного проводника с током, которые являются стороной той или иной рамки, затем, с учетом того, что векторный потенциал направлен параллельно плотности тока, найдем суммарные составляющие векторного потенциала.

Так, составляющая векторного потенциала от отрезка DC с комплексным током \dot{i} направлена вдоль оси OY и определяется, как известно, с помощью следующего выражения:

$$A_{y1}(x, y, z) = \frac{\mu_0 \dot{i}}{4\pi} (\text{Arsh}(\text{ctg}(\alpha_1)) + \text{Arsh}(\text{ctg}(\alpha_2))) =$$

$$= \frac{\mu_0 \dot{i}}{4\pi} \left(\text{Arsh} \frac{0,51 + y}{\sqrt{z^2 + (0,5b - x)^2}} + \text{Arsh} \frac{0,51 - y}{\sqrt{z^2 + (0,5b - x)^2}} \right).$$

Здесь x, y, z — координаты произвольной точки К. Составляющие векторного потенциала от отрез-

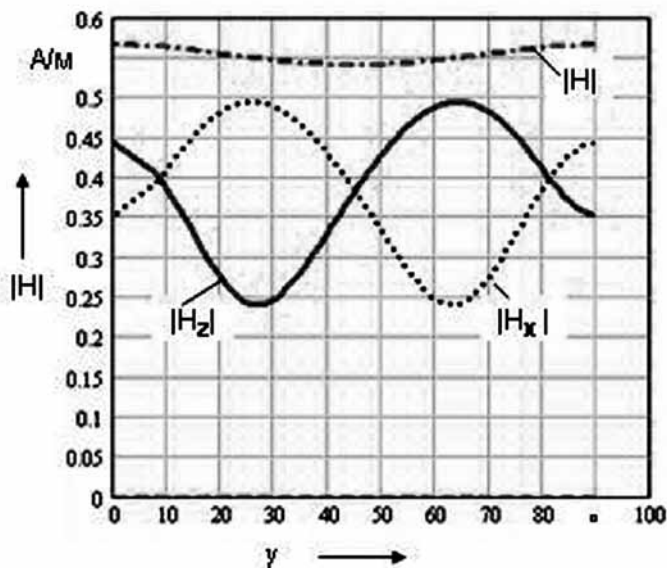


Рис. 4.

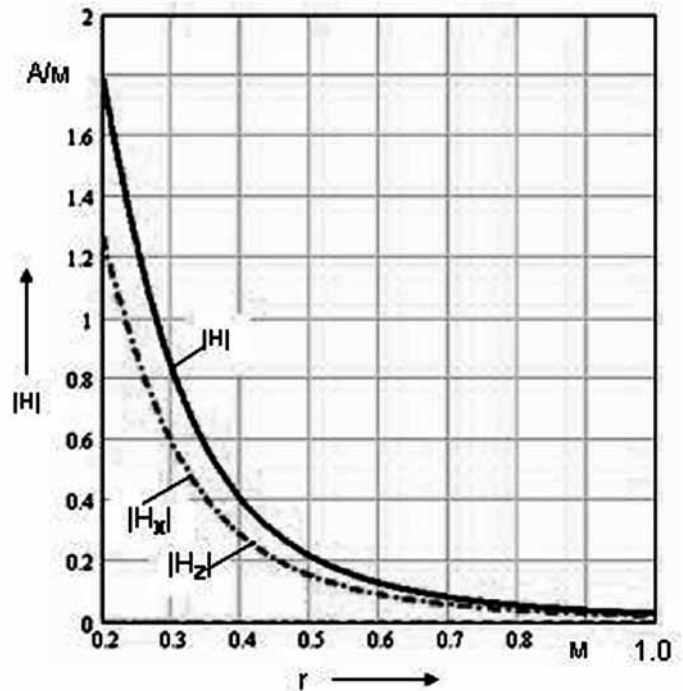


Рис. 3.

ков BA, AD, BC, рамки ABCD с током \dot{i} будут соответственно равны:

$$A_{y2}(x, y, z) = -\frac{\mu_0 \dot{i}}{4\pi} (\text{Arsh}(\text{ctg}(\alpha_3)) + \text{Arsh}(\text{ctg}(\alpha_4))) =$$

$$= -\frac{\mu_0 \dot{i}}{4\pi} \left(\text{Arsh} \frac{0,51 + y}{\sqrt{z^2 + (0,5b + x)^2}} + \text{Arsh} \frac{0,51 - y}{\sqrt{z^2 + (0,5b + x)^2}} \right);$$

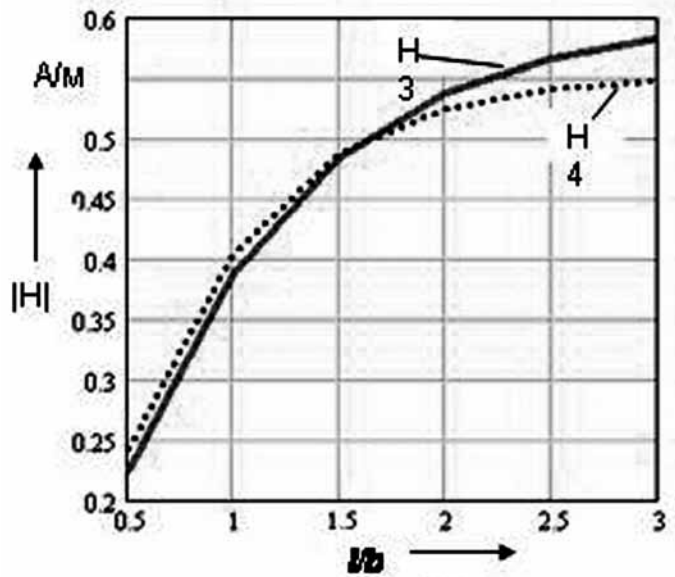


Рис. 5.

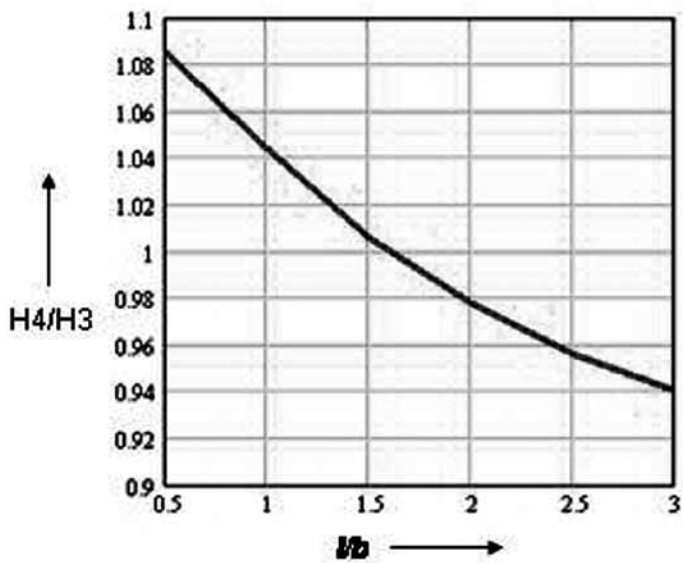


Рис. 6.

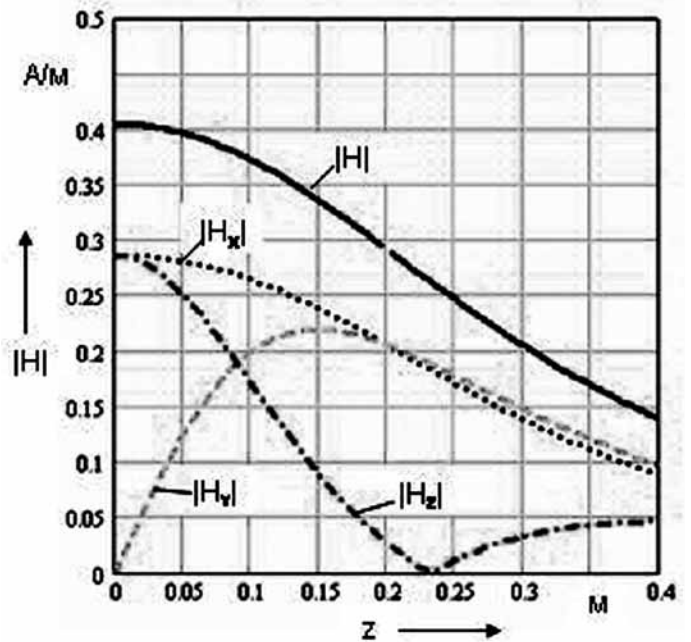


Рис. 7.

$$A_{x1}(x, y, z) = \frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} (\text{Arsh}(\text{ctg}(\alpha_7)) + \text{Arsh}(\text{ctg}(\alpha_8))) =$$

$$= \frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} \left(\text{Arsh} \frac{0,5b - x}{\sqrt{z^2 + (0,5l + y)^2}} + \text{Arsh} \frac{0,5b + x}{\sqrt{z^2 + (0,5l + y)^2}} \right);$$

$$A_{x2}(x, y, z) = -\frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} (\text{Arsh}(\text{ctg}(\alpha_5)) + \text{Arsh}(\text{ctg}(\alpha_6))) =$$

$$= -\frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} \left(\text{Arsh} \frac{0,5b - x}{\sqrt{z^2 + (0,5l - y)^2}} + \text{Arsh} \frac{0,5b + x}{\sqrt{z^2 + (0,5l - y)^2}} \right).$$

Составляющие векторного потенциала от отрезков MR, LN, NM и RL рамки MNLR с током $\dot{I} = j\dot{I}$

($j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица) определяются при помощи следующих выражений:

$$A_{z1}(x, y, z) = \frac{\mu_0 \dot{I}l}{4\pi} (\text{Arsh}(\text{ctg}(\beta_7)) + \text{Arsh}(\text{ctg}(\beta_8))) =$$

$$= \frac{\mu_0 \dot{I}l}{4\pi} \left(\text{Arsh} \frac{0,5b + z}{\sqrt{z^2 + (0,5l - y)^2}} + \text{Arsh} \frac{0,5b - z}{\sqrt{z^2 + (0,5l - y)^2}} \right);$$

$$A_{z2}(x, y, z) = -\frac{\mu_0 \dot{I}l}{4\pi} (\text{Arsh}(\text{ctg}(\beta_5)) + \text{Arsh}(\text{ctg}(\beta_6))) =$$

$$= -\frac{\mu_0 \dot{I}l}{4\pi} \left(\text{Arsh} \frac{0,5b - z}{\sqrt{z^2 + (0,5l + y)^2}} + \text{Arsh} \frac{0,5b + z}{\sqrt{z^2 + (0,5l + y)^2}} \right);$$

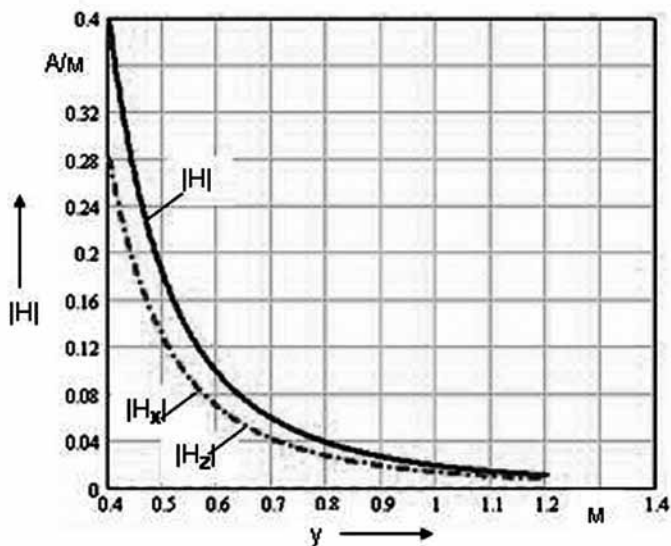


Рис. 8.

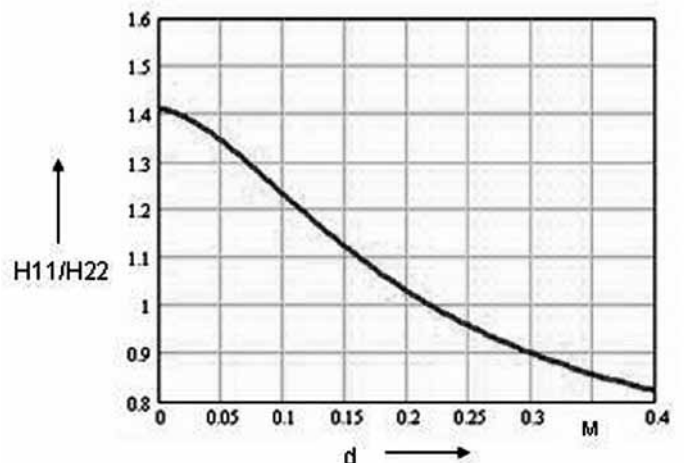


Рис. 9.

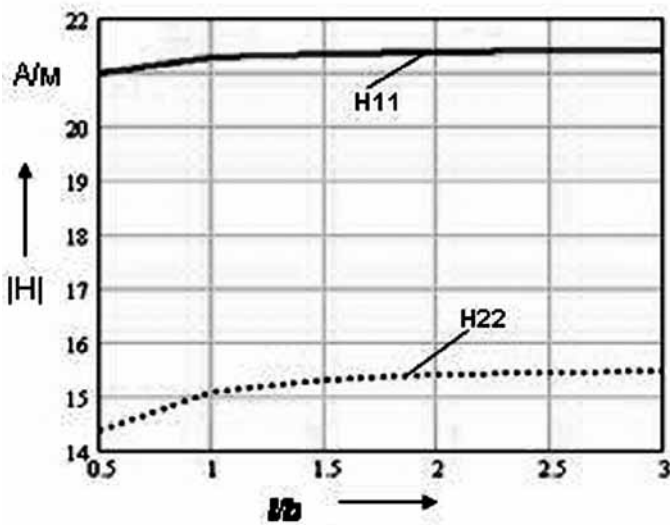


Рис. 10.

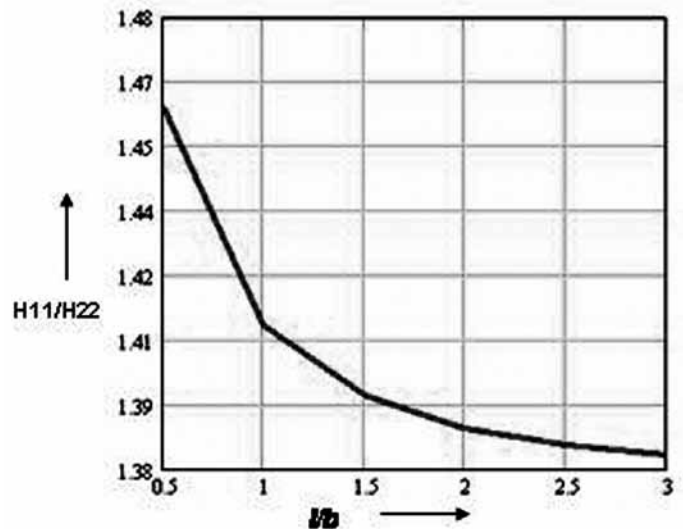


Рис. 11.

$$A_{y3}(x, y, z) = \frac{\mu_0 I l}{4\pi} (\text{Arsh}(\text{ctg}(\beta_4)) + \text{Arsh}(\text{ctg}(\beta_3))) =$$

$$= \frac{\mu_0 I l}{4\pi} \left(\text{Arsh} \frac{0,5l + y}{\sqrt{x^2 + (0,5b + z)^2}} + \text{Arsh} \frac{0,5l - y}{\sqrt{x^2 + (0,5b + z)^2}} \right);$$

$$A_{y4}(x, y, z) = -\frac{\mu_0 I l}{4\pi} (\text{Arsh}(\text{ctg}(\beta_2)) + \text{Arsh}(\text{ctg}(\beta_1))) =$$

$$= -\frac{\mu_0 I l}{4\pi} \left(\text{Arsh} \frac{0,5l + y}{\sqrt{x^2 + (0,5b - z)^2}} + \text{Arsh} \frac{0,5l - y}{\sqrt{x^2 + (0,5b - z)^2}} \right).$$

Таким образом, суммарные составляющие векторного потенциала определяются следующим образом:

$$A_x(x, y, z) = A_{x1}(x, y, z) + A_{x2}(x, y, z)$$

$$A_y(x, y, z) = A_{y1}(x, y, z) + A_{y2}(x, y, z) + A_{y3}(x, y, z) + A_{y4}(x, y, z)$$

$$A_z(x, y, z) = A_{z1}(x, y, z) + A_{z2}(x, y, z)$$

Отдельные составляющие напряженности магнитного поля будут при этом равны

$$H_x(x, y, z) = \frac{1}{\mu_0} \left(-\frac{\partial}{\partial z} A_y(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial y} A_z(x, y, z) \right);$$

$$H_y(x, y, z) = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial}{\partial z} A_x(x, y, z) - \frac{\partial}{\partial x} A_z(x, y, z) \right);$$

$$H_z(x, y, z) = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial}{\partial x} A_y(x, y, z) - \frac{\partial}{\partial y} A_x(x, y, z) \right).$$

Модуль напряженности в произвольной точке К (x, y, z) определяется следующим образом:

$$|H(x, y, z)| = \sqrt{(H_x(x, y, z))^2 + (H_y(x, y, z))^2 + (H_z(x, y, z))^2}.$$

Графики изменения модулей составляющих напряженности магнитного поля и модуля напряженности в зависимости от угла γ (рис. 1) при перемещении точки К по дуге окружности радиусом $r = l = b = 0,4$ м и $y = 0$ при токе в рамках $I = 1$ А показаны на рис. 2.

Как видно из рисунка, магнитное поле является не совсем круговым, а эллиптическим и максимальное значение модуля напряженности магнитного поля наблюдается при значении угла $\gamma = 45^\circ$.

На рис. 3 представлены графики изменения модулей составляющих напряженности магнитного поля в этой же плоскости (плоскости OXZ) при значении угла $\gamma = 45^\circ$ в зависимости от радиуса r.

Здесь следует отметить тот факт, что при изменении соотношения между параметрами l и b несколько изменяется и характер распределения модуля напряженности поля в зависимости от угла γ . Так, если взять отношение длины рамок l к ширине b равным, например, $2,5$ ($l/b = 2,5$), то графики изменения модулей составляющих напряженности магнитного поля и модуля напряженности в зависимости от угла γ будут выглядеть так, как показано на рис. 4.

Из рисунка 4 видно, что в данном случае максимальное значение модуля напряженности магнитного поля наблюдается при значении угла $\gamma = 0^\circ$ и $\gamma = 90^\circ$, а при $\gamma = 45^\circ$ — модуль напряженности принимает наоборот минимальное значение. Причем, изменяется не только характер распределения модуля напряженности магнитного поля, но и его величина.

Так, на рис. 5 показано, как изменяется напряженность магнитного поля на оси OZ (обозначим эту

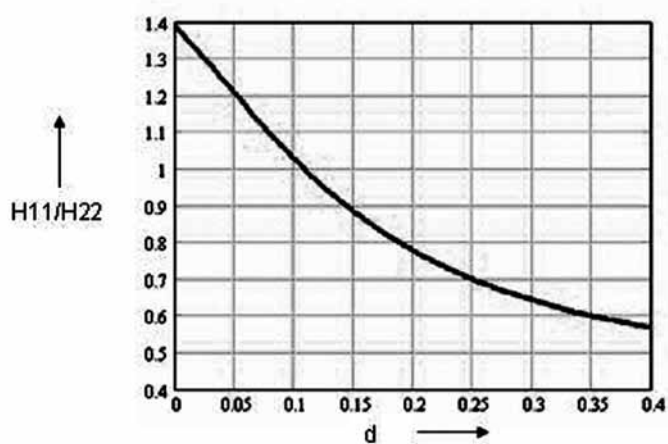


Рис. 12.

величину через H_3) при $z = b = r = 0,4$ м и на линии, расположенной под углом 45 градусов (H_4) также на расстоянии $r = b$ в зависимости от соотношения l/b . На рис. 6 представлено также изменение отношения H_4/H_3 в зависимости от соотношения l/b .

Как видно из данных рисунков с увеличением отношения l/b модуль напряженности магнитного поля и на оси OZ (H_3), и на линии, расположенной под углом 45 градусов (H_4), возрастает. Причем при $l/b < 1,6$ $H_3 < H_4$, а затем при увеличении соотношения l/b H_3 становится больше, чем H_4 .

Рассмотрим теперь, каким образом изменяется напряженность магнитного поля в торцевой части устройства в зависимости от изменения координаты Y и Z (при $l = b = 0,4$).

Так, на рис. 7 представлен график изменения модулей составляющих напряженности магнитного поля и модуля напряженности в зависимости от координаты Z при $x = 0$ и $y = l$. Как видно из данного рисунка, максимальное значение (при $y = l$) модуля напряженности магнитного поля наблюдается на оси OY.

На рис. 8 показано изменение составляющих напряженности магнитного поля в зависимости от координаты Y при $z = 0$ и $x = 0$.

Отметим, что если проводить расчет поля на небольшом расстоянии от рамок как в торцевой зоне, так и вдоль оси OZ или оси OX, то можно сделать вывод о том, что в этом случае напряженность магнитного поля принимает в непосредственной близости достаточно большие значения, а затем быстро уменьшается.

На рис. 9 показано, каким образом изменяется отношение модулей напряженности магнитного поля по мере удаления от рамок. Здесь через H_{11} обозначен модуль напряженности магнитного поля в торцевой зоне на оси OY, а через H_{22} — модуль напряженности магнитного поля на оси OZ. В качестве параметра d при расчете H_{11} принято расстояние, отсчитываемое от точки $y = 0,5 \pm 0,01$, а при расчете H_{22} — от точки $z = 0,5b \pm 0,01$.

Как видно из рис. 9, в торцевой зоне модуль напряженности магнитного поля, несмотря на то, что около рамок принимает большее значение, чем на оси

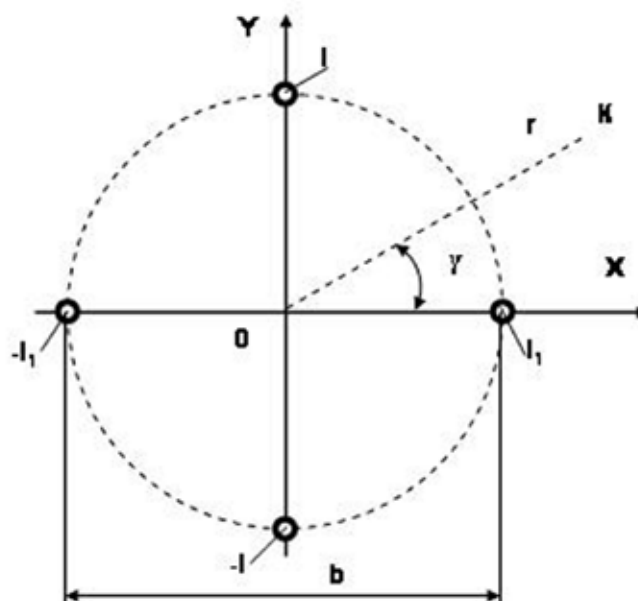


Рис. 13.

OZ на этом же расстоянии, при удалении от рамок уменьшается быстрее и уже на расстоянии d , равном 0,22 м, модули магнитного поля принимают равные значения, а затем при увеличении расстояния d , напряженность поля H_{22} на оси OZ становится больше напряженности поля H_{11} на оси OY.

Рассмотрим теперь, каким образом будут изменяться модули напряженности поля H_{11} и H_{22} , определяемые в точке $y = 0,5 \pm 0,01$ и точке $z = 0,5b \pm 0,01$ соответственно в зависимости от соотношения l/b (рис. 10).

На рис. 11 показано также изменение отношения H_{11}/H_{22} в зависимости от соотношения l/b .

Как видно из рисунков, с увеличением соотношения l/b модуль напряженности магнитного поля в непосредственной близости от конструкции как на оси OY, так и на оси OZ возрастает. При этом, несмотря на то, что отношение H_{11}/H_{22} уменьшается, напряженность поля в торцевой части остается больше, чем напряженность поля на оси OZ. Однако скорость уменьшения напряженности в торцевой части по сравнению с напряженностью магнитного поля на оси OZ или на оси OX по мере удаления от конструкции увеличивается с ростом соотношения l/b . Так, на рис. 12 показано, каким образом изменяется отношение модулей напряженности магнитного поля по мере удаления от рамок при $l/b = 2,5$. Сравнивая график, представленный на данном рисунке, с графиком на рис. 9, построенном для соотношения $l/b = 1$, можно отметить, что напряженности поля в последнем случае принимают одинаковые значения при удалении от рамок на расстояние $d = 0,22$ м, тогда как при $l/b = 2,5$ они становятся равными на расстоянии $d = 0,12$ м.

Отсюда можно сделать вывод о том, что при анализе внешнего магнитного поля от приборов, в которых создаются вращающиеся магнитные поля на расстоянии, превышающем радиальные размеры, следует учитывать то, что поле затухает медленнее вдоль ра-

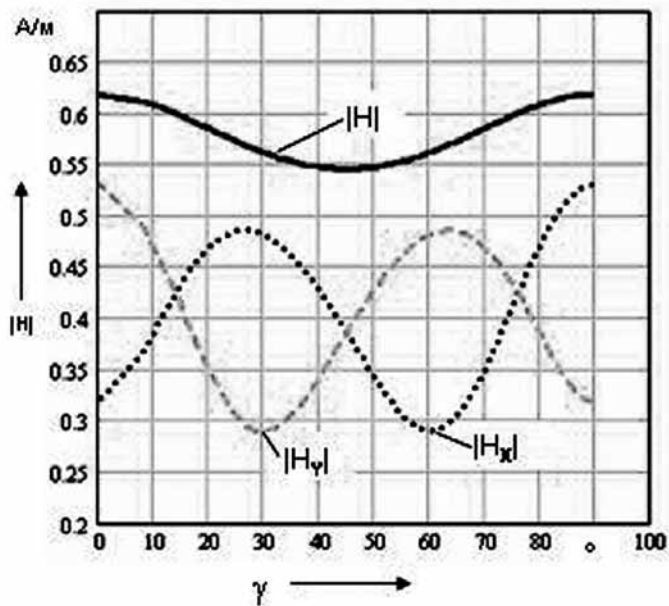


Рис. 14.

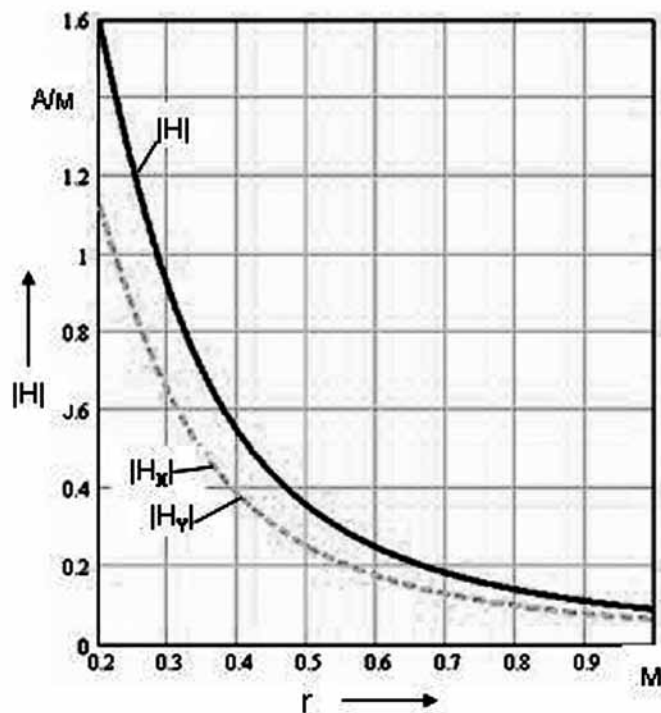


Рис. 15.

диуса, а не вдоль оси прибора.

Таким образом, если проводить оценку поля вдоль радиуса, то при соотношении $l/b > 2.5$, расчет магнитного поля можно проводить и по более простым выражениям, как от пары бесконечно длинных проводов, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях, по которым протекают токи, сдвинутые

по фазе на угол 90° ($i_1 = j\dot{i}$), рис. 13.

В этом случае векторный потенциал от пары проводов с токами \dot{i} и $-\dot{i}$ в произвольной точке К будет определяться с помощью следующего выражения:

$$A1(x, y) = \left(\frac{\mu_0 \dot{i}}{4\pi} \right) \cdot \mathbf{h} \left[\frac{(0,5b + x)^2 + y^2}{(0,5b - x)^2 + y^2} \right],$$

а векторный потенциал от пары проводов с токами $\dot{i}1$ и $-\dot{i}1$ — будет равен:

$$A2(x, y) = \left(\frac{\mu_0 \dot{i}1}{4\pi} \right) \cdot \mathbf{h} \left[\frac{(0,5b + y)^2 + x^2}{(0,5b - y)^2 + x^2} \right].$$

Отдельные составляющие напряженности магнитного поля будут при этом равны:

$$H_x(x, y) = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial y} [A1(x, y) + A2(x, y)];$$

$$H_y(x, y) = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} [A1(x, y) + A2(x, y)];$$

$$H(x, y) = \sqrt{|H_x(x, y)|^2 + |H_y(x, y)|^2}.$$

Графики изменения данных составляющих в зависимости от угла γ на расстоянии $r = b$ показаны на рис. 14, а графики их распределения вдоль радиуса r при $\gamma = 45^\circ$ представлены на рис. 15.

Из анализа рис. 14 видно, что модуль напряженности поля принимает минимальное значение при $\gamma = 45^\circ$ и по характеру данное распределение аналогично распределению модуля напряженности магнитного поля, создаваемого рамками с током при соотношении $l/b > 2.5$ (см. рис. 4). Однако, если сравнивать значения составляющих напряженности магнитного поля, то эти значения несколько выше для системы бесконечно длинных проводов. Поэтому при анализе магнитного поля с использованием упрощенных выражений надо иметь в виду, что значения напряженностей поля будут завышенными. Здесь также следует отметить, что составляющая напряженности магнитного поля H_y от бесконечно длинных проводов аналогична составляющей H_z от двух рамок.

Горькавый М.А., Соловьев В.А.

05.13.06

M.A.Gorkavy, V.S.Solovyev

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИНТЕЗА НЕЧЕТКИХ ПОДСИСТЕМ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**
**AUTOMATION OF FUZZY SUB-SYSTEMS SYNTHESIS WITHIN AN EXPERT SYSTEM
(ES) OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE**



Горькавый Михаил Александрович — аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре).

E-mail: idpo@knastu.ru

Mikhail A. Gorkavy — PhD candidate at the Department of Electro drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: idpo@knastu.ru



Соловьев Вячеслав Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного

технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru

Vyacheslav A. Solovyev — Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department of Electro drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru

Аннотация: В статье рассматривается проектирование экспертной системы (ЭС) для оценки и формирования компетентности технического персонала промышленного предприятия. В качестве структуры ЭС предлагается использование нечеткой модели компетенций. Раскрыты вопросы автоматизации и разработана программная реализация синтеза нечетких подсистем ЭС. Приведены примеры.

Summary: The paper presents a method for expert system (ES) design for the purpose of estimation and build-up of the competence of technical staff at an industrial enterprise. A fuzzy model of competencies is suggested to be used as the structure of the ES. Problems of automation are dealt with and a program realization of the ES fuzzy subsystems synthesis is developed. Examples of the above are given.

Ключевые слова: Экспертная система, компетентность, инновации, автоматизация, оптимизация, нечеткая логика, методика синтеза, лингвистические переменные.

Keywords: expert system, competence, innovations, automation, optimization, fuzzy logic, synthesis technique, linguistic variables

Введение

Авторами в настоящей работе решается задача проектирования экспертной системы, стратегической целью которой является формирование компетентности технического персонала промышленного предприятия.

Необходимость создания такой системы обосновано. Из-за высокого темпа развития научно-технического прогресса и высокой конкуренции практически в любом производстве отдельное предприятие, для того чтобы поддерживать необходимый уровень конкурентоспособности, вынуждено осуществлять политику инновационного развития. Носителями и агентами реализации инновационных решений служат люди, а в конкретном случае — персонал предприятия. Способность синтеза и реализации инновационных решений напрямую зависит от знания, умения, навыков, жизненного опыта, интуиции и т.д. конкретного сотрудника, т.е. его компетентности. Поэтому для успешной разработки и реализации инновационной стратегии предприятия в нем должна быть сформирована система, обладающая знаниями о компетентности каждого отдельно взятого сотрудника предприятия, иными словами, система, облада-

Поступила в редколлегию 20.01.2010.

ющая метазнаниями. С помощью метазнаний в любой момент можно определить сотрудника предприятия, обладающего необходимой для решения какой-либо конкретной задачи компетентностью, а также провести отбор и оценку персонала, сформировать необходимую компетентность и многое другое. Для синтеза экспертной системы и формирования метазнаний о компетентности персонала промышленного предприятия металлургического комплекса ОАО «Амур-металл» авторами в работе [1] была разработана методика построения (в двух вариантах), и предложены способы использования нечетких моделей компетенций в качестве базовой структуры экспертной системы. В качестве математического аппарата предлагается использовать теорию нечетких множеств, изложенную в работе [2]. Использование теории нечетких множеств и нечеткой логики при построении экспертной системы видится авторам целесообразным, поскольку эталонным поведением экспертной системы является именно поведение человека (эксперта), и в качестве языка «мышления» экспертной системы необходимо использовать язык, максимально приближенный к языку мышления человека.

Автоматизация процесса построения нечеткой модели компетенций

Первый вариант методики, подробно изложенный и проиллюстрированный примером (работа [1]), включает в себя формирование нечеткой модели компетенций на основе определения экспертной комиссией списка имен лингвистических переменных (названий компетенций), содержания лингвистических переменных (универсальное множество, количество и семантику лингвистических термов и т.д.), типа лингвистических переменных (входная или выходная), идентификации нелинейных зависимостей нечеткими базами знаний, а также обучения и тестирования полученных нечетких систем. Трудоемкость первого варианта высока, т.к. большое количество операций по синтезу нечеткой системы необходимо выполнять человеку. Второй вариант методики [1] представляет собой автоматизированное построение нечеткой модели компетенций на основе исходной статистической экспертной информации и является предметом обсуждения в первой части текущей работы. Все операции, выполняющиеся в первом варианте, также выполняются и во втором, но в автоматизированном или автоматическом режиме. В качестве среды разработки нечеткой системы авторами была выбрана среда Matlab и встроенные пакеты Fuzzy Logic Toolbox и Optimization Toolbox, в отдельных частях работы также используются авторские разработки, расширяющие вышеприведенные пакеты.

Исходной информацией для синтеза нечеткой модели в автоматизированном режиме служит таблица размерности $n+1 \times m$, содержащая экспертную информацию (см. табл. 1).

Таблица 1

Исходная экспертная информация

№	In ¹	In ²	...	In _i	...	In _n	Out ₁
1	in ₁₁	in ₂₁		ini ₁		inn ₁	out ₁₁
2	in ₁₂	in ₂₂		ini ₂		inn ₂	out ₁₂
m	in _{1m}	in _{2m}		in _{im}		inn _m	out _{1m}

В табл. 1 n —количество входных лингвистических переменных, m —объем экспертной информации, In_i—название i -й входной лингвистической переменной, Out₁—название первой (и в нашей системе единственной) выходной лингвистической переменной, in_{ij}— j -е значение i -й входной переменной, Out_{1j}— j -е предполагаемое значение первой выходной переменной, при соответствующих входных переменных. Необходимо отметить, что чем больше объем экспертной информации, тем имеется более полное представление для синтеза нечеткой системы.

В таблице 1 содержится исчерпывающая информация, необходимая для синтеза системы. Действительно, имеются имена входных и выходной лингвистических переменных, известно универсальное множество для каждой входной переменной, определяемое как $U_i = [\min (In_i), \max (In_i)]$, известно универсальное множество для выходной переменной, определяемое аналогично. Содержание лингвистических переменных, а именно количество термов и их семантику, можно определить двумя способами:

1) эксперт указывает количество термов для каждой лингвистической переменной, а также указывает их семантику путем задания типа функций принадлежности, которые, на его взгляд, лучше всего отражают содержание соответствующих лингвистических переменных;

2) количество термов и соответствующие им функции принадлежности определяются на основе проведения кластеризации исходных данных, например, алгоритмом горной кластеризации или нечетких c -средних [3].

Необходимо отметить, что второй способ целесообразнее использовать для построения классификаторов, при реализации второго способа для синтеза «классических» нечетких систем, в которых наименьшему и наибольшему значению из универсального множества соответствуют точки максимума функций принадлежности крайних термов, теряется смысловая нагрузка термов лингвистических переменных, т.е. прозрачность системы.

После того, как подготовлена исходная информация и определено содержание лингвистических переменных, необходимо идентифицировать нелинейные зависимости нечеткими базами знаний. В работе рассматриваются базы знаний типа Mamdani и Sugeno.

Идентифицировать нелинейную зависимость в автоматическом режиме базой знаний типа Sugeno предлагается с использованием Anfis-редактора. В основе технологии работы Anfis-редактора лежит идея пред-

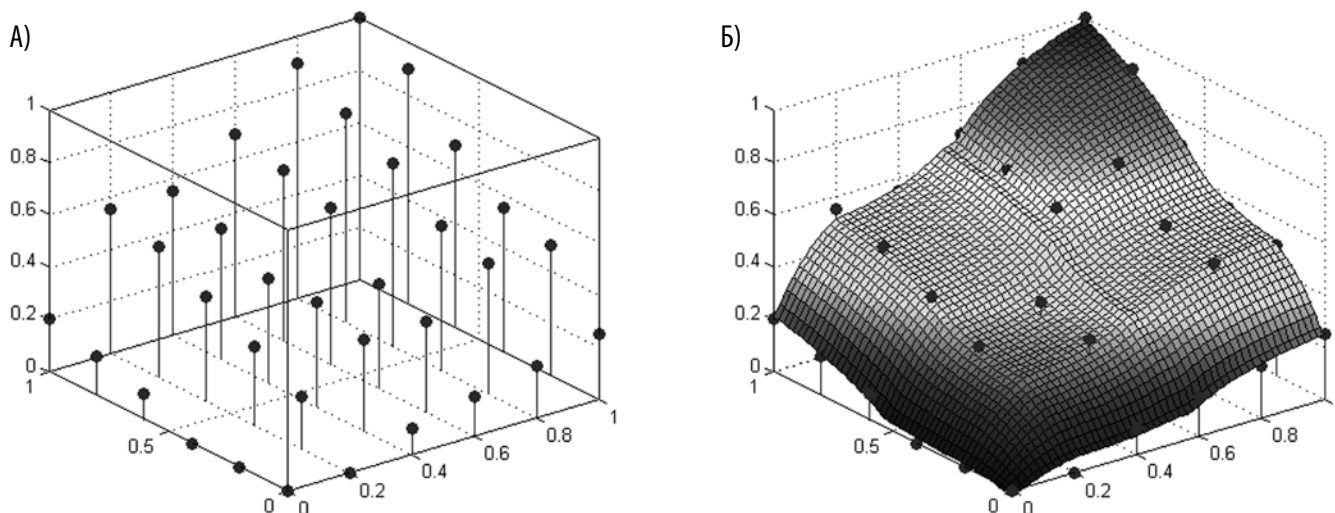


Рис. 1. Результаты моделирования: а — исходная экспертная информация; б — синтезированная нечеткая система типа Sugeno

ставления нечеткой системы в виде нейро-нечеткой сети — нейронной сети прямого распространения сигнала особого типа [3]. Архитектура нейро-нечеткой сети изоморфна нечеткой базе знаний. Использование в нейро-нечетких сетях дифференцируемых реализаций треугольных норм, а также гладких функций принадлежности, позволяет применять для настройки нейро-нечетких сетей быстрые алгоритмы обучения, основанные на методе обратного распространения ошибки.

Алгоритм работы Anfis-редактора следующий: на начальном этапе, на основе таблицы исходной экспертной информации и в зависимости от способа определения содержания лингвистических переменных, редактор вызовом функций genfis1 или genfis2 генерирует из данных исходную нечеткую систему типа Sugeno без использования кластеризации или с использованием субтрактивной кластеризации соответственно. Способы импликации, дефазификации, агрегации и т. д. устанавливаются по умолчанию, подробно синтаксис функций изложен в прим. 1. После того, как сформирована исходная система и структура нейро-нечеткой сети, редактор производит обучение системы, результатом которого является нахождение оптимальных значений параметров нечеткой системы согласно критерию оптимизации — минимизации невязки на обучающей выборке:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1}^M (y_r - F(P, W, X_r))^2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где: $(X_r, y_r), r = \overline{1, M}$ — обучающая выборка из M пар экспериментальных данных, связывающих входы $X_r = (x_{r,1}, x_{r,2}, \dots, x_{r,n})$ с выходом y в r -й паре обучающей выборки;

P — вектор параметров функций принадлежности термов входных и выходной переменных;

W — вектор весовых коэффициентов правил базы знаний;

$F(P, W, X)$ — результат вывода по нечеткой базе знаний с параметрами (P, W) при значении входов X_r .

Обучение осуществляется посредством вызова функции anfis (подробное описание функции, а также список входных и выходных аргументов представлен в прим. 1). В функции anfis предусмотрено два варианта оптимизации параметров исходной нечеткой системы: метод обратного распространения ошибки и гибридный алгоритм. Выбор того или иного алгоритма оптимизации зависит от степени адекватности его использования в конкретной ситуации. Результатом работы функции anfis является обученная нечеткая система (система с установленными оптимальными параметрами). В редакторе предусмотрено тестирование обученной нечеткой системы на тестовой выборке. Тестирование необходимо для проверки адекватности результатов нечеткой системы на значениях входных лингвистических переменных из универсальных множеств, не попавших в обучающую выборку, а также для исключения процесса переобучения системы.

Пример 1. Рассмотрим автоматический синтез нечеткой системы (нечеткой модели компетенций) и автоматическую идентификацию нелинейной зависимости базой знаний типа Sugeno для оценки компетентности сотрудника сортопрокатного цеха ОАО «Амур-металл», осуществляющего установку и наладку микропроцессорного оборудования фирмы Siemens.

В таблице 2 представлена исходная экспертная информация, где Out1 (имя выходной лингвистической переменной) — «наладчик микропроцессорного оборудования фирмы Siemens технологических участков сортопрокатного цеха», in¹ (имя первой входной лингвистической переменной) — «теоретические аспекты функционирования микроконтроллеров фирмы Siemens», in² (имя второй входной лингвистической переменной) — «практические навыки установки и настройки микроконтроллеров фирмы Siemens», m (объем экспертной информации) = 36, единицы измерения универсальных множеств для всех переменных — доли от максимально возможного уровня соответствующей компетенции.

Таблица 2

Экспертная информация для построения нечеткой модели компетенций для наладчика микропроцессорного оборудования

№	In1	In ²	Out1	№	In1	In ²	Out1	№	In1	In ²	Out1	№	In1	In ²	Out1
1	0	0	0	10	0.6	0.2	0.35	19	0	0.6	0.1	28	0.6	0.8	0.65
2	0.2	0	0	11	0.8	0.2	0.5	20	0.2	0.6	0.4	29	0.8	0.8	0.8
3	0.4	0	0.1	12	1	0.2	0.5	21	0.4	0.6	0.4	30	1	0.8	0.9
4	0.6	0	0.15	13	0	0.4	0	22	0.6	0.6	0.6	31	0	1	0.2
5	0.8	0	0.2	14	0.2	0.4	0.3	23	0.8	0.6	0.7	32	0.2	1	0.55
6	1	0	0.25	15	0.4	0.4	0.4	24	1	0.6	0.7	33	0.4	1	0.55
7	0	0.2	0	16	0.6	0.4	0.4	25	0	0.8	0.15	34	0.6	1	0.7
8	0.2	0.2	0.2	17	0.8	0.4	0.55	26	0.2	0.8	0.5	35	0.8	1	0.9
9	0.4	0.2	0.35	18	1	0.4	0.55	27	0.4	0.8	0.5	36	1	1	1

Графическое изображение исходной экспертной информации представлено на рисунке 1 а. Обработка экспертной информации, согласно вышеизложенному алгоритму с использованием Anfis-редактора, выполнялась со следующими параметрами синтеза системы:

- исходная система синтезирована методом решетчатого разбиения без проведения кластеризации исходных данных (функция *genfis1*);
- количество лингвистических термов для входных переменных — 3;
- тип функций принадлежности лингвистических термов — «trimf» (треугольная);
- обучение исходной нечеткой системы проводилась с использованием гибридного метода оптимизации;
- количество эпох обучения — 50.

В результате была синтезирована нечеткая система, результаты моделирования которой представлены на рисунке 1 б, оптимальные значения параметров системы, согласно критерию (1), полученные в результате обучения, представлены в таблице 3. При этом невязка на обучающей выборке составила 0,033.

Таблица 3

Оптимальные параметры обученной нечеткой системы

Имя терма	Параметры функции принадлежности терма	Имя терма	Параметры функции принадлежности терма	База знаний в индексном формате
In1mf1	[-0.5-0.1306 0.5353 0]	Out1mf1	-0.02622	11, 1 (1):1
In1mf ²	[0.002525 0.2256 1.006 0]	Out1mf ²	0.03755	12, 2 (1):1
In1mf ³	[0.5851 0.9795 1.5 0]	Out1mf ³	0.2159	13, 3 (1):1
In ² mf1	[-0.5-0.1009 0.5369 0]	Out1mf4	0.1218	21, 4 (1):1
In ² mf ²	[-9.35e- 005 0.3315 1.007 0]	Out1mf5	0.5359	22, 5 (1):1
In ² mf ³	[0.5268 0.9906 1.5 0]	Out1mf6	0.6791	23, 6 (1):1
	Out1mf7	0.2656	31, 7 (1):1	
	Out1mf8	0.6614	32, 8 (1):1	
	Out1mf9	1.009	33, 9 (1):1	

В результате автоматизации процесса построения нечетких систем значительно сокращается время, необходимое для синтеза нечеткой модели компетенций и формирования метазнаний.

Необходимо отметить, что одним из недостатков нечетких баз знаний типа Sugeno является сложность их интерпретации для человека, поэтому авторами была разработана функция *genfis4*, расширяющая пакет Fuzzy Logic Toolbox, позволяющая производить экстракцию из данных нечеткой системы типа Mamdani в автоматическом режиме. Кроме того, на основе использования нечетких систем типа Mamdani для построения нечетких моделей компетенций, возможна организация вывода в виде лингвистических термов, что позволяет приблизить язык «мышления» экспертной системы к языку мышления эксперта.

На первом этапе функция *genfis4* генерирует из данных систему нечеткого вывода типа Mamdani по методу решетчатого разбиения. Функции принадлежности входных и выходной переменной выбираются таким образом, чтобы равномерно покрыть диапазоны изменения данных. Объем базы знаний определяется как произведение мощностей терм-множеств входных и выходной переменных, следовательно, генерируются всевозможные правила. Веса правил принимаются равными нулю. Полученная система нечеткого вывода не отражает представленной данными закономерности. Она является исходной системой для обучения (на втором этапе работы функции *genfis4*) посредством нелинейной оптимизации, в результате которой идентифицируются заложенные в данные закономерности.

Нелинейная оптимизация проводится с помощью встроенной функции *fmincon* пакета Optimization Toolbox, решающей задачу поиска минимума нелинейной задачи с ограничениями:

$$\min_x f(x) \quad (2)$$

при условии что:

$c(x) < 0, ceq(x) = 0, A \cdot x \leq b, Aeq \cdot x = beq, lb < x < ub$
 где x, b, beq, lb, ub — векторы; A, Aeq — матрицы; $c(x), ceq(x)$ — есть функции; $f(x)$ — функция, возвращающая скаляр. Полное описание функции представлено в (прим. 1)

Синтаксис функции *genfis4* включает до четырех входных аргументов, *fis=genfis4 (data, numMfs, mftype, options)*, где:

data — матрица исходных данных, каждая строка которой является парой «входы-выход»;

numMfs — необязательный аргумент, задающий количество термов для оценки входных и выходной переменных. Значение по умолчанию — 3;

mftype — необязательный аргумент, задающий типы функций принадлежности нечетких термов входных и выходной переменной. Допустимые значения: 'trimf' — треугольная, 'gaussmf' — Гауссова. Значение по умолчанию — 'trimf';

options — структура параметров настройки для нелинейной оптимизации функцией *fmincon*.

Результаты автоматической идентификации нели-

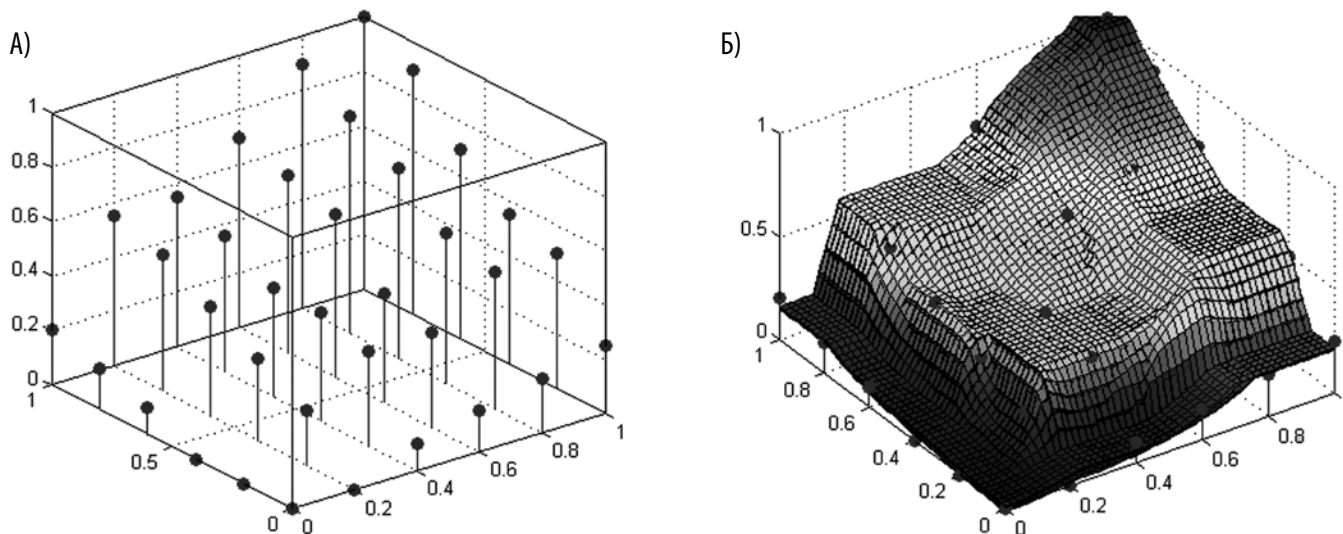


Рис. 2. Результаты моделирования: а — исходная экспертная информация; б — синтезированная нечеткая система типа Mamdani

нейной зависимости из примера 1 (см. табл. 1) функцией *genfis4* представлены на рисунке 2. Оптимальные параметры, согласно критерию (1), синтезированной системы представлены в таблице 4.

При этом невязка на обучающей выборке, согласно критерию (1), составила 0,027.

Автоматическая идентификация проводилась со следующими параметрами функции *genfis4*:

- data — согласно таблице 1;
- numMfs — 3;
- mftype — 'trimf';
- options = [];
- options = optimset ('Display', 'iter');
- options. DiffMinChange = 0.0001;
- options. DiffMaxChange = 0.2;
- options. LargeScale = 'off';
- options. MaxIter = 50;

Таблица 4

Оптимальные параметры обученной нечеткой системы

Имя терма	Параметры функции принадлежности терма	База знаний в индексном формате				
			№	Правило	№	Правило
In1mf1	[-0.40 0.252 0]	1	11, 1 (1):1	10	22, 2 (0.035):1	
In1mf²	[0.1 0.4247 0.9 0]	2	12, 1 (0.26382):1	11	23, 2 (0.05784):1	
In1mf³	[0.29451 1.4 0]	3	13, 1 (0.08081):1	12	31, 2 (0.02124):1	
In²mf1	[-0.40 0.4487 0]	4	21, 1 (0.26419):1	13	32, 2 (0.08019):1	
In²mf²	[0.1 0.3051 0.9 0]	5	22, 1 (0.26585):1	14	22, 3 (0.21133):1	
In²mf³	[0.27711 1.4 0]	6	23, 1 (0.09663):1	15	23, 3 (0.224):1	

Out1mf1	[-0.58-0.1 0.1696 0]	7	31, 1 (0.11763):1	16	32, 3 (0.26223):1
Out1mf²	[0.02 0.498 0.998 0]	8	32, 1 (0.11168):1	17	33, 3 (1):1
Out1mf³	[0.9947 1.1 1.58 0]	9	13, 2 (0.00813):1		

Разработанная авторами методика автоматической идентификации нелинейных зависимостей (представленных экспертными данными) нечеткими системами для построения моделей компетенций позволяет значительно сократить время формирования метазнаний и улучшить качество синтезируемых систем, согласно критерию (1), посредством проведения процесса обучения.

В ходе проведения исследования авторами были установлены некоторые особенности автоматической идентификации нечеткими системами Mamdani и Sugeno, позволяющие сделать выводы о целесообразности использования того или иного типа базы знаний в конкретной ситуации.

При условии, что исходная экспертная информация репрезентативна и представлена с достаточным шагом дискретизации, нечеткие системы типа Sugeno легче поддаются обучению, т. е. качественнее согласно критерию (1). Это обусловлено меньшей размерностью задачи оптимизации, т. к. выходная лингвистическая переменная в нечеткой базе типа Sugeno представлена в виде констант или линейных выражений. Нечеткие системы типа Mamdani лучше поддаются интерпретации для человека, т. к. выходная лингвистическая переменная представлена в виде лингвистических термов, семантика которых определяется соответствующими функциями принадлежности. Легкость в интерпретации позволяет организовать процесс производства мотивированного заключения.

Распределенная нечеткая модель компетенций с классификацией надежности решения Нечеткая система, построенная на основе экспертной информации, представленная мнением только одного эксперта (таблица 1), является в той или иной мере

субъективной. Для повышения объективности системы необходимо в качестве исходных данных использовать мнения нескольких экспертов. Исходными данными для построения объективной нечеткой системы является таблица 5. Все обозначения таблицы 5 аналогичны обозначениям таблицы 1, индекс r — число экспертов.

Таблица 5

Исходная экспертная информация для объективной системы

№	In1	...	Inn	Out11	...	Out1r
1	in11	...	inn1	out111	...	out11r
2	in12	...	inn ²	out121	...	out12r
		
m	in1m	...	innm	out1m1	...	out1mr

Число экспертов определяется исходя из конкретных условий задачи и критериев, предъявляемых к решению.

Подготовительным этапом построения системы является определение консолидированных значений выходной переменной. Самым простым таким способом является определение среднего значения:

$$\overline{out_{1i}} = \frac{out_{1i}^1 + out_{1i}^2 + \dots + out_{1i}^r}{r} \quad (3)$$

Либо среднего взвешенного:

$$\overline{out_{1i}} = \frac{\omega_1 out_{1i}^1 + \omega_2 out_{1i}^2 + \dots + \omega_r out_{1i}^r}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_r} \quad (4)$$

где ω_1 — вес мнения i -го эксперта.

В итоге формируются m усредненных значений выходной переменной, по которым совместно со значениями входных переменных строится нечеткая система путем проведения идентификации нелинейной зависимости нечеткой базой знаний Sugeno или Mamdani, согласно вышеприведенным методикам автоматического синтеза.

Несомненно, построенная таким образом система будет более объективна, чем система, построенная на основании мнения только одного эксперта. Но процедура усреднения экспертных данных на этапе формирования входной матрицы для синтезируемой нечеткой системы оставляет без внимания заложенную в экспертные данные информацию, а именно, степень согласованности мнений экспертов. Другими словами, не учитывается рассеивание предполагаемых r экспертами значений выходной переменной по каждой строчке таблицы 5. Действительно, информация о степени согласованности решения очень важна, т. к. опасно опираться на решение, основанное на слишком разных мнениях экспертов.

Для построения объективной системы и учета степени согласованности экспертов авторами была разработана методика синтеза распределенной системы нечеткого вывода с классификацией по степени надежности. Степень надежности или класс надежности — определяется трехмерной системой нечеткого дискретного вывода нечетким классификатором.

Входными переменными классификатора являются количество экспертов r и степень согласованности их решения.

Методика синтеза распределенной системы с классификацией надежности решения:

Проводится автоматическая идентификация нелинейных зависимостей r подсистемами нечеткого вывода, где r — количество экспертов, т. е. мнению каждого эксперта соответствует своя нечеткая подсистема. При построении нечетких подсистем определяется RMSE и проверяется на соответствие допустимой невязки на обучающей выборке. Если необходимо, то определяются веса мнений экспертов.

Синтезируется нечеткий классификатор. Классификатор имеет две входные переменные: In1 — количество экспертов, In² — отношение стандартного (среднеквадратического) отклонения к размаху универсального множества выходной переменной, т. е. нормированное среднеквадратичное отклонение. In² — является мерой определения степени согласованности мнений экспертов. Значение нормированного среднеквадратического отклонения в точке i определяется по формуле

$$S_{norm\ i} = \frac{\sqrt{\frac{1}{r} \sum_{k=1}^r (out_{1i}^k - \overline{out_{1i}})^2}}{\max(out_{1i}) - \min(out_{1i})} \quad (5)$$

Необходимо отметить, что выход нечеткого классификатора является дискретным, с количеством дискрет, равным количеству классов надежности. Нечеткий классификатор представляет собой систему нечеткого вывода типа Sugeno, с тем основным отличием, что процедура определения четкого выходного значения — процедура дефазификации — заменена процедурой отыскания выходного лингвистического термина в правиле с максимальной степенью выполнения. Решение выдается в виде имени найденного лингвистического термина.

Для синтеза распределенной нечеткой системы с классификацией решения по степени надежности авторами была разработана функция genfisD. Синтаксис функции genfisD включает до 7 входных аргументов, [sub_fis, fis_class] = genfisD (exp_number, data, numMfs, mftype, trnopt, optmethod, class_opt), где:

exp_number — количество экспертов;

data — матрица исходных данных, в формате таблицы 5;

numMfs — необязательный аргумент, задающий количество термов для оценки входных и выходной переменных. Значение по умолчанию — 3;

mftype — необязательный аргумент, задающий типы функций принадлежности нечетких термов входных и выходной переменной. Допустимые значения: 'trimf' — треугольная, 'gaussmf' — Гауссова. Значение по умолчанию — 'trimf';

trnopt — вектор параметров настройки, структура и значения вектора аналогичны одноименному вектору в функции anfis (см. прим. 1);

optmethod — метод оптимизации; 0 — гибридный, 1 — метод обратного распространения ошибки;

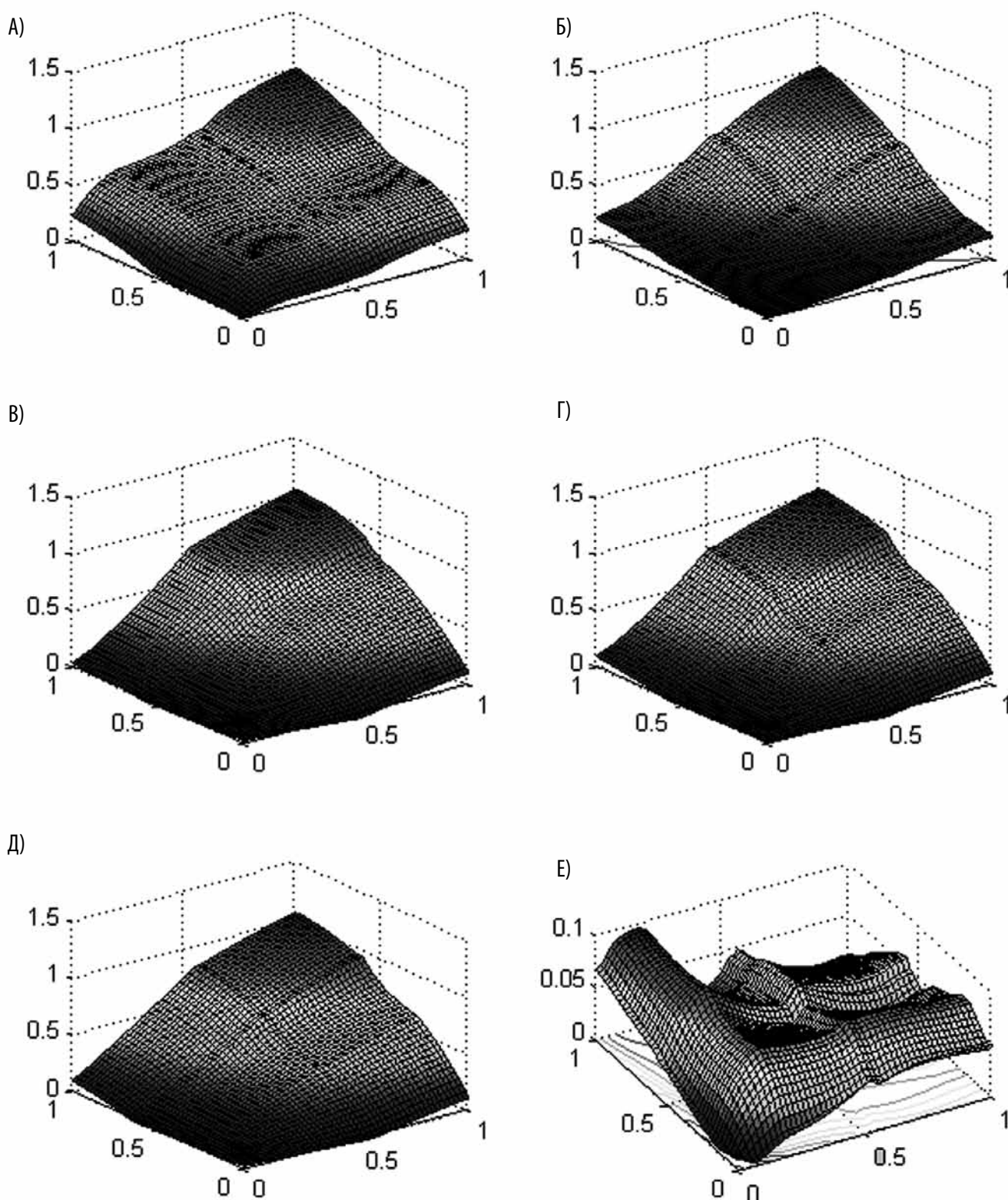


Рис. 3. Результаты моделирования распределенной системы
 а-д — подсистемы № 1-5 соответственно; е — график распределения стандартного отклонения

class_opt—вектор параметров настройки классификатора:
 class_opt (1)—количество классов;
 class_opt (2)—минимальное допустимое количество экспертов;
 class_opt (3)—максимальное допустимое количество

экспертов;
 class_opt (4)—минимальное допустимое s_norm системы;
 class_opt (5)—максимальное допустимое s_norm системы;
 Функция genfisD может вернуть два выходных

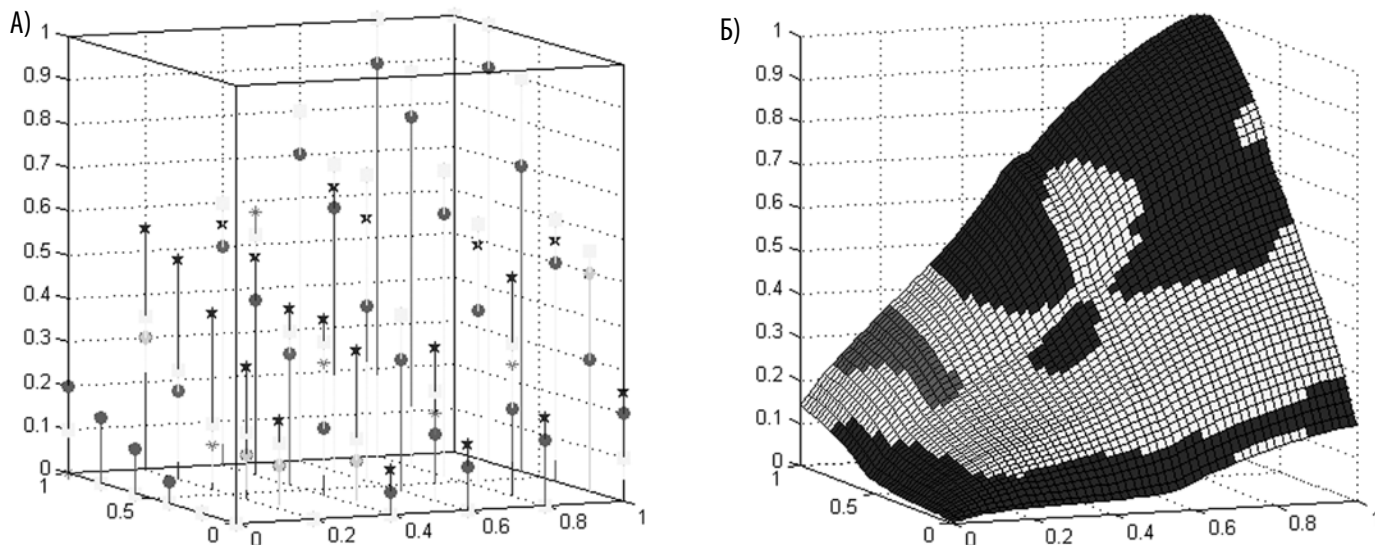


Рис. 4. Результаты моделирования распределенной системы:

а — исходная экспертная информация;

б — поверхность распределения интегрированного среднего значения с классификацией по зонам надежности (1 класс — чёрный цвет; 2 класс — белый цвет; 3 класс — серый цвет)

аргумента:

1) `sub_fis` — $1 \times r$ вектор структур, каждая из которых представляет собой настроенную подсистему нечеткого вывода, построенную на основании мнения одного эксперта.

2) `fis_class` — настроенная система дискретного нечеткого вывода — нечеткий классификатор.

Кроме того функция `genfisD` автоматически производит моделирование полученной распределенной системы. Результаты моделирования включают в себя графики вывода по всем нечетким подсистемам, график изменения стандартного отклонения, а также график интегрированного вывода распределенной системы в виде поверхности средних значений с классификацией по степени надежности. Графически классификация изображается в виде s — цветов, где s — количество классов.

Для осуществления логического вывода по нечеткой распределенной системе разработана функция `evalfisD`, которая представляет собой модифицированную стандартную функцию `evalfis` (см. прим. 1). Отличие заключается в том, что `evalfisD` осуществляет нечеткий логический вывод одновременно по r нечетким подсистемам, т. е. по всем выходным аргументам функции `genfisD`, осуществляет интегрированный вывод в виде среднего значения и производит классификацию значений.

Синтаксис функции: `[output, class, out_sub_fis] = evalfisD (input, fis_class, sub_fis)`, где:

`output` — матрица усредненных значений выходной переменной по всем нечетким подсистемам, полученная на основе входных данных `input`;

`class` — матрица значений выходной переменной нечеткой системы `fis_class`, получаемая в результате нечеткого вывода для данных `input`;

`out_sub_fis` — матрица значений выходных переменных по каждой подсистеме, размерность матри-

цы $m \times r$, где m — количество строк входных данных, r — количество экспертов. Каждый столбец соответствует i -й нечеткой подсистеме;

`input` — исходные данные, по которым необходимо произвести нечеткий вывод;

`fis_class`, `sub_fis` — аргументы, аналогичные одноименным аргументам функции `genfisD`.

Иллюстрация работы функций `genfisD` и `evalfisD` представлена в примере 2.

Пример 2. Первоначальные условия и задачи те же, что и в примере 1. Исходная экспертная информация пяти экспертов представлена в таблице 6.

Таблица 6

Исходная экспертная информация для примера 2

№	In1	In2	Out11	Out12	Out13	Out14	Out15
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0.2000	0	0	0	0	0	0
3	0.4000	0	0.1000	0.0500	0	0	0
4	0.6000	0	0.1500	0.1000	0	0	0
5	0.8000	0	0.2000	0.1500	0	0	0
6	1.0000	0	0.2500	0.2000	0.1000	0.1000	0.1000
7	0	0.2000	0	0	0	0	0
8	0.2000	0.2000	0.2000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1500
9	0.4000	0.2000	0.3500	0.1000	0.1000	0.1000	0.1500
10	0.6000	0.2000	0.3500	0.1500	0.2000	0.2500	0.2500
11	0.8000	0.2000	0.5000	0.2000	0.3000	0.3500	0.3500
12	1.0000	0.2000	0.5000	0.3000	0.5000	0.5000	0.5500
13	0	0.4000	0	0.0500	0	0	0
14	0.2000	0.4000	0.3000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1500

15	0.4000	0.4000	0.4000	0.1500	0.3000	0.3500	0.3500
16	0.6000	0.4000	0.4000	0.3000	0.4000	0.4000	0.4000
17	0.8000	0.4000	0.5500	0.4000	0.6000	0.6000	0.6000
18	1.0000	0.4000	0.5500	0.5000	0.6000	0.6000	0.6000
19	0	0.6000	0.1000	0.1000	0	0	0
20	0.2000	0.6000	0.4000	0.1500	0.1000	0.1500	0.1500
21	0.4000	0.6000	0.4000	0.3000	0.3000	0.3500	0.3500
22	0.6000	0.6000	0.6000	0.4000	0.7000	0.7000	0.7000
23	0.8000	0.6000	0.7000	0.6000	0.7000	0.7000	0.7000
24	1.0000	0.6000	0.7000	0.7000	0.9000	0.9000	0.9000
25	0	0.8000	0.1500	0.1500	0	0	0
26	0.2000	0.8000	0.5000	0.2000	0.2000	0.2500	0.2500
27	0.4000	0.8000	0.5000	0.4000	0.6000	0.5500	0.5500
28	0.6000	0.8000	0.6500	0.6000	0.7000	0.7000	0.7000
29	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	0.9000	0.9000	0.9000
30	1.0000	0.8000	0.9000	0.9000	1.0000	1.0000	1.0000
31	0	1.0000	0.2000	0.2000	0	0.1000	0.1000
32	0.2000	1.0000	0.5500	0.3000	0.3000	0.3000	0.3500
33	0.4000	1.0000	0.5500	0.5000	0.5000	0.6000	0.6000
34	0.6000	1.0000	0.7000	0.7000	0.8000	0.8000	0.8000
35	0.8000	1.0000	0.9000	0.9000	1.0000	1.0000	1.0000
36	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Функция genfisD, вызванная с параметрами:

```
class_opt
class_opt (1) =3;
class_opt (2) =1;
class_opt (3) =10;
class_opt (4) =0;
class_opt (5) =0,1;
optmethod = 1;
```

все остальные параметры — по умолчанию; сгенерировала распределенную нечеткую систему, выдав результаты моделирования, представленные на рисунке 3 и 4. Графики вывода по пяти нечетким подсистемам представлены на рисунках 3 а—д. Невязка на обучающей выборке для каждой из пяти нечетких подсистем находится в пределах допустимых значений 0,025-0,03. Поверхность распределения нормированного среднеквадратичного отклонения представлена на рисунке 3 е. Максимальное значение нормированного среднеквадратичного отклонения составляет 0,1.

На основании анализа поверхностей вывода нечетких подсистем и нормированного среднеквадратичного отклонения специалист, проектирующий распределенную нечеткую систему, принял решение принять распределенную систему, т. е. вывод по распределенной нечеткой системе осуществлять согласно полученной зависимости, график которой представлен на рисунке 4 б. Исходная экспертная информация представлена на рисунке 4 а. Таким образом, синте-

зирована распределенная нечеткая система с классификацией решения по степени надежности, позволяющая определить значение выходной переменной на множестве значений входных переменных и классифицировать надежность полученного решения. В данном примере наивысший класс надежности — 1 (синий), низший — 3 (красный). Но тем не менее все три класса удовлетворяют требованиям качества синтезируемой системы.

Все элементы распределенной системы являются открытыми, т. е. на любом этапе проектирования и работы распределенную систему можно корректировать с помощью стандартных средств пакетов Fuzzy Logic Toolbox и Optimization Toolbox.

Пример вывода функции evalfisD для полученной распределенной системы на входных данных [0.25 0.53; 0.15 1] представлен ниже:

```
>> [output, class, out_sub_fis] =evalfisD ([0.25 0.53;
0.15 1],fis_class, sub_fis)
```

```
output =
0.2132
0.2806
class =
2
3
out_sub_fis =
0.3658 0.1511 0.1649 0.1791 0.2050
0.4696 0.2503 0.1820 0.2333 0.2678
```

Заключение

Разработанные алгоритмы и способы автоматизации синтеза нечетких подсистем, представленные в работе, позволяют значительно сократить время и упростить процесс проектирования и отладки экспертной системы на базе нечеткой модели компетенций. Использование экспертной системы для оценки и формирования компетентности технического персонала промышленного предприятия в условиях инновационных изменений позволит повысить оперативность и объективность управленческих решений, а также создаст условия для эффективного прогнозирования инновационного развития предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горькавый, М. А. Синтез нечеткой модели компетенций технического персонала промышленного предприятия/М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Информатика и системы управления. — 2009. — № 1 (25).
2. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений/Л. А. Заде. — М.: Мир, 1976.
3. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB/С. Д. Штовба. — М.: Горячая линия—Телеком, 2007.

ПРИМЕЧАНИЕ

1. Documentation for MathWorks Products, R2009b. Access: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.html>

Стельмашук С. В.

05.13.06

S. V. Stelmaschuk

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ УПРОЩЁННОЙ МОДЕЛИ ESTIMATION OF CONTROL SYSTEM QUALITY USING A SIMPLIFIED MODEL



**Стельмашук Сергей
Валерьевич** —

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре

государственного технического университета.

E-mail: rukdpsv@rambler.ru

Sergey V. Stelmaschuk — PhD in Engineering, Assistant Professor at the Department of Electro drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rukdpsv@rambler.ru

Аннотация: Предложена методика оценки качества системы автоматического регулирования, основанная на замене замкнутой структуры исследуемой системы на упрощённую модель – инерционным звеном второго порядка. Определены аналитические формулы, связывающие параметры модели и частотные показатели исследуемой системы. Приведён численный пример.

Summary: An estimation procedure for the quality of a control systems is proposed, based on a change of ϕ closed model of the system under analysis to a simplified model – i.e. a second order inertial link. Defined are the analytic formulas that associate model parameters with frequency parameters of the analyzed system. A number of examples are given.

Ключевые слова: система регулирования, показатели качества, инерционное звено второго порядка, переходный процесс

Keywords: control system, quality ratings, second order inertial link, transient process.

Введение

В теории автоматического управления задача синтеза ставится как обратная к задаче анализа. Поэтому, если удастся определить аналитическую не трансцендентную связь между математическим описанием и показателями качества системы регулирования, то можно вывести наиболее простые и удобные способы синтеза или настройки регуляторов системы регулирования, используемые как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации системы регулирования.

Во многих источниках [1; 2; 3] рассматриваются вопросы параметрической идентификации объекта управления, где на основе экспериментально полученной переходной или импульсной характеристики объекта определяются параметры приближённой модели объекта управления. При этом основным критерием определения приближенной модели является схожесть временных характеристик на выходе модели и на выходе объекта. Данные способы параметрической идентификации используются в методиках настройки регуляторов с заданной структурой. Однако в таком подходе существует один существенный недостаток: если модель схожа с объектом управления по переходной характеристике, т.е. когда на вход подаётся ступенчатое воздействие, то это не значит, что модель будет вести себя так же, как и объект в замкнутой системе регулирования, где сигнал управления далеко отличен от ступенчатого вида. Поэтому данный подход является приближённым и даёт грубую настройку регуляторов. Другим недостатком данного подхода является ограниченность методики: он распространяется только на объекты с большой инерционностью, у которых переходные характеристики носят аperiodический характер.

В данной работе представлен другой подход. Во-первых, моделью заменять не объект управления, а всю систему регулирования. Во-вторых, в качестве модели использовать не аperiodическое звено 2-го порядка с запаздыванием, а инерционное звено 2-го порядка, допускающее как аperiodический, так и колебательный характер переходных характеристик всей системы регулирования.

При таком подходе ставится задача: по математическому описанию разомкнутой системы регулирования определить параметры приближённой модели замкнутой системы регулирования для оценки качества переходных характеристик системы. Оценка переходных характеристик осуществляется с помощью следующих параметров: статической точности ϵ , перерегулирования σ и времени переходного процесса $t_{пер}$, а в качестве параметров разомкнутой системы регулирования используются частотные характеристики: частота среза $\omega_{ср}$ и значение фазы при частоте среза $\Phi_{ср}$, которая связана с запасом устойчивости по фазе $\Phi_{ср} = \Delta\Phi - \pi$.

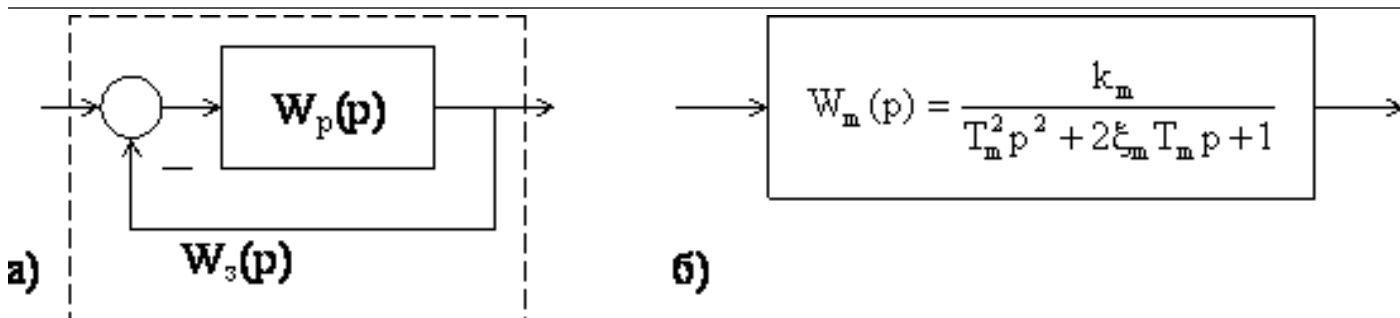


Рис. 1. Исследуемая система (а) ставится в соответствие с инерционным звеном 2-го порядка (б)

Постановка задачи

Задана передаточная функция разомкнутой системы $W_p(p)$ автоматического регулирования с единичной отрицательной обратной связью. В соответствие передаточной функции замкнутой системы $W_z(p)$ ставится упрощённая модель второго порядка $W_m(p)$, в качестве которой выступает инерционное звено 2-го порядка (см. рис. 1).

Необходимо определить параметры модели $W_m(p)$ такими, чтобы прямые показатели качества модели были наименее приближённо равны прямым показателям качества системы регулирования $W_z(p)$.

Рассмотрим разомкнутую передаточную функцию модели $W'_m(p)$, которая является прообразом разомкнутой передаточной функции системы $W_p(p)$. Параметры модели k_m , T_m и ξ_m определяются на основе равенства частоты среза ω_{cp} и значения фазовой частотной характеристики (ФЧХ) при частоте среза φ_{cp} исследуемой системы и модели.

Таким образом, решаются две задачи: определение параметров модели k_m , T_m и ξ_m по частотным параметрам разомкнутой передаточной функции исследуемой системы ω_{cp} и φ_{cp} и оценка прямых показателей качества с помощью параметров модели. При этом исследуются два случая: статическая и астатическая системы.

Определение параметров модели

Для исследуемой системы со статической точностью ϵ передаточная функция модели будет иметь коэффициент пропорциональности

$$k_m = 1 - \epsilon.$$

Тогда передаточная функция разомкнутой модели равна

$$W'_m(p) = \frac{W_m(p)}{1 - W_m(p)} = \frac{1 - \epsilon}{T_m^2 p^2 + 2\xi_m T_m p + \epsilon}.$$

Значение статической точности можно определить следующим образом

$$\epsilon = 1 - k_z,$$

где $k_z = \frac{k_p}{1 + k_p}$ – коэффициент усиления замкнутой статической исследуемой системы, при этом

$k_z = 1$ – коэффициент усиления замкнутой астатической исследуемой системы;

$k_p = W_p(0)$ – коэффициент усиления разомкнутой статической исследуемой системы.

По заданной передаточной функции разомкнутой системы определяется частота среза решением уравнения

$$|W_p(j\omega_{cp})| = 1.$$

Данное уравнение для точности вычисления необходимо решить численным методом. Для реальных объектов данная задача решается экспериментальным способом. По значению ω_{cp} вычисляется значение ФЧХ разомкнутой системы при частоте среза $\varphi_{cp} = \arg(W_p(j\omega_{cp}))$.

Для рассчитанных значений частоты среза ω_{cp} и ФЧХ при частоте среза φ_{cp} исследуемой системы составим систему уравнений для разомкнутой передаточной функции модели

$$\left| \frac{1 - \epsilon}{T_m^2 (j\omega_{cp})^2 + 2\xi_m T_m j\omega_{cp} + \epsilon} \right| = 1$$

$$\varphi_{cp} = \arg \left(\frac{1 - \epsilon}{T_m^2 (j\omega_{cp})^2 + 2\xi_m T_m j\omega_{cp} + \epsilon} \right).$$

Решая данную систему уравнений, получим формулы для вычисления параметров модели

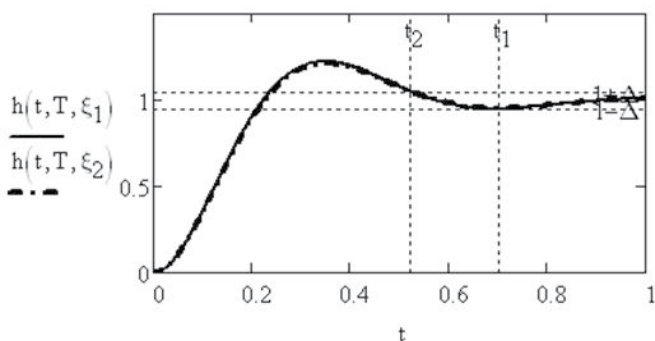


Рис. 2. Кривые переходной функции колебательного звена при почти равных коэффициентах демпфирования

$$\xi_m = \frac{(\varepsilon - 1) \sin \varphi_{cp}}{2 \sqrt{\varepsilon - \cos \varphi_{cp} + \varepsilon \cos \varphi_{cp}}} \quad (1)$$

$$T_m = \frac{\sqrt{\varepsilon - \cos \varphi_{cp} + \varepsilon \cos \varphi_{cp}}}{\omega_{cp}}$$

Для астатической системы данные формулы примут вид при $\varepsilon = 0$

$$\xi_m = \frac{-\sin \varphi_{cp}}{2 \sqrt{-\cos \varphi_{cp}}} \quad (2)$$

$$T_m = \frac{\sqrt{-\cos \varphi_{cp}}}{\omega_{cp}}$$

При этом необходимо учесть, что значение φ_{cp} для астатической системы должно изменяться в пределах $-\pi < \varphi_{cp} < -\frac{\pi}{2}$.

Расчёт прямых показателей качества

Значение перерегулирования определяется однозначной формулой, которая хорошо представлена в [4]:

$$\sigma = e^{-\frac{\xi_m \pi}{\sqrt{1 - \xi_m^2}}} \quad (3)$$

Из формулы видно, что перерегулирование зависит только от коэффициента демпфирования ξ_m .

Определить время переходного процесса однозначной формулой сложно, так как её значение резко изменяется при некоторых значениях коэффициента демпфирования ξ_m в пределах от 0 до 1. Такой пример продемонстрирован на рисунке 2, где изображены два почти одинаковых переходных процесса с разными коэффициентами демпфирования, которые незначительно отличаются друг от друга: $\xi_1 = 0.43$, $\xi_2 = 0.44$.

Время переходного процесса здесь определено прямым способом. Видно, что значение времени переходного процесса, соответствующее для каждой из кривой, значительно различается: $t_1 = 0.703$ с и $t_2 = 0.523$ с.

Такие скачки значения $t_{\text{пер}}$ не позволяют получить однозначную формульную зависимость между параметрами модели и значением $t_{\text{пер}}$. Поэтому время переходного процесса целесообразнее оценить приближительной формулой, полученной на основе корневого показателя степени устойчивости η , которая определяется расстоянием до мнимой оси ближайшего корня

$$t_{\text{пер}} \approx \frac{1}{\eta} \ln \frac{1}{\Delta} \quad (4)$$

где $\eta = \frac{\xi_m}{T_m}$ – при $0 < \xi_m < 1$;

$$\eta = \frac{\xi_m - \sqrt{\xi_m^2 - 1}}{T_m} \quad \text{– при } \xi_m \geq 1;$$

Δ – относительная величина зоны установившегося процесса.

Для вышеприведённого примера время переходного процесса по приближительным формулам составит соответственно $t_1' = 0.697$ с и $t_2' = 0.681$ с. Видно, что эти значения мало отличаются друг от друга.

На рисунке 3 представлены зависимости времени переходного процесса, рассчитанные по прямому способу $t_{\text{пр}}$ и по упрощённой формуле $t_{\text{у}}$ от изменения значения ξ_m . На рис. 3 а зависимости получены для величины $\Delta = 0.05$, на рис. 3 б – зависимости при $\Delta \rightarrow 0$. Видно, что кривая упрощённой зависимости отражает характер изменения времени переходного процесса, определённого простым способом.

Пример

Рассмотрим пример оценки некоторой системы регулирования с передаточной функцией разомкнутой системы

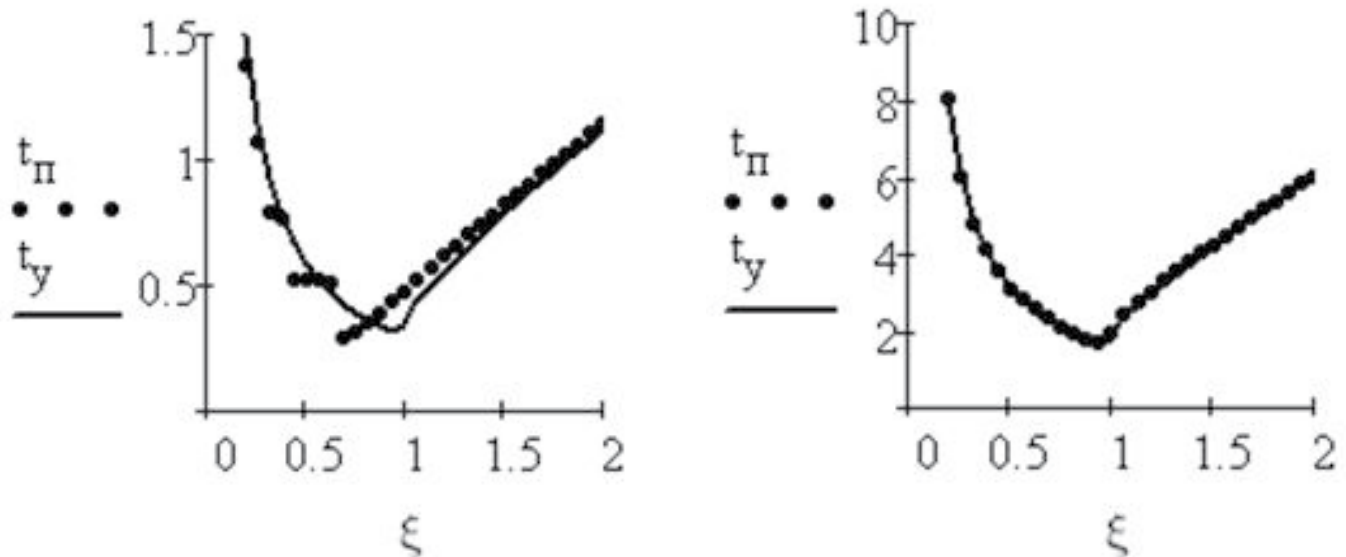


Рис. 3. Оценка времени переходного процесса прямым способом t_{π} и по упрощенной формуле t_y при величине зоны установившегося процесса $\Delta = 0.05$ (а) и $\Delta \rightarrow 0$ (б)

$$W_p(p) = \frac{10(0.3p + 1)}{(0.01p + 1)(0.1p + 1)(0.5p + 1)(p + 1)}$$

Приравнивая АЧХ разомкнутой системы единице, определяем частоту среза $\omega_{cp} = 5.629 \text{ с}^{-1}$. Подставляя данное значение в ФЧХ разомкнутой системы, получим значение фазы при частоте среза $\varphi_{cp} = -2.157 \text{ рад}$. По данным частотным параметрам исследуемой системы с помощью формул (1) определим параметры модели $\xi_m = 0.491$ и $T_m = 0.137$.

Для исследуемой системы определим показатели качества прямым способом: $\sigma_{\pi} = 0.179$ и $t_{\pi} = 0.74 \text{ с}$.

Для модели – расчёт показателей качества по формулам (3) и (4): $\sigma_y = 0.17$ и $t_y = 0.835 \text{ с}$. Графики переходных процессов исследуемой системы $h(t)$ и модели $h'(t)$ представлены на рисунке 4.

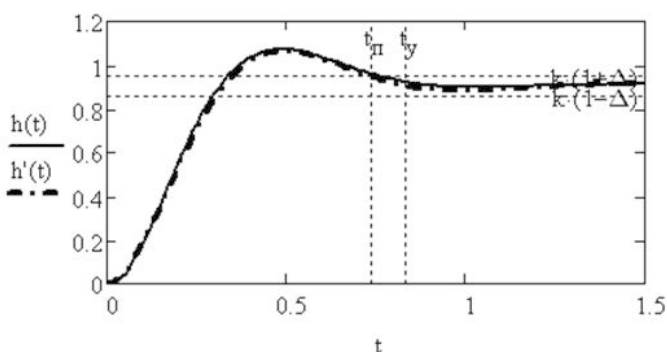


Рис. 4. Переходные процессы исследуемой системы $h(t)$ и модели – инерционного звена 2-го порядка $h'(t)$

Выводы

На рисунке 3 видно, что кривые переходных процессов исследуемой системы и модели практически не отличаются. Это означает, что использование инерционного звена 2-го порядка в качестве модели системы автоматического регулирования позволяет использовать однозначную аналитическую связь между прямыми показателями качества и математическим описанием объекта управления в задаче синтеза регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аркадьев, В. Ю. Проектирование по теории автоматического управления / В. Ю. Аркадьев, А. И. Папченко, А. Г. Попруга, В. П. Боярчук. / Под общ. ред. Аркадьева В. Ю. - Херсон: Херсонский государственный технический университет, 2002. - 272 с.
2. Денисенко, В. ПИД-регуляторы вопросы реализации. Ч.2. Расчёт параметров регулятора / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. - 2008. - N 1. - С. 86-99.
3. Мазуров, В. М. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Ч. 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах регулирования / В. М. Мазуров // Компаненты и технологии. - 2003. - N 5. - С. 114-118.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 656 с.

Комаровский Ю. А.

05.13.01

Yu. A. Komarovsky

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ
ДОПЛЕРОВСКИМИ СПУТНИКОВЫМИ
НАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ
IMPROVING THE ACCURACY OF THE
MEASUREMENT OF COORDINATES
OBTAINED USING DOPPLER SATELLITE
NAVIGATION SYSTEM**



Комаровский Юрий Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры теории и устройства судна Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского (г. Владивосток). E-mail: Komarovskiy@msun.ru.

Yuriy A. Komarovsky — PhD in Engineering, Senior Researcher at the Department of Ship Theory and Naval Architecture of Admiral G. I. Nevelsky State Maritime University (city of Vladivostok) E-mail: Komarovskiy@msun.ru.

Аннотация: Обнаружено присутствие суточной составляющей погрешности координат, определяемых доплеровской спутниковой навигационной системой. Предложен способ устранения этой погрешности и оценена эффективность этого способа.

Summary: We have discovered a 24-hour error component in the measurements of coordinates obtained using a Doppler satellite navigation system. For this error component, we suggest an error correction method with estimation of its efficiency.

Ключевые слова: КОСПАС-САРСАТ, Транзит, систематическая погрешность.

Keywords: KOSPAS-SARSAT, Transit, systematic error.

Главную роль в обеспечении безопасности судов и самолётов, их экипажей и пассажиров выполняет международная спутниковая система поиска и спасения КОСПАС-САРСАТ. В системе КОСПАС-САРСАТ определение координат аварийного радиобуя (АРБ) происходит доплеровским способом. Чтобы сократить время поиска терпящих бедствие, необходимо вычис-

лять с высокой точностью координаты активированного АРБ. Данная статья предлагает один из способов повышения точности за счёт компенсации систематических погрешностей, возникающих вследствие суточного хода параметров земной ионосферы.

Из-за относительной скорости v_r перемещения искусственного спутника Земли (ИСЗ) по отношению к АБР всегда имеет место отличие излучаемой частоты радиосигнала АБР f_0 от принимаемой спутником частоты f_s . Это отличие выражается доплеровским смещением частоты F_D ,

$$F_D = f_s - f_0, \quad F_D = -f_0 \frac{v_r(t)}{c} = -\frac{1}{\lambda} v_r(t), \quad (1)$$

где c – скорость распространения электромагнитных колебаний на трассе АБР – ИСЗ, λ – длина излучаемой АБР радиоволны.

Относительная скорость сближения $v_r(t)$ является первой производной по времени модуля радиус-вектора с началом в точке расположения АБР, то есть

$$v_r(t) = \dot{r}(t). \quad (2)$$

Понятно, что в момент кульминации спутника относительно АБР

$$v_r(t) = 0, \quad F_D = 0, \quad \dot{r}(t) = 0.$$

Если интегрировать доплеровское смещение частоты на интервале времени от t_1 до t_2 , то согласно (1) и (2) получим

$$\int_{t_1}^{t_2} F_D(t) dt = -\frac{1}{\lambda} \int_{t_1}^{t_2} \dot{r}(t) dt.$$

Интеграл от радиальной составляющей скорости даёт разность расстояний между положениями спутника системы КОСПАС-САРСАТ и АБР в моменты времени t_1 и t_2 . Отсюда

$$\int_{t_1}^{t_2} F_D(t) dt = -\frac{1}{\lambda} |r_2 - r_1| = -\frac{1}{\lambda} \Delta r,$$

где r_1 и r_2 – значения модуля радиус-вектора в моменты времени t_1 и t_2 соответственно.

Координаты спутника в пространстве всегда известны на моменты времени t_1 и t_2 . Считается, что координаты АБР не меняются. Тогда, проинтегрировав $F_D(t)$ на интервале от t_1 до t_2 , получим величину, функционально связанную с разностью расстояний между АБР и спутником системы КОСПАС-САРСАТ в моменты времени t_1 и t_2 . Этому будет соответствовать поверхность гиперboloида, в фокусе которого расположен спутник. Каждая точка поверхности гиперboloида будет отвечать постоянству разности расстояний Δr . В момент кульминации спутника гиперboloид вырождается в плоскость, проходящую через спутник и АБР, перпендикулярно вектору линейной скорости спутника.

След от пересечения поверхности гиперboloида

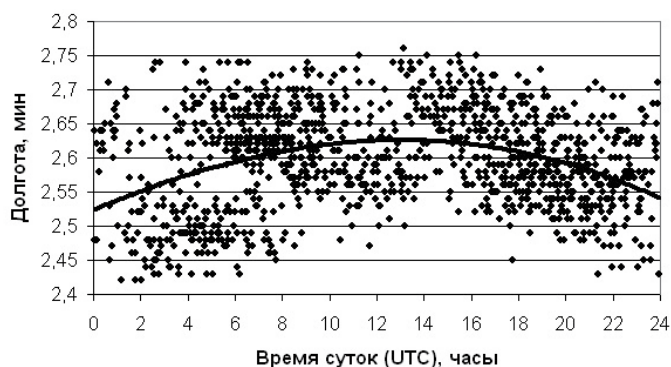
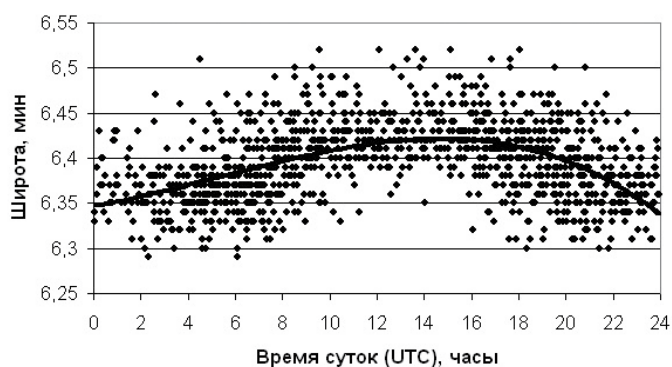


Рис. 1. Суточный ход обсервованных широт (левая панель) и долгот (правая панель)

с поверхностью земного эллипсоида представляет собой навигационную изолинию, проходящую через точку, в которой находится активированный АБР. Выполнив несколько последовательных измерений $FD(t)$ на интервалах времени одинаковой длительности, получим на поверхности Земли две точки пересечения навигационных изолиний. Они будут расположены симметрично относительно трассы подспутниковой точки на поверхности Земли. В одной из этих точек находится АБР. Подобную двужначность в доплеровских навигационных системах разрешают с учётом вращения Земли [3].

Описанный способ определения координат АБР принято называть интегрально-доплеровским, или разностно-дальномерным. Его точность зависит от многих факторов, из которых доминирующим является угол кульминации спутника системы КОСПАС-САРСАТ. При малых углах кульминации (менее 5°) погрешность определения широты активированного АБР может достигать 15 км [3].

Кроме того, на точность определения координат терпящих бедствие оказывает влияние состояние трансионосферного канала распространения радиосигнала от АБР к спутнику. Возникающие в ионосфере флуктуации плотности заряженных частиц вызывают замирания радиосигналов, а также мерцания амплитуды, частоты и фазы принимаемого радиосигнала. Замирания и мерцания амплитуды приводят к нарушениям непрерывности измерения $FD(t)$, то есть, к потерям навигационных изолиний. При прохождении радиоволн через ионосферу наблюдаются изменения их частоты и фазы [1]. Подобные изменения приводят к погрешностям измерения $FD(t)$, а следовательно, к случайным и систематическим смещениям навигационных изолиний. Отмечены систематические изменения фазы радиосигнала, имеющие ярко выраженный суточный ход. Максимум отклонений фазы приходится на полдень местного времени [1]. Отсюда можно сделать предположение о присутствии случайных и систематических погрешностей в координатах АБР.

К сожалению, исследования влияния суточных изменений параметров ионосферы на точность определения координат терпящих бедствия в системе КОСПАС-САРСАТ не проводились из-за невозможности постановки широкомасштабных экспериментов. Чтобы восполнить этот пробел, был проанализирован статистический материал, полученный автором с 1987 по 1979 г. в ходе непрерывных наблюдений за работой судового приёмника FSN-70 спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Транзит. Техни-

ческие характеристики СРНС Транзит близки к техническим характеристикам системы КОСПАС-САРСАТ. Отличие заключается в том, что в системе КОСПАС-САРСАТ координаты определяются на спутнике или на береговой станции, а в СРНС Транзит – на судне.

Для данного исследования были отобраны наблюдения с 1 декабря 1987 года по 31 января 1988 года. Этот период был выбран из-за малого изменения моментов времени восхода-захода Солнца. Наблюдения проводились в лаборатории кафедры Промышленного судовождения и промышленного рыболовства Дальневосточного филиала Всесоюзного института повышения квалификации руководящих работников и специалистов рыбного хозяйства СССР во Владивостоке. Приёмник FSN-70 в этот период работал непрерывно круглые сутки. Результаты каждой обсервации выводились принтером приёмника на металлизированную бумажную ленту. Моменты обсервации по шкале Универсального координированного времени (UTC), координаты, номер спутника и признак качества обсервации переносились в бумажные протоколы. Затем эти данные были оцифрованы. Из массива данных были удалены координаты, соответствующие малым углам кульминации, и оставлены только те, которые сопровождалось признаком "OK". Таким образом, для дальнейших исследований было отобрано 1189 обсерваций приёмника FSN-70. Обсервованные широты и долготы распределились по времени суток так, как это показано на рис. 1.

На рис. 1 прослеживается нелинейная зависимость широт и долгот от времени суток по шкале UTC. Видно, что отклонения трендов широт и долгот имеют один максимум и один минимум. Видно, что линии трендов имеют асимметрию относительно 12 часов UTC. В распределении обсервованных широт (см. левую панель рис. 1) асимметрия выражена гораздо больше по сравнению с суточным распределением обсервованных долгот.

Для облегчения анализа на рисунки нанесены графики регрессионных полиномиальных степенных зависимостей вида

$$y = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3, \quad (3)$$

где $a_0 - a_3$ – коэффициенты, величины которых были рассчитаны методом наименьших квадратов; t – время в часах суток по шкале UTC.

В результате вычислений были получены следующие регрессионные выражения:

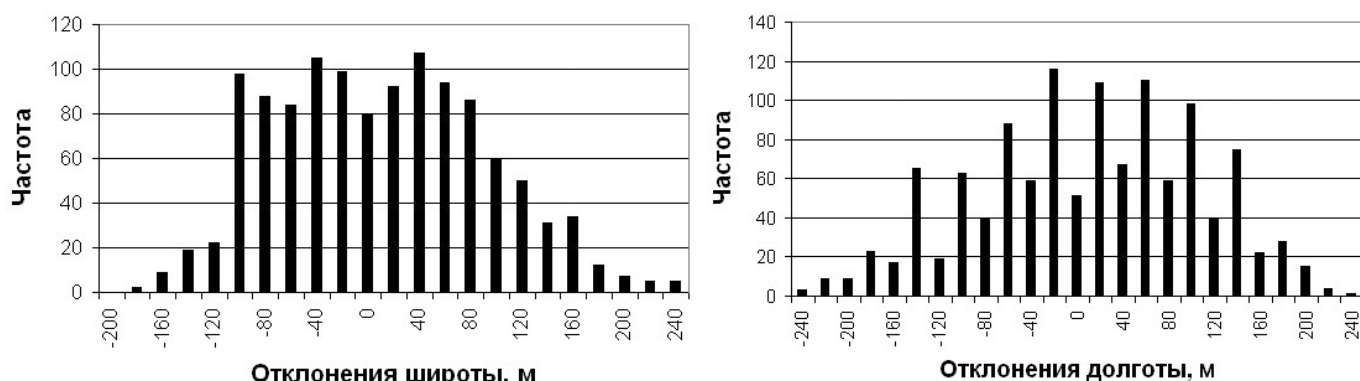


Рис. 2. Гистограммы отклонений широты (левая панель) и долготы

$$\begin{cases} \bar{\varphi}(t) = 6,34703 + 0,004511t + 0,000421t^2 - 0,000026t^3 \\ \bar{\lambda}(t) = 2,523298 + 0,015022t - 0,000492t^2 - 0,000004t^3 \end{cases} \cdot (4)$$

где $\bar{\varphi}(t)$ и $\bar{\lambda}(t)$ – значения трендов широты и долготы соответственно, выраженные в угловых минутах.

Размах варьирования в метрах суточных трендов широты $\Delta\bar{\varphi}$ и долготы $\Delta\bar{\lambda}$ рассчитывались следующим образом:

$$\Delta\bar{\varphi} = (\bar{\varphi}(t)_{\max} - \bar{\varphi}(t)_{\min}) \times l_m, \quad \Delta\bar{\lambda} = (\bar{\lambda}(t)_{\max} - \bar{\lambda}(t)_{\min}) \times l_p,$$

где $\Delta\bar{\varphi}(t)_{\max}$ и $\Delta\bar{\lambda}(t)_{\max}$ – наибольшие значения суточных трендов широты и долготы соответственно, выраженные в угловых минутах; $\Delta\bar{\varphi}(t)_{\min}$ и $\Delta\bar{\lambda}(t)_{\min}$ – наименьшие значения суточных трендов широты и долготы соответственно, выраженные в угловых минутах; l_m и l_p – длины дуг одной минуты меридиана и параллели соответственно, выраженные в метрах;

$$l_m = \frac{a(1-e^2)\text{arc}1'}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi_{cp})^3}}, \quad l_p = \left(\frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi_{cp}}} \text{arc}1' \right) \cos \varphi_{cp},$$

где a – большая полуось референц-эллипсоида WGS-84, e – его первый эксцентриситет, φ_{cp} – средняя широта в градусах, которая была получена в работе [2].

В результате вычислений суточный размах варьирования тренда широты составил 175,9 м, а суточный размах варьирования тренда долготы получился равным 138,4 м. Полученные величины являются размерами интервалов, внутри которых происходит суточное изменение систематических погрешностей наблюдаемых широт и долгот АБР.

Чтобы оценить величины случайных погрешностей и характер распределения наблюдаемых широт и долгот, были рассчитаны средние, средние квадратические отклонения (СКО), асимметрии, эксцессы и размахи варьирования исходных массивов наблюдений. Результаты вычислений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры распределений координат исходного массива

Параметр распределения	Широта	Долгота
Среднее, мин	6,3942	2,5974
Среднее квадратическое отклонение, мин	0,04319	0,07241
Среднее квадратическое отклонение, м	79,97	98,22
Асимметрия	0,204	-0,176
Эксцесс	-0,291	-0,629
Размах варьирования, м	425,9	461,2

Анализ табл. 1 позволяет сделать следующие выводы:

При углах кульминации спутника более 5° рассеивание широты меньше рассеивания долготы. Размахи варьирования координат не превышают 500 м. Это расстояние даже для моря нельзя признать достаточным при визуальном мониторинге предполагаемого места крушения. Как правило, аварии с судами и самолётами происходят в условиях, вызывающих значительное снижение вертикальной и горизонтальной дальности видимости (дождь, туман, морось, снежные заряды, пыльные бури, дым). Поэтому возникает необходимость повышения точности наблюдаемых координат, определяемых системой КОСПАС-САРСАТ.

Другими важными характеристиками распределения погрешностей наблюдаемых координат служат их гистограммы распределения. На рис. 2 представлены гистограммы распределения центрированных величин наблюдаемых широт и долгот исходного массива.

На рис. 2 видно, что в распределении наблюдаемых долгот прослеживается унимодальность, чего нет в распределении широт.

Так как размахи варьирования систематических погрешностей превосходят СКО, то для повышения точности определения координат АБР целесообразно удалять из наблюдаемых координат суточный тренд.

Рассчитаем средние значения суточных трендов широты $\bar{\varphi}_{cp}$ и долготы $\bar{\lambda}_{cp}$.

$$\bar{\varphi}_{cp} = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \bar{\varphi}(t_i) \right], \quad \bar{\lambda}_{cp} = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \bar{\lambda}(t_i) \right], \quad (5)$$

где $\bar{\varphi}(t_i)$ и $\bar{\lambda}(t_i)$ – значение регрессионной модели (4) для моментов времени, в которые были выполнены наблюдения в исходном массиве; N – число наблюдений в исходном массиве наблюдений.

Если модель (4) использовать для вычисления поправок к наблюдаемым координатам, то средние квадратические отклонения наблюдаемых координат σ_φ , σ_λ от трендов, то есть СКО исправленного массива, рассчитаются по следующим формулам:

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\varphi_i - \bar{\varphi}(t_i)]^2}{N}}, \quad \sigma_\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\lambda_i - \bar{\lambda}(t_i)]^2}{N}},$$

где φ_i и λ_i – наблюдаемые широта и долгота соответственно исходного массива, угловые минуты.

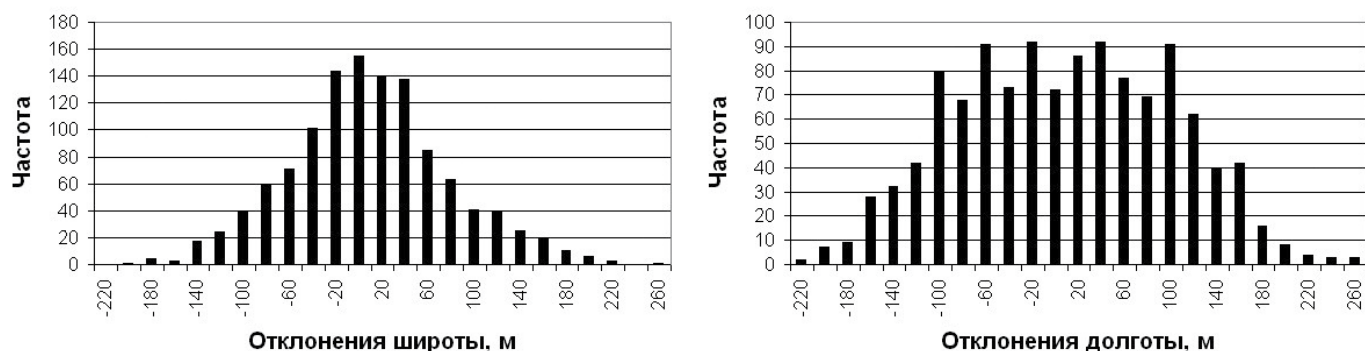


Рис. 3. Гистограммы отклонений исправленных широт (левая панель) и долгот

После устранения суточной погрешности из координат исходного массива рассчитанные параметры исправленного распределения координат сведены в табл. 2.

Таблица 2
Параметры распределений координат исправленного массива

Параметр распределения	Широта	Долгота
Среднее, мин	6,3945	2,5986
Среднее квадратическое отклонение, мин	0,03759	0,06838
Среднее квадратическое отклонение, м	69,61	92,75
Асимметрия	0,192	0,021
Экссесс	0,212	-0,7
Размах варьирования, м	458,3	471,4

Результат удаления суточных трендов можно оценить, сравнивая табл. 1 и 2. Видно, что средние значения исходного массива и исправленного массива отличаются незначительно. Уменьшилось на 10,36 м (12,9 %) СКО широты и уменьшилось на 5,47 м (5,5 %) СКО долготы. Следует отметить существенное изменение эксцесса широты и увеличение размахов варьирования исправленных координат.

О точности предложенной модели (4) можно судить по невязкам. Средняя невязка по широте составила величину -0,4877 м, по долготе она равна -1,5688 м. Этот факт подтверждает большую вариабельность обсервованной долготы по сравнению с обсервованной широтой.

На рис. 3 представлены гистограммы распределения широт и долгот после исправления исходного массива наблюдений.

Сравнение гистограмм рис. 2 и 3 позволяет сделать вывод о том, что устранение суточной составляющей существенно изменяет вид функций распределения случайных величин широт и долгот.

В заключение следует остановиться на формировании общей поправки к текущим координатам АБР. Пусть аварийный буй транслирует сигналы бедствия из точки с известными с высокой точностью координатами φ_0 и λ_0 . Обозначим через $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ постоянные погрешности, обязательно присутствующие в измерениях координат. Причина их возникновения кроется в несовершенстве алгоритма вычислений. Понятно, что $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ не зависят от времени суток. Численно $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ будут равны средним значениям суточных трендов широты $\bar{\varphi}_{ср}$ и долготы $\bar{\lambda}_{ср}$ (5) при $N \rightarrow \infty$. Тогда $\Delta\varphi = \bar{\varphi}_{ср} - \varphi_0$, $\Delta\lambda = \bar{\lambda}_{ср} - \lambda_0$.

Обозначим через $\varepsilon\varphi$ и $\varepsilon\lambda$ случайные погрешности измерений широты и долготы соответственно. Наделим их следующими свойствами: математические

ожидания $\varepsilon\varphi$ и $\varepsilon\lambda$ равны нулю, их дисперсии конечны, корреляционный момент двух реализаций случайной величины, полученных в разные моменты времени, равен нулю.

Детерминированные составляющие погрешности обсервованных в данное время суток координат будут равны суммам $\Delta\varphi + \bar{\varphi}(\varepsilon)$, $\Delta\lambda + \bar{\lambda}(\varepsilon)$. Взятые с обратным знаком эти суммы будут поправками. Таким образом, если измеренные координаты исправить поправками, то исправленные будут содержать только случайные погрешности.

Подводя итог, можно сделать следующие выводы и предложения.

1. Обнаружена суточная составляющая погрешностей в координатах АБР и предложена её регрессионная модель.
2. Предложен способ определения постоянной погрешности координат аварийного радиобуя.
3. Показано, что удаление суточной составляющей модифицирует функции распределения случайных погрешностей координат АБР.
4. Полученные параметры функций распределений могут послужить в деле организации процедур поиска и спасения терпящих бедствие.
5. Предложен способ повышения точности определения координат терпящих бедствие.
6. Необходимо продолжить исследования с целью оценки сезонных изменений обсервованных координат, получаемых с помощью доплеровских спутниковых навигационных систем.
7. Следует проанализировать распределение обсервованных координат при малых углах кульминации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. - М.: Мир, 1973. - 502 с.
2. Комаровский Ю. А. Зависимость точности обсервованных координат ПИ FSN 70 от высоты кульминации спутников СРНС Транзит / Ю. А. Комаровский // Вестник Морского государственного университета. Вып. 22/2008. Серия: История морской науки, техники и образования. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2008. - С. 105 -116.
3. Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие / А. И. Балашов [и др.]; под ред. В. С. Шибшаевича. - М.: Радио и связь, 1987. - 376 с.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING

Шпилев А.М., Биленко С.В.

05.02.08

A.M.Shpilev, S.V.Bilenko

ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

DEFINING EFFECTIVE CUTTING-TOOL TRAJECTORIES FOR OPERATIONS OF HIGH-SPEED MACHINING



Шпилев Анатолий Михайлович — доктор технических наук, профессор, ректор Ком-сомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: rector@knastu.ru
Anatoly M. Shpilev — Doctor in Engineering, Professor, Rector of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). rector@knastu.ru



Биленко Сергей Владимирович — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: s.bilenko@knastu.ru
Sergey V. Bilenko — Doctor in Engineering, Associate Professor,

Head of the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). s.bilenko@knastu.ru

Аннотация: Показано, что эффективные гладкие и динамически устойчивые траектории режущего инструмента для операций высокоскоростного фрезерования можно получать путем решения краевых задач поля с помощью клеточных нейронных сетей. Описан программный модуль для САМ-системы Unigraphics, позволяющий формировать три типа гладких спиральных траекторий движения режущего инструмента, оптимальных с точки зрения высокоскоростного фрезерования карманов деталей авиационной промышленности.

Summary: The paper proves that effective smooth and dynamically steady trajectories of cutting tools for operations of high-speed milling can be received by solution of field boundary value problems by means of cellular neural networks. A program unit for the Unigraphics CAM-system is described, that allows to form three types of smooth spiral trajectories of movement of the cutting tool that are optimal for high-speed pocketing of parts/components in the aviation industry.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, траектория, ЧПУ, клеточная нейронная сеть, САМ, авиационная промышленность.

Keywords: high-speed milling, trajectory, CNC, cellular neural network, CAM, aviation industry.

В настоящее время оборудование, позволяющее вести высокоскоростную металлообработку, завоевывает все большую популярность. Для оптимального использования преимуществ этого оборудования необходимо соответствующее программное обеспечение, позволяющее в полной мере реализовать его возможности.

Одним из наиболее известных и мощных программных продуктов, позволяющих применять технологию ВСО в производстве, является программный пакет Manufacturing Bundle, входящий в состав САМ-системы Unigraphics. Данный пакет служит для разработки, проверки и визуализации управляющих программ для станков с ЧПУ и позволяет разрабатывать управляющие программы для обработки деталей любой сложности.

В программу Manufacturing Bundle изначально за-

Поступила в редколлегию 16.02.2010

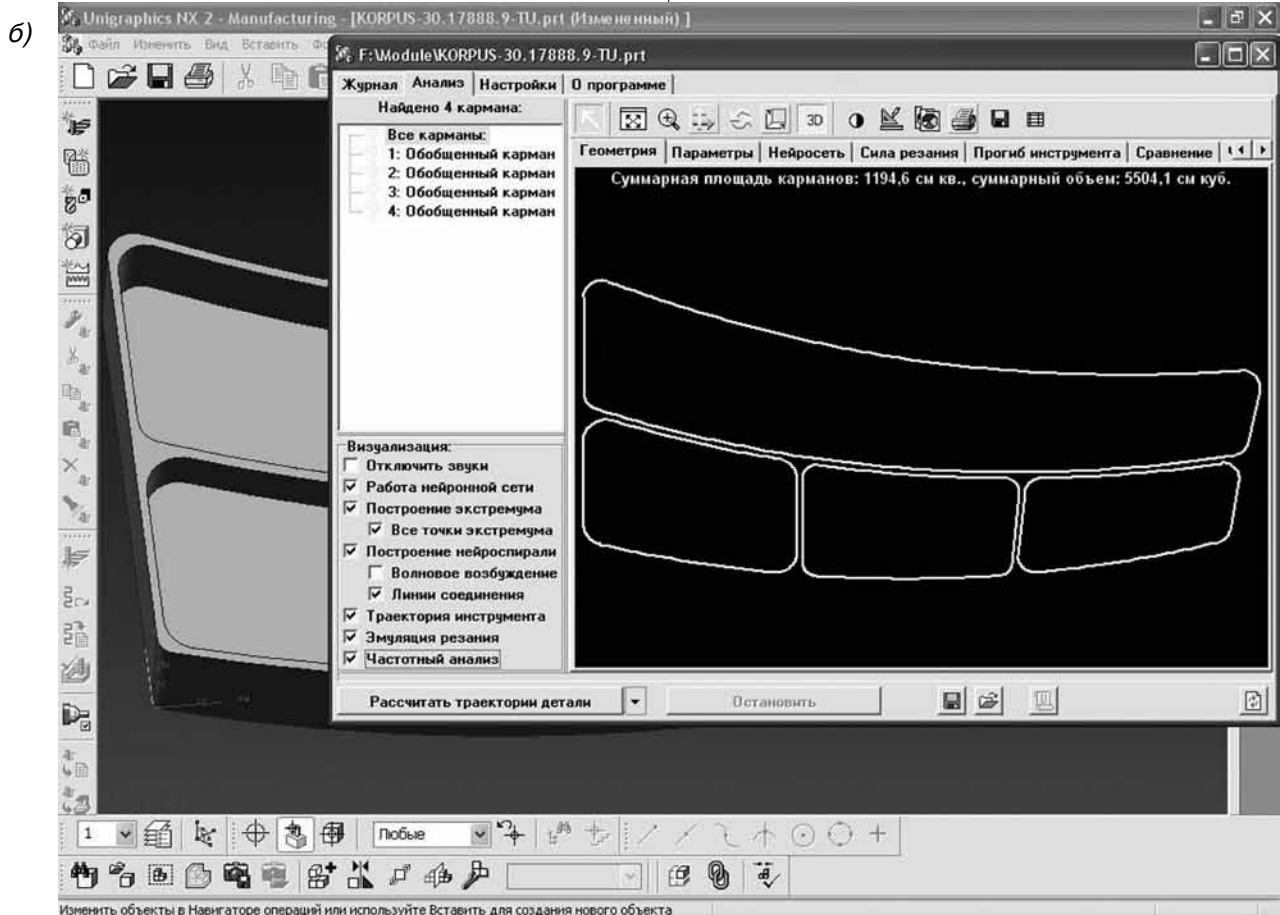
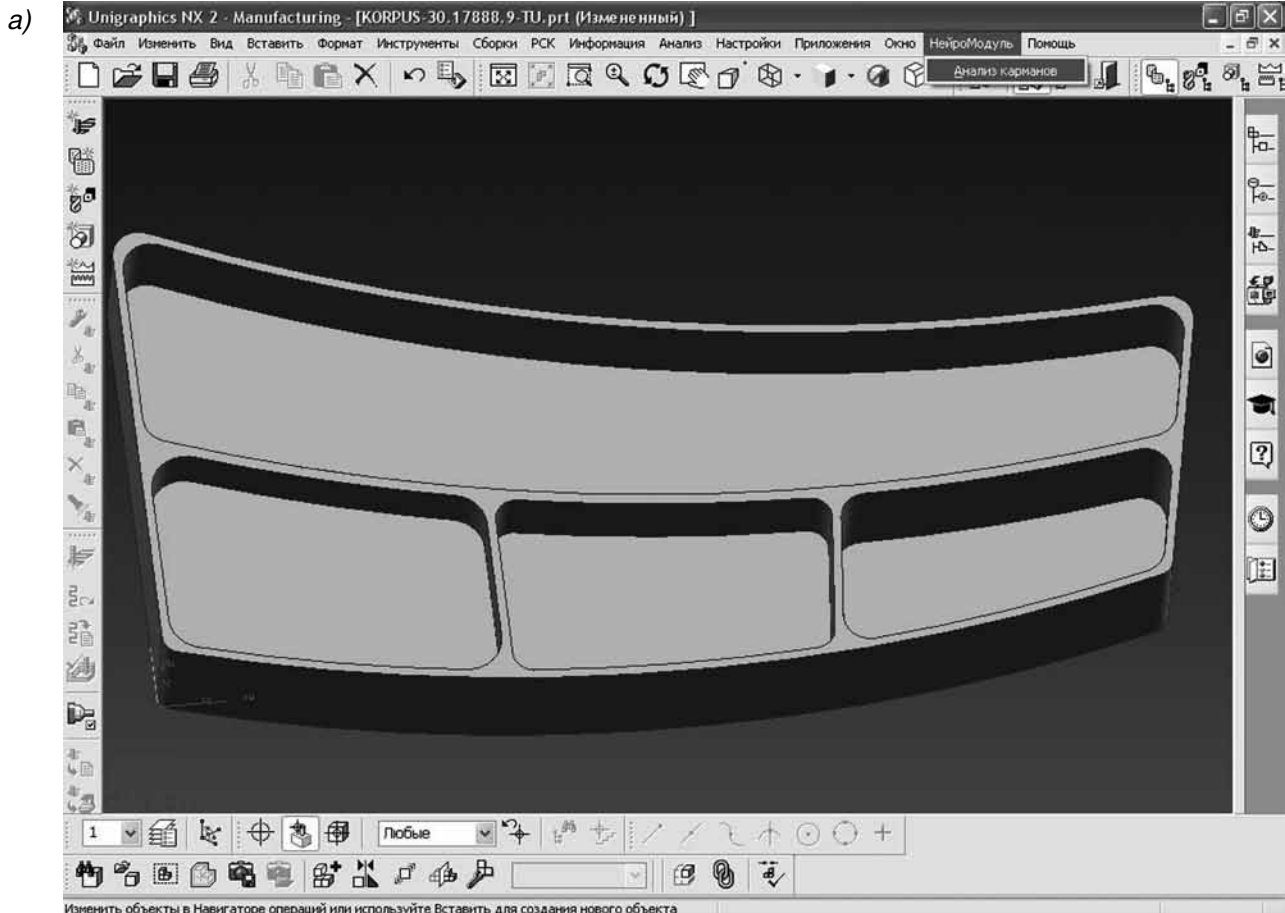


Рис. 1. Исследуемая деталь в окне Unigraphics (а) и в окне предварительного анализа программного модуля «NeuroModule UG» (б)

ложены некоторые штатные функции, ориентированные на высокоскоростную обработку. Генератор высокоскоростной обработки имеет возможности кругового и спирального подхода к детали, спиральную траекторию шаблона обработки, замедление в углах, сплайн интерполяции выходной траектории. Но, как показывает практика, все эти функции лишь позволяют немного адаптировать к условиям ВСО традиционные, разработанные для невысокоскоростных металлорежущих станков, технологические приемы. Полноценно задачу повышения эффективности высокоскоростной обработки они не решают.

Поэтому на основе нейронносетового подхода, описанного в [1], для CAD/CAM-системы Unigraphics был создан дополнительный программный модуль NeuroModule UG (рис. 1). Модуль разработан с помощью механизма UG Open API и позволяет дополнить штатные возможности CAM-системы Unigraphics процедурой автоматизированного формирования траекторий движения инструмента для высокоскоростного фрезерования широкого класса деталей авиационной промышленности, таких как шпангоут, лонжерон, нервюра, содержащих большое количество технологических элементов типа карман.

Расчет каждого кармана происходит в два этапа. Вначале, путем решения задачи теплопроводности, с помощью клеточной нейронной сети анализируется форма кармана и строится линия его симметрии равновесия (рис. 2, а). Затем на основе полученных результатов производится построение гладких спиральных траекторий специальной формы, такой, чтобы расстояние между витками спирали оставалось максимально стабильным на всех ее участках или менялось плавным образом. В центре каждой траектории располагается максимально короткий (для данной формы кармана) участок трохойдального движения.

При расчете траекторий используются следующие методы, различающихся набором критериев оптимальности:

1. Метод «Нейроспираль с постоянным линейным шагом» (рис. 2, б) обеспечивает максимально стабильные условия резания и максимальную производительность при некотором снижении допуска на минимальное количество резких смен направления движения. Дает наилучшие результаты для карманов с выпуклыми скругленными границами без островов.

2. Метод «Нейроспираль с нелинейным шагом» (рис. 2, в) обеспечивает максимально плавное изменение условий резания и минимальное количество резких смен направления движения при снижении допуска на максимальную производительность процесса фрезерования. Дает наилучшие результаты для карманов сложной формы без островов.

3. Метод «Нейросмещение» (рис. 2, г) обеспечивает максимальную производительность при снижении допуска на максимально стабильные условия резания и минимальное количество резких смен направления движения. Дает наилучшие результаты

для карманов сложной формы с островами.

Наряду с функцией генерации различных траекторий обработки программный модуль выполняет процедуру сравнительного анализа полученных траекторий. После формирования какой-либо траектории запускается процедура эмуляции фрезерования и расчета силы резания. Процесс эмуляции визуализируется в виде 2D-анимации, позволяющей определить недообработанные области кармана или нерациональные холостые перемещения (для ускорения вычислений режим 2D-анимации может быть отключен). Результаты расчетов сил резания отображаются в виде графиков.

Графики изменения силы резания позволяют судить о наличии перегрузок инструмента или шпинделя, а также о степени стационарности процесса резания.

Во время обработки материала, особенно при черновой обработке, режущий инструмент испытывает переменную нагрузку. Причем нагрузки на инструмент могут меняться многократно. Соответственно происходит интенсивный износ, как режущего инструмента, так и станка. Причина этого — заложенная в управляющей программе обработки постоянная скорость резания. Процедура эмуляции процесса резания в программе «NeuroModule UG» реализована таким образом, что в процессе обработки постоянно анализируется площадь контакта режущего инструмента и обрабатываемого материала. На основе анализа объема снимаемого материала и идет корректировка скорости резания в конкретной точке обработки.

Целью данной корректировки является исключение случаев превышения силы резания $F_{рез}$ максимально допустимого значения $F_{инстр}$ для данного типа инструмента (перегрузка инструмента) и случаев превышения мощности резания $P_{рез}$ максимально допустимого значения $P_{шпindel}$ для данного типа привода главного движения станка (перегрузка шпинделя).

Следует отметить, что корректировка скорости подачи в случае угрозы перегрузки является вынужденной мерой, позволяющей добиться непрерывного процесса обработки без поломок инструмента и заклинивания шпинделя в случае неправильно рассчитанной траектории, и не является хорошим решением. Дело в том, что сила резания $F_{рез}$ нелинейно зависит от скорости подачи $V_{под}$. По данным компании Sandvik Coromant для алюминиевых сплавов наблюдается зависимость $F_{рез} \sim (V_{под})^{0,75}$ [2]. То есть, для того чтобы снизить нагрузку на инструмент в 4 раза в моменты врезаний при межстрочных переходах траектории «Зиг-заг», нужно уменьшить скорость подачи в 6,35 раз. Что сильно сказывается на общей производительности обработки.

Например, несмотря на то, что траектория «Зиг-заг» имеет меньшую длину, чем траектория «Нейроспираль с линейным шагом»: 22,7 м и 36,9 м соответственно, общее время фрезерования по траектории «Зиг-заг» получается больше, чем при использо-

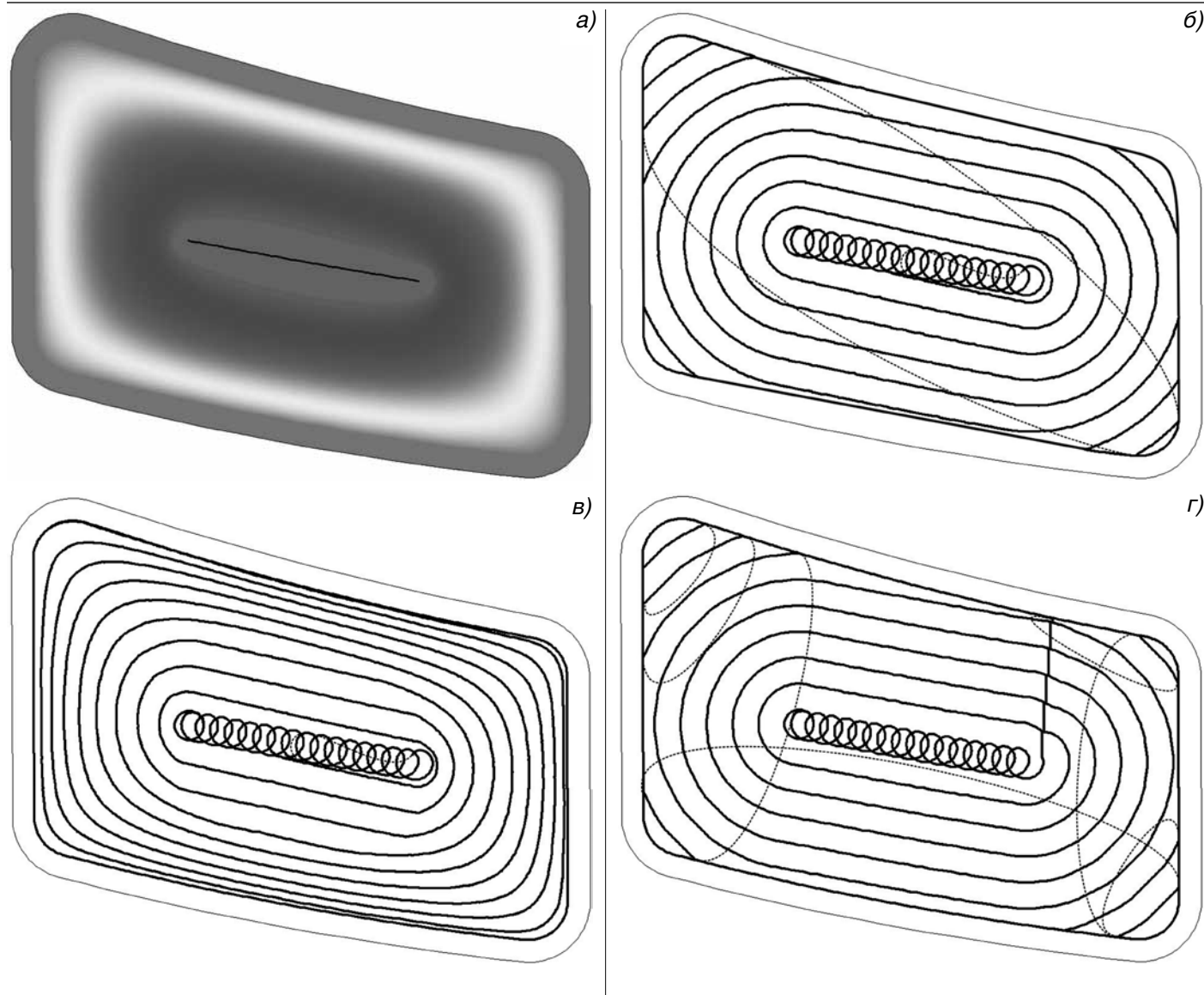


Рис. 2. Траектории режущего инструмента для высокоскоростного фрезерования кармана, полученные с помощью клеточной нейронной сети: линия симметрии равновесия кармана (а); траектории, полученные методами «Нейроспираль с постоянным линейным шагом» (б), «Нейроспираль с нелинейным шагом» (в) и «Нейросмещение» (г). Сплошная линия—рабочий ход, пунктир—ускоренные перемещения

вании траектории «Нейроспираль с линейным шагом» — 15,7 минут против 11,6 (из-за вынужденного снижения подачи в зонах перегрузки инструмента при фрезеровании «Зиг-загом»).

Помимо расчета сил резания программный модуль производит анализ динамических нагрузок на инструмент и расчет прогиба инструмента.

Достоинство данной процедуры динамического анализа состоит в том, что при расчете учитываются резонансные явления упругой системы станка—резонанс инструмента и заготовки. Резонансные частоты и коэффициенты затухания задаются на основании обстукивания узлов станка измерительным молотком. На основании процедуры динамического анализа строится расчет прогиба инструмента и связанных с этим погрешностей формы изготавливаемой детали.

После выполнения всех расчетов строится сводная диаграмма для всех траекторий кармана (рис. 3). В верхней половине диаграммы показывается сравнительный график траекторий по производительности (объем кармана, поделенный на время фрезерования). А в нижней половине приводится сравнительная гистограмма по точности обработки. За критерий точности берется десятичный логарифм максимального значения прогиба инструмента для данной траектории, взятый со знаком минус.

Далее, согласно диаграмме, из полученных траекторий выбирается наилучшая с позиций ВСО, позволяющая наиболее полно раскрыть преимущества высокоскоростного фрезерования для данной формы кармана. Например, из рис. 3 видно, что наилучшим выбором для кармана 4 изготавливаемой детали будет стратегия «Нейросмещение». Применение этой стра-

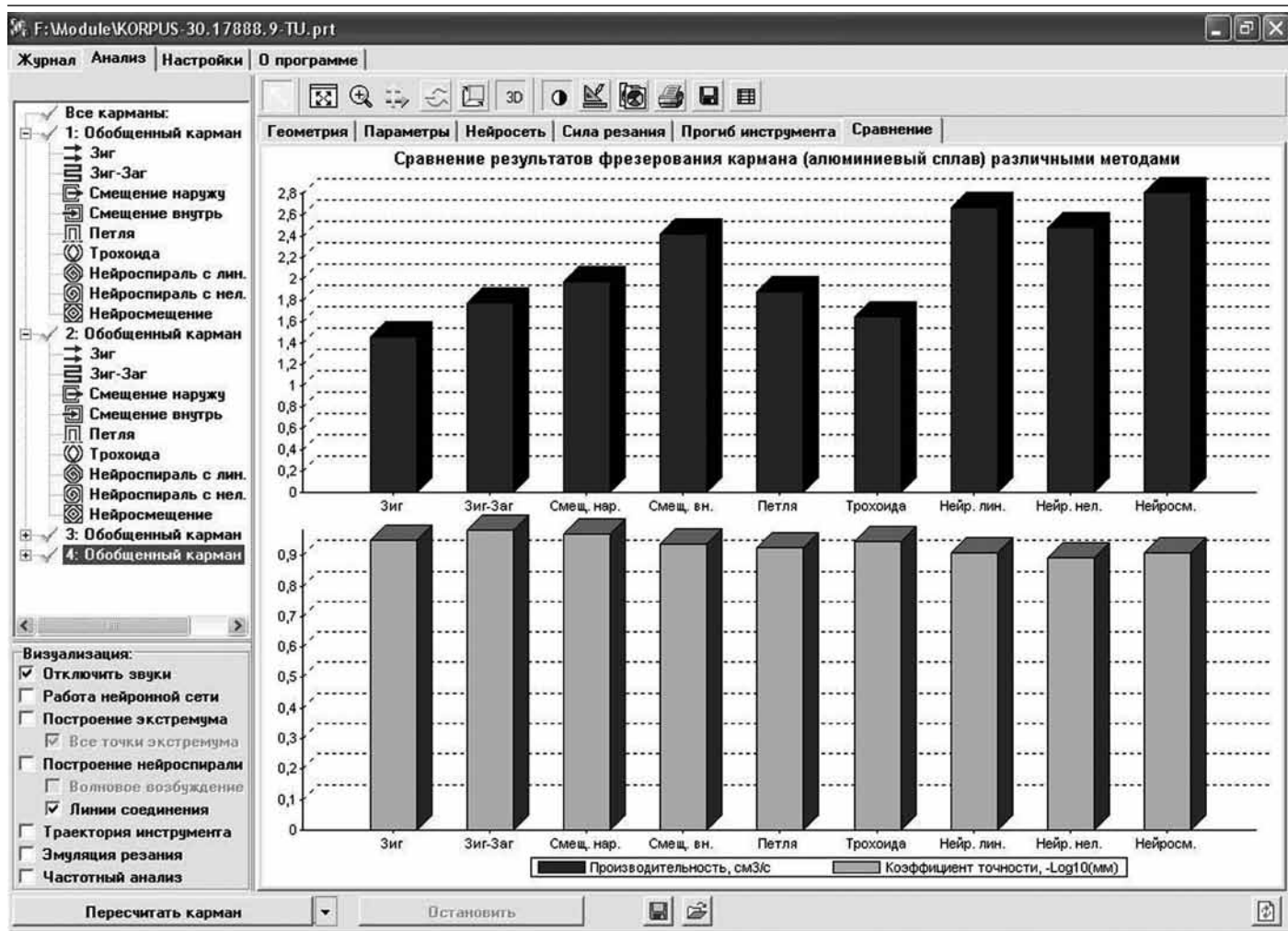


Рис. 3. Диаграмма сравнения траекторий для кармана 4

тегии сочетает в себе высокую производительность и хорошую точность обработки.

Для экспериментальной проверки результатов, получаемых программным модулем NeuroModule UG, была спроектирована тестовая деталь, содержащая 6 идентичных карманов в виде сегментов круга (рис. 4).

С помощью САМ-системы Unigraphics и программы NeuroModule UG была разработана управляющая программа для фрезерного станка с ЧПУ. Причем для каждого кармана детали использовалась своя стратегия обработки:

- «Зиг-заг», сформированный САМ-системой Unigraphics;
- «Петля вдоль периферии», сформированная Unigraphics;
- «Трохоидальная обработка», сформированная Unigraphics;
- «Нейроспираль с постоянным линейным шагом», сформированная программным модулем NeuroModule UG;
- «Нейроспираль с нелинейным шагом», сформированная NeuroModule UG;
- «Нейросмещение», сформированная NeuroModule UG;

Траектория движения режущего инструмента при обработке всех карманов показана на рис. 4б.

После изготовления детали были произведены измерения шероховатости поверхностей дна полученных карманов. Результаты измерений приведены в таблице 1. Из данной таблицы видно, что наилучшее качество обработанной поверхности дает траектория «Нейроспираль с нелинейным шагом».

В модуле используется программная реализация клеточной нейронной сети. Для уменьшения времени вычислений без потери точности формирования траектории клеточная нейронная сеть выполнена двухслойной. На расчет траектории высокоскоростной обработки одного кармана площадью 100 см² с точностью позиционирования инструмента 0,05 мм затрачивается около 118 минут для процессора класса Pentium Core Duo—3,0 ГГц. Увеличение точности в 2 раза влечет за собой увеличение времени расчета в среднем в 5-8 раз в зависимости от формы кармана.

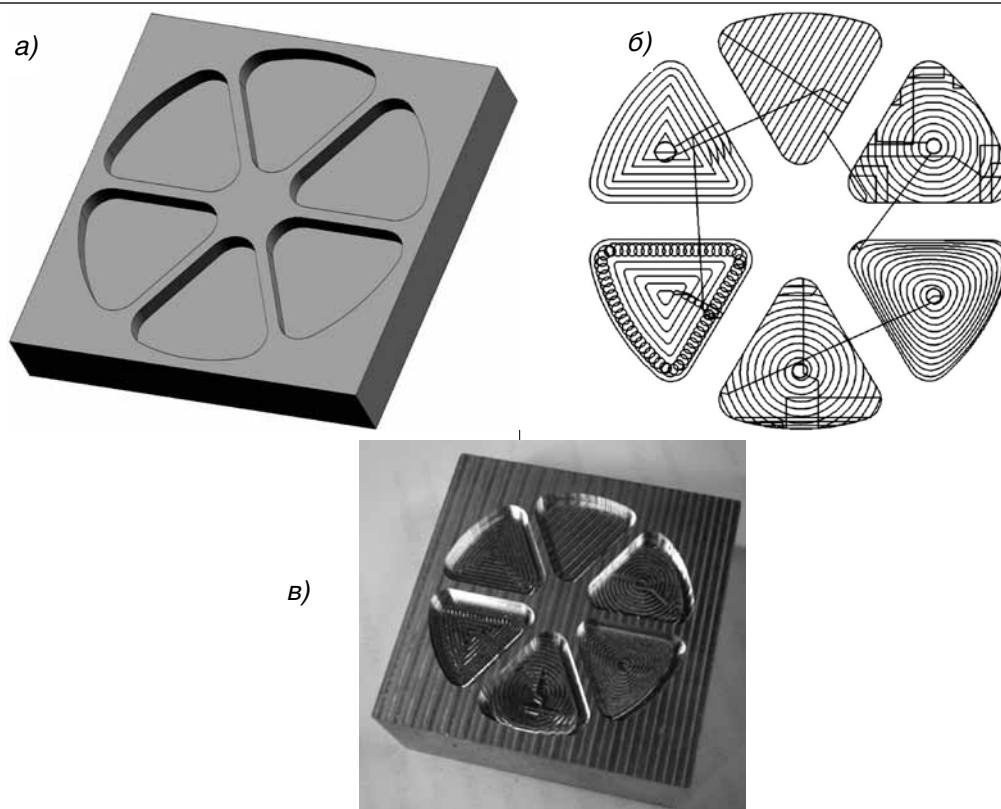


Рис. 4. Тестовая деталь: электронная модель (а); траектория движения режущего инструмента при обработке всех карманов (б); внешний вид детали после обработки (в)

Зависимость шероховатости полученной поверхности от стратегии обработки

Траектория обработки	Шероховатость, Ra
«Зиг-заг»	1,38
«Петля вдоль периферии»	1,11
«Трохоидальная обработка»	0,93
«Нейроспираль с постоянным линейным шагом»	0,87
«Нейроспираль с нелинейным шагом»	0,71
«Нейросмещение»	1,06

Время вычисления можно существенно уменьшить, используя не программную, а аппаратную реализацию нейронной сети. Именно аппаратная реализация клеточных нейронных сетей позволит добиться распараллеливания вычислений и снизить продолжительность формирования траектории на несколько порядков.

В качестве основы для аппаратной реализации клеточных нейронных сетей может быть использован отечественный нейропроцессор NeuroMatrix (NM6403) [3]. Процессор NM6403 представляет собой синтезируемую модель высокопроизводительного DSP-процессора с архитектурой VLIM/SIMD. Его ядро состоит из двух базовых блоков: 32-раз-

рядного RISC-процессора и 64-разрядного векторного процессора, обеспечивающего выполнение векторных операций над данными переменной разрядности.

Таким образом, применение клеточных нейронных сетей является перспективным методом расчета траекторий обработки для ВСО. И среди всего многообразия реализаций клеточных нейронных сетей наиболее эффективными являются нейронной сети в аппаратном исполнении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин Ю. Г. Применение клеточных нейронных сетей для формирования эффективных траекторий движения режущего инструмента при HSM-обработке (плeнарный доклад)/Кабалдин Ю. Г., Биленко С. В. // Современные проблемы машиноведения и высоких технологий: Материалы Международной научно-технической конференции (г. Ростов-на-Дону, 6-7 октября 2005 г.). — Ростов-на-Дону: ИЦ ДГТУ, 2005. — С. 8-13.
2. Материалы компании «Sandvik Coromant». — Адрес в Интернет: <http://www.coromant.sandvik.com>
3. Нейропроцессор NM6403. Материалы компании ЗАО НТЦ «Модуль». Адрес в Интернет: <http://www.module.ru>

Бурков А.А., Биленко С.В.

A.A.Burkov, S.V.Bilenko

05.02.08

ДИАГНОСТИКА РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ DIAGNOSTICS OF HIGH-SPEED MACHINING OPERATIONS USING DYNAMIC INFORMATION MODELS



Бурков Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: sdssov@knastu.ru
Alexander A. Burkov — Doctor in Engineering, Professor, Provost for Education at the Komsomolsk-on-Amur State Technical University

(Komsomolsk-on-Amur), e-mail: sdssov@knastu.ru



Биленко Сергей Владимирович — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: s.bilenko@knastu.ru
Sergey V. Bilenko — Doctor in Engineering, Associate Professor,

Head of the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). s.bilenko@knastu.ru

Аннотация: Предложен принцип информационного моделирования технологических процессов высокоскоростной механической обработки, базирующийся на применении динамических нейронных сетей, позволяющий контролировать устойчивость рабочих процессов механообработки, добиваясь при этом повышения ее точности и производительности, а также снижения темпов износа режущего инструмента и станочного оборудования.

Summary: The paper proposes a new principle of informational simulation of processes during high-speed machining, based on dynamic neural networks; this allows us to control the stability of machining processes and thus achieve increased accuracy and productivity, and also slow down the rate of wear of the cutting tool and the machining equipment.

Ключевые слова: высокоскоростная механическая обработка, устойчивость, нейронная сеть, динамический, модель, информационный, диагностика, акустическая эмиссия.

Keywords: high-speed machining, stability, neural

network, dynamic, model, informational, diagnostics, acoustic emission.

В силу того, что параметры быстротекущих динамических явлений, происходящих непосредственно в зоне высокоскоростного резания, в большинстве своем, недоступны для прямого измерения, алгоритмы мониторинга технологических процессов, как правило, строят на базе моделей [1, 2].

Существует два принципиально различных подхода к решению задачи моделирования технологических процессов: физический и эмпирический. В первом случае, строится математическая модель, основанная на общих законах, которыми описываются динамика тех или иных явлений, протекающих в процессе функционирования системы. Эти законы записываются с помощью совокупности уравнений, связывающих входные переменные (управляющие и возмущающие воздействия) с выходными. Чаще всего исходная математическая модель получается в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений [4], решение которых представляет большую трудность.

При построении эмпирических моделей не обя-

Поступила в редколлегию 16.02.2010

ДИАГНОСТИКА РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

зательно знать природу процессов, протекающих в технологической системе. Достаточно иметь сведения об их внешних проявлениях. Технологическая система в этом случае рассматривается как устройство, у которого исследуется реакция выходных переменных на известные входные воздействия. После того как выбран (или задан) общий вид функциональной зависимости между переменными, задача сводится к определению численных коэффициентов (параметров модели).

В последние годы из-за простоты реализации широкое применение получили методы целенаправленного синтеза приближенных эмпирических моделей, выбор которых приобретает все более эвристический характер. Приближенные модели технологических процессов значительно выигрывают в простоте по сравнению с аналогичными точными математическими моделями, а главное, удерживают свойства предсказуемости поведения алгоритмов адаптации и оптимизации технологических режимов вблизи установившихся движений управляемых систем. Однако приближенные модели приводят к слишком большим погрешностям в том случае, если моделируемые процессы носят принципиально нестационарный характер.

Примером такого нестационарного динамического процесса, неудобного для моделирования стандартными математическими средствами, является высокоскоростная токарная обработка, сопровождающаяся образованием суставчатой или элементной стружки. В процессе течения устойчивое движение упругой системы станка нарушается возникновением самовозбуждающихся вибраций (автоколебаний) и в целом переходом к квазипериодическому движению [2]. В этой связи многочисленные исследования свидетельствуют о сильной зависимости динамики станочных систем от специфических особенностей развития во времени контактных процессов в системе резания. Иначе говоря, устойчивость упругой системы станка существенно определяет динамика процесса резания, в частности, локализация пластических деформаций в зоне стружкообразования, высокая степень деформации в приконтактных слоях стружки, вызывающая здесь вихревой характер движения обрабатываемого материала.

По-видимому, наиболее перспективным направлением моделирования динамических процессов ВСО является разработка информационных моделей на основе искусственных нейронных сетей, которые благодаря своим аппроксимирующим свойствам и высокому быстродействию находят все большее применение.

При применении нейронносетевых моделей прежде всего встает вопрос выбора конкретной архитектуры сети (числа слоев и количества нейронов в каждом из них). Размер и структура сети должны соответствовать существу исследуемого явления. Поскольку на начальном этапе анализа природа явления ещё не известна, то выбор архитектуры является непростой задачей и часто связан с дли-

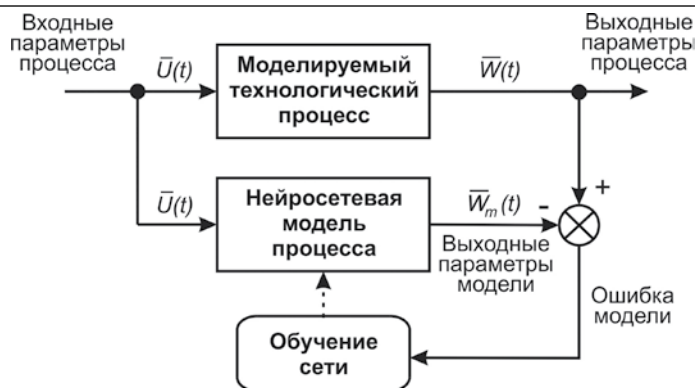


Рис. 1. Схема обучения нейронносетевой модели технологического процесса

тельным процессом интуитивного выбора на основе перебора различных вариантов.

Затем построенная сеть подвергается процессу обучения (рис. 1). На этом этапе нейроны сети итеративно обрабатывают входные данные и корректируют свои веса таким образом, чтобы сеть могла формировать адекватные выходные сигналы. По сути, процесс обучения сети представляет собой подгонку модели, которая реализуется сетью, к имеющимся обучающим данным, характеризующим различные варианты условий протекания моделируемого технологического процесса. Ошибка для конкретной конфигурации сети определяется путем прогона через сеть всех имеющихся наблюдений входных параметров \bar{U} процесса и сравнения выходных значений \bar{W}_m модели с реальными значениями выходных параметров \bar{W} технологического процесса. Все такие разности суммируются в так называемую функцию ошибок, значение которой и есть ошибка сети. Обучение производится до тех пор, пока ошибка сети не достигнет приемлемо малой величины.

Сеть, полученная в результате обучения, выражает закономерности, присутствующие в данных. При таком подходе она оказывается функциональным эквивалентом зависимостей между переменными, подобной тем, которые строятся в традиционном моделировании. Однако, в отличие от традиционных моделей, в случае сетей эти зависимости не могут быть записаны в явном виде. Иногда нейронные сети реализуют модели очень высокого качества; однако, они представляют собой типичный пример нетеоретического подхода к исследованию. При таком подходе основные усилия сосредотачиваются исключительно на практическом результате – в данном случае – на адекватности модели, – а не на сути механизмов, лежащих в основе явления.

Следует, однако, отметить, что методы нейронных сетей могут применяться и в таких исследованиях, где целью является построение объясняющей модели явления, поскольку нейронные сети помогают изучать данные на предмет поиска значимых переменных или групп таких переменных, и полученные результаты могут облегчить процесс последующего построения модели.

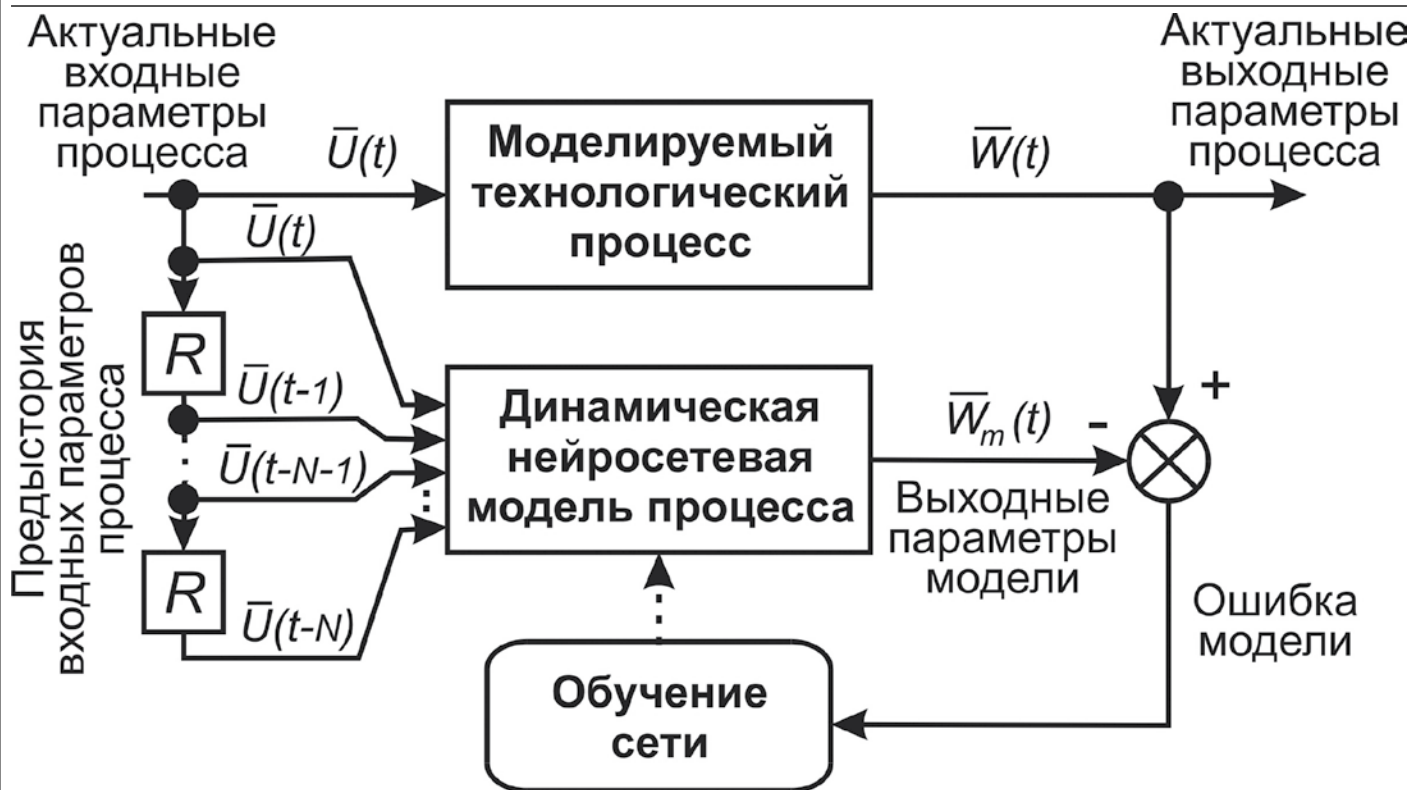


Рис. 2. Схема обучения динамической нейронносетевой модели технологического процесса

Одно из главных преимуществ нейронных сетей состоит в том, что они, по крайней мере, теоретически, могут аппроксимировать любую непрерывную функцию, и поэтому исследователю нет необходимости заранее принимать какие-либо гипотезы относительно модели, и даже, в ряде случаев, о том, какие переменные действительно важны. Однако существенным недостатком нейронных сетей является то обстоятельство, что окончательное решение зависит от начальных установок сети и, как уже говорилось выше, его практически невозможно интерпретировать в традиционных аналитических терминах, которые обычно применяются при построении теории явления.

Такую сеть легко можно интерпретировать как модель вход-выход, в которой синаптические веса и пороговые смещения нейронов являются свободными параметрами модели. Такая сеть может моделировать функцию практически любой степени сложности, причем число слоев и число элементов в каждом слое определяют сложность функции.

Тем не менее, в общем случае нейронносетевые модели, построенные по принципу вход-выход, являются статическими, так как выходное значение $\bar{W}_m(t)$ модели определяется только значением текущего актуального входа $\bar{U}(t)$ сети и ни в коем случае не зависит от предыстории входного воздействия. Соответственно за пределами возможностей таких моделей остаются задачи отражения различных переходных процессов, происходящих в воспроизводимом объекте. Для моделирования динамических процессов необходимо использовать нейронные сети с последовательной структурой входных данных (рис. 2).

Хранение предыстории входных воздействий в таких моделях реализуется с помощью специальных регистров (на рисунке 2 обозначены буквой R), производящих последовательный сдвиг при приеме каждого нового значения $\bar{U}(t)$.

На практике не всегда становится возможным осуществить полное моделирование всего технологического процесса. В этом случае полезно построить модель какой-либо его составной части, наиболее важной с точки зрения выходных параметров процесса или наименее удобной для прямых измерений и, как правило, вследствие этого мало изученной. Такие частичные модели могут быть полезны для диагностики технологического процесса в целом. Естественно, что входными данными для данных моделей будет являться не вектор $\bar{U}(t)$ управления, а вектор $\bar{\Psi}(t)$ каких-либо промежуточных параметров протекания технологического процесса, полученных в результате физических измерений.

Например, использование динамической нейронносетевой модели колебательной системы «инструмент-деталь» металлорежущего станка позволяет осуществить эффективный способ мониторинга вибраций, самовозбуждающихся в процессе резания.

Информацию об относительных вибрациях инструмента и обрабатываемой детали можно получить только в результате косвенных измерений. Основная задача анализа подобных данных состоит в определении качественных и количественных характеристик регистрируемых сигналов, позволяющих судить об истинном состоянии динамических процессов, происходящих в зоне резания.

ДИАГНОСТИКА РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

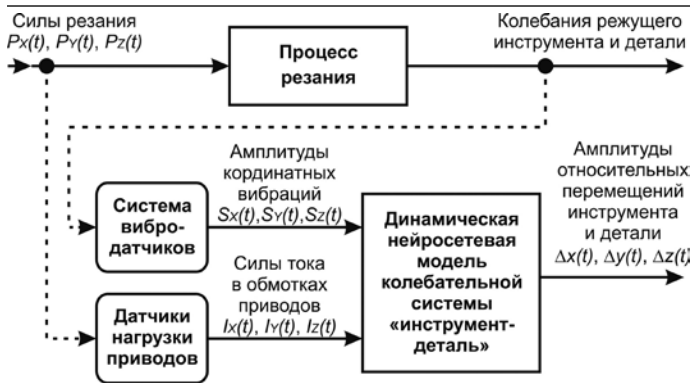


Рис. 3. Схема диагностики относительных перемещений режущего инструмента и обрабатываемой детали с использованием нейронносетевой динамической модели колебательной системы «инструмент–деталь»

Наличие многих степеней свободы упругой системы металлорежущего станка [3, 5] приводит к тому, что колебания инструмента относительно заготовки представляют результат сложения нескольких связанных между собой простейших (поступательных или крутильных) колебаний. Поэтому образующаяся в результате сложения колебаний траектория относительного движения инструмента и заготовки имеет форму замкнутой кривой, теоретически – предельного цикла. Реально, в силу разнообразных возмущений, траектория движения вершины инструмента имеет несколько хаотичный вид. То есть, теоретический эллипс перемещений для данного установившегося режима резания является своеобразным аттрактором – притягивающим множеством точек в фазовом пространстве относительного положения инструмента и детали.

Зафиксировать реальную траекторию движения вершины инструмента с достаточной для диагностики точностью, можно только применив специальную прецизионную аппаратуру, например, измеряя проекции силы резания, используя трехкоординатный динамометр, и заранее зная, при этом, координатные жесткости державки резца. Естественно, использование столь сложного и дорогого оборудования в составе систем управления металлорежущими станками экономически нецелесообразно из-за слишком высоких затрат на настройку и обслуживание. Поэтому для измерения колебаний при резании, как правило, используют более дешевые, но менее точные приборы. Наиболее широкое применение в этой области получило использование вибродатчиков и датчиков виброакустической эмиссии.

Поляризованные (обладающие чувствительностью вдоль одной оси) вибродатчики крепятся на элементах упругой системы станка таким образом, чтобы и в совокупности они образовывали ортогональную систему. Такой способ расположения позволяет по одномерным сигналам датчиков, фиксирующих одну из проекций колебаний, сформировать пространственную трехмерную картину.

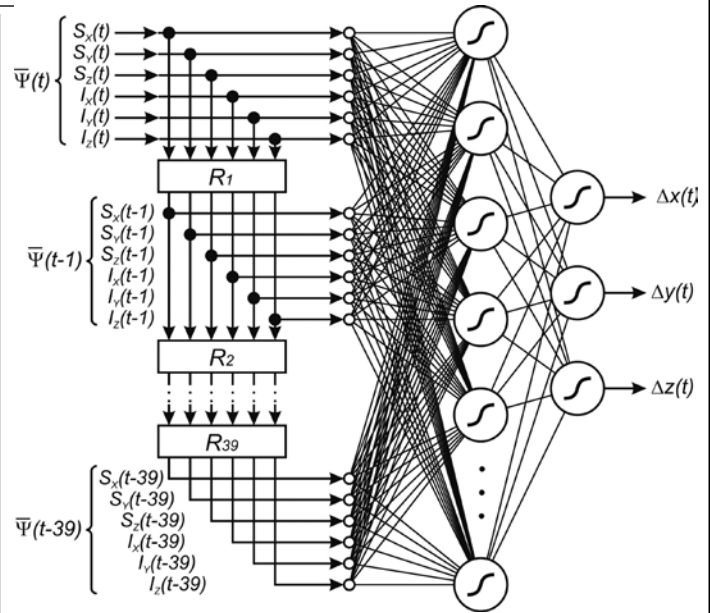


Рис. 4. Структура нейронносетевой динамической модели колебательной системы «инструмент–деталь»

Однако, вследствие волновых явлений в упругой системе станка, вибродатчики помимо полезного сигнала фиксируют достаточно большое количество побочных колебаний, вызванных отражениями волн деформации от разнообразных стыков и переходных сечений элементов конструкций станка, расположенных рядом с местом крепления датчиков. В результате этого восстановленная по результатам виброизмерений траектория движения вершины инструмента является сильно искаженной.

Для диагностики относительных колебаний инструмента и заготовки при резании была разработана нейронносетевая динамическая модель колебательной системы «инструмент–деталь». Применение данной модели позволяет с точностью, сопоставимой с показателями точности прецизионного динамометра, осуществлять непосредственно в процессе резания динамическую диагностику относительных перемещений токарного резца и обрабатываемой детали, используя недорогие виброрегистрирующие датчики и датчики силы тока.

Схема процесса диагностики с использованием модели приведена на рис. 3. В качестве входных данных модели использованы амплитуды сигналов ортогональной системы поляризованных вибродатчиков $S_x(t)$, $S_y(t)$, $S_z(t)$, расположенных на элементах упругой системы станка, а также действующие значения силы тока в обмотках электродвигателей главного привода $I_z(t)$, приводов подачи $I_x(t)$ и $I_y(t)$. В качестве выходных данных приняты амплитудные значения проекций относительных перемещений обрабатываемой детали и инструмента $\Delta x(t)$, $\Delta y(t)$, $\Delta z(t)$.

Действующие значения токов характеризуют квазистатическую, медленноменяющуюся составляющую силы резания P , а сигналы вибродатчиков позволяют оценить динамику изменения этой силы.

Динамическая модель колебательной системы «инструмент–деталь» формируется на основе двухслойной нейронной сети обратного распространения (рис. 4). Задачей сети является аппроксимация по входным данным параметров траектории вершины инструмента и вычисление предполагаемых значений амплитуды относительных перемещений обрабатываемой детали и инструмента в проекциях.

Первый, входной слой сети содержит 16 нейронов, второй, выходной слой состоит из 3 нейронов. В качестве функции активации нейронов обоих слоев используется экспоненциальный (логистический) сигмоид. Сеть имеет 240 входов, на которые подаются актуальных значений вектора физически измеренных величин $\bar{\Psi}(t) = \{S_x(t), S_y(t), S_z(t), I_z(t), I_x(t), I_y(t)\}$, а также предыстория этого вектора за 39 предыдущих отсчетов времени $\bar{\Psi}(t-1) \div \bar{\Psi}(t-39)$, сформированная с помощью сдвиговых регистров (на рисунке обозначены R1 \div R39). Три выхода сети являются выходами модели.

Входной вектор $\bar{\Psi}(t)$ сети формируется во временной области дискретно, на основе синхронных измерений мгновенных значений сигналов вибродатчиков $\dot{S}_x, \dot{S}_y, \dot{S}_z$ и силы тока $\dot{I}_z, \dot{I}_x, \dot{I}_y$ в обмотках электродвигателей приводов. Измерения проводятся в реальном режиме времени с частотой дискретизации 10000 Гц. Регулярно, с периодичностью 20 Гц, на основе временных рядов, зафиксированных мгновенных значений, производится вычисление амплитуд вибраций $S_x(t), S_y(t), S_z(t)$ и действующих значений токов $I_z(t), I_x(t), I_y(t)$, то есть задается очередной временной отсчет вектора $\bar{\Psi}(t)$.

Таким образом, время реакции модели составляет 0,05 секунды, емкость хранения предыстории развития колебательных процессов в системе «инструмент–деталь» (максимальная продолжительность учитываемых переходных явлений) равна 2 секундам.

Моделирование динамических параметров колебательной системы «инструмент–деталь» проводится путем обучения сети. Обучающая выборка формировалась на основе сопоставления значений входных параметров для различных вариаций режима резания и величин, относительных микроперемещений обрабатываемой детали и режущего инструмента $\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t)$, вычисляемых на основании проекций силы резания, определяемых с помощью прецизионного динамометра.

Обучение сети проводится с использованием алгоритма обратного распространения ошибки. Во избежание эффекта переобучения финальным шагом формирования сети производится процедура контрастирования синаптических весов.

После обучения нейронная сеть способна идентифицировать динамическое состояние упругой системы станка (отличать устойчивое резание от неустойчивого, прогнозировать параметры траектории перемещений вершины резца) и диагностировать амплитудные значения колебаний режущего инструмента относительно обрабатываемой детали

в проекциях на оси координат станка.

Аппаратно предлагаемая нейронносетевая модель может быть выполнена на основе небольшого количества микроселектронных компонентов, большинство из которых широко используются в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Для динамической регистрации мгновенных значений $\dot{S}_x, \dot{S}_y, \dot{S}_z, \dot{I}_z, \dot{I}_x$ и \dot{I}_y в состав аппаратной модели должны входить аналоговый коммутатор и аналого-цифровой преобразователь. Управление входными устройствами модели, подсчет амплитуд вибраций $S_x(t), S_y(t), S_z(t)$ и действующих значений токов $I_z(t), I_x(t), I_y(t)$ следует возложить на сигнальный процессор, а всю вычислительную нагрузку по нейронносетевой обработке данных возьмет на себя специализированный нейронносетевой процессор (нейрочип), содержащий в своих регистрах памяти нейронносетевую динамическую модель колебательной системы «инструмент–деталь», полученную на этапе обучения. В качестве конечного формирователя выходных параметров модели $\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t)$ может использоваться цифроаналоговый преобразователь.

Применение динамических моделей процессов механической обработки, построенных на основе нейронных сетей, в системах управления металлорежущими станками позволяет контролировать динамическую устойчивость рабочих процессов ВСО, добиваясь при этом повышения точности и производительности обработки, снижения темпов износа режущего инструмента и станочного оборудования, то есть улучшения основных показателей эффективности механической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин Ю.Г. Синергетический подход к анализу динамических процессов в металлорежущих станках / Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И., Бурков А.А. // СТИН, 2003, №1 и №2. С. 3 – 6.
2. Кабалдин Ю.Г. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием / Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И., Шпилев А.М., Бурков А.А. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 195 с.
3. Кудинов В.А. Динамика станков / Кудинов В.А. – М.: Машиностроение. 1967. – 360 с.
4. Малинецкий Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 336 с.
5. Металлорежущие станки / Под ред. В.Э. Пуша. – М.: Машиностроение, 1985. – 576 с.

Космынин А.В., Щетинин В.С.

A.V.Kosmynin, V.S.Schetinin

05.08.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ ГАЗОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА DEFINING LOAD CAPACITY OF A GAS-MAGNETIC BEARING IN A HIGH-SPEED SPINDLE ASSEMBLY



Космынин Александр Витальевич, доктор технических наук, профессор, декан ФЭТМТ, Комсомольский-на-Амуре Государственный технический университет (КНАГТУ), тел. 8 (4217) 534191. E-mail: avkosm@knastu.ru

Alexander V. Kosmynin — Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Transport and Marine Technologies, State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur), phone: 8 (4217) 534191, e-mail: avkosm@knastu.ru.



Щетинин Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, докторант, Комсомольский-на-Амуре Государственный технический университет (КНАГТУ), тел. 8 (4217) 531474. E-mail: schetynin@mail.ru

Alexander V. Kosmynin — Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Transport and Marine Technologies, State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur), phone: 8 (4217) 531474, e-mail: schetynin@mail.ru.

Аннотация: Рассмотрена методика расчета несущей способности газоманитной опоры высокоскоростного шпиндельного узла. Учтено влияние на характеристики шпиндельного узла магнитной силы и сил, созданных газовым слоем от внешнего наддува, и газодинамического эффекта.

Summary: The paper examines the method of calculation of load capacity of a gas-magnetic bearing in a high-speed spindle assembly. We took into account the influence of magnetic force and forces created by pressure-fed gas layer and of gas-dynamic effect upon the parameters of a spindle assembly.

Ключевые слова: шпиндельный узел, газоманитная опора, шпиндельные подшипники, газостатические подшипники, несущая способность, жесткость шпиндельного узла.

Keywords: spindle assembly, gas-magnetic bearing, spindle bearings, gas-static bearings, load capacity of a bearing, spindle assembly rigidity.

Развитие современной промышленности предъявляет повышенные требования к технологическому оборудованию по производительности и точности. Одним из видов такого оборудования являются шлифовальные станки, применяемые на финишных опе-

рациях. В основном точность и производительность такого оборудования зависит от шпиндельного узла, установленного на станок.

Высокоскоростные шпиндельные узлы для шлифовальных станков должны обладать достаточной несущей способностью для обеспечения высокой производительности. Для достижения высоких скоростей в шпиндельных узлах применяют газостатические или магнитные опоры.

Газостатические опоры способны обеспечить высокие скорости вращения вала и практически являются долговечными из-за отсутствия контакта между шипом и вкладышем [1]. Главным недостатком этих опор является сравнительно низкая несущая способность. Поэтому они находят ограниченное применение в машиностроении. Известны также бесконтактные опоры на магнитных подвесах. Широкое применение магнитных подвесов затрудняется сложностью их управления, а также тепловыделением от индукционных токов, возникающих от перемагничивания вала, вращающегося на высокой частоте.

Для расширения области использования бесконтактных опор в высокоскоростных устройствах предложена комбинированная газоманитная опора [2], которая обладает повышенной несущей способностью за счёт сложения магнитных и газовых сил. При этом газ, проходящий через зазор между валом и вклады-

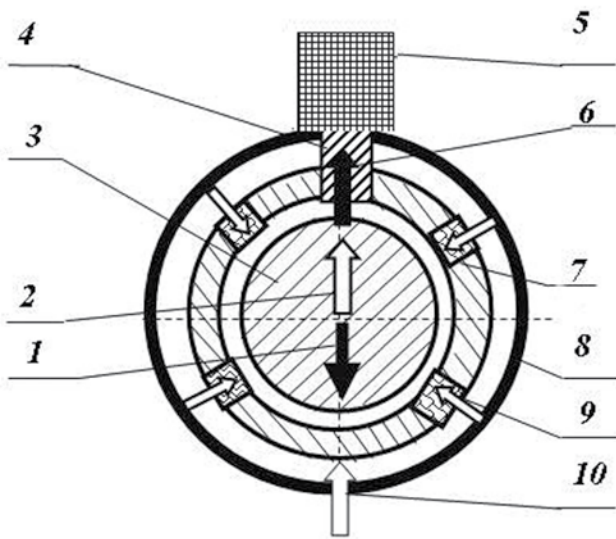


Рис. 1. Конструкция газомангнитной опоры:
 1- внешняя нагрузка; 2-газостатическая сила;
 3-шпиндель; 4-магнитопровод; 5-электромагнит;
 6- магнитная сила; 7-пористая вставка; 8- корпус;
 9- наддув газа в пористые вставки; 10 - подача газа

узлах, в которых основная нагрузка от сил резания ориентирована в радиальном направлении.

Методика расчета газовых опор с пористыми вставками достаточно полно представлена в монографии [3], а практические расчеты активных магнитных подвесов изложены в работе [4]. В настоящей работе предлагается методика расчета комбинированной газомангнитной опоры с частично пористой стенкой вкладыша, принципиальная схема которой показана на рис. 1.

Так как поле давления газовой смазки и магнитное поле имеют разную физическую природу, то они не оказывают влияния друг на друга. Учитывая вышесказанное, силовое взаимодействие газового и магнитного полей на вал допустимо рассматривать отдельно. Тогда несущую способность комбинированной опоры найдем как векторную сумму двух сил - магнитной и газовой:

$$\vec{Q} = \vec{Q}_z + \vec{Q}_m,$$

где \vec{Q}_z - газовая составляющая несущей способности; \vec{Q}_m - магнитная составляющая несущей способности.

На рис. 2 представлена расчётная схема газомангнитного подшипника.

Силу притяжения магнитного подвеса определим из уравнения:

шем, является охлаждающим агентом. Это, в свою очередь, позволяет применять большие магнитные силы. Управление магнитным подвесом в газомангнитной опоре не требуется, так как система является самоорганизующейся. При смещении вала в эксцентричное положение магнитные и газовые силы противостоят внешней нагрузке, в результате чего шип занимает определённое пространственное положение.

Предлагаемый тип опоры целесообразно использовать, например, в высокоскоростных шпиндельных

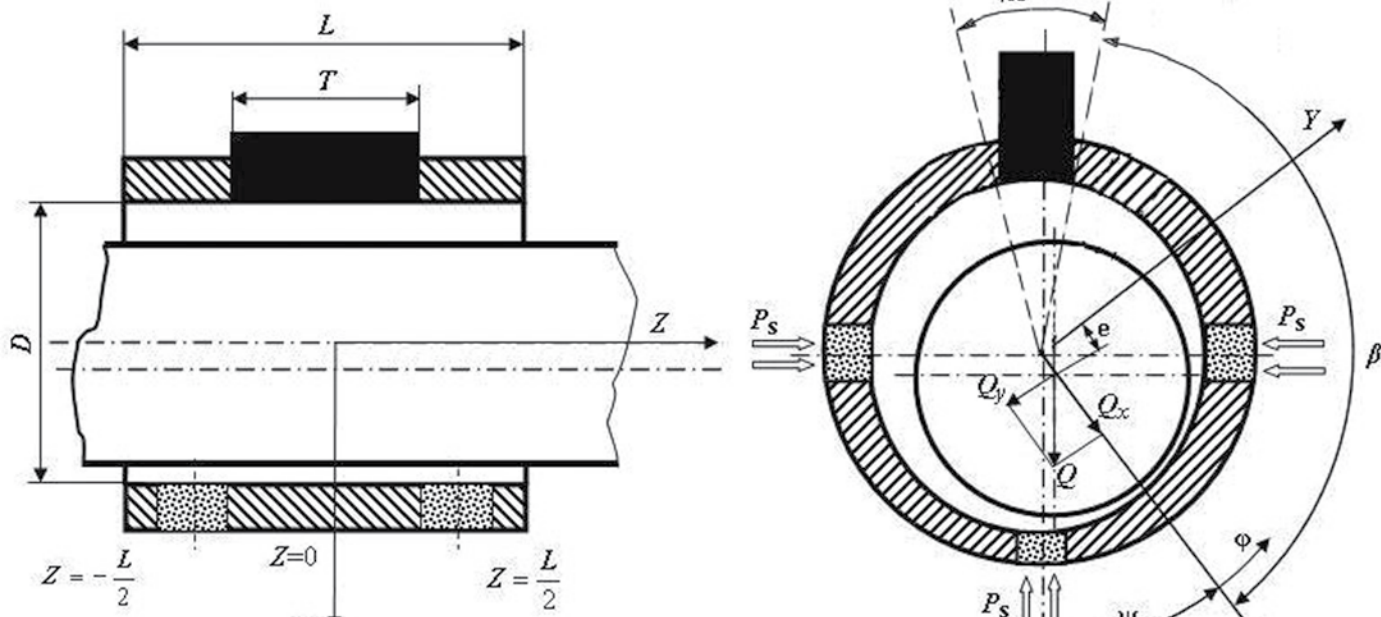


Рис. 2. Расчётная схема газомангнитной опоры:
 1 – пористая цилиндрическая вставка; 2 – непроницаемая втулка; 3- сердечник соленоида

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ ГАЗОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА

$$dQ_M = \frac{B^2}{2\mu_0} dS, (1)$$

где μ_0 - магнитная постоянная.

Из уравнения (1) следует, что магнитная сила притяжения, действующая на элемент площади ферромагнитного тела (dS) в однородном магнитном поле прямо пропорциональна индукции в зазоре (B). Поскольку отношение величины зазора между магнитопроводом и валом к линейным размерам поверхности магнитопровода меньше, чем 10^{-4} , то примем допущение об однородности магнитного поля.

Учитывая изменение индукции от величины зазора, зависимость (1) можно представить в виде:

$$dQ_M = K_3 h^{-2} dS,$$

где $K_3 = 0,5\mu_0(i\pi)^2$ - коэффициент учитывающий электрические параметры соленоида; i - сила тока в соленоиде; n - число витков соленоида, h - воздушный зазор между валом и полюсом электромагнита.

Несущая способность магнитного подвеса определим как:

$$Q_M = \sqrt{Q_{xM}^2 + Q_{yM}^2},$$

где Q_{xM} и Q_{yM} - проекции на ось x и y вектора магнитной силы. Эти проекции находятся из выражений:

$$Q_{xM} = K_3 B T \left[\cos\left(\psi - \frac{\varphi_M}{2}\right) \int_{\beta}^{\beta+\varphi_M} \frac{d\varphi}{h^2} \right], (2)$$

$$Q_{yM} = K_3 B T \left[\sin\left(\psi - \frac{\varphi_M}{2}\right) \int_{\beta}^{\beta+\varphi_M} \frac{d\varphi}{h^2} \right]$$

где ψ – угол положения нагрузки, β – окружная координата начала первого полюса, φ_M - полюсный угол, T – длина электромагнита, B – ширина электромагнита.

Используя зависимости (2), а также методику расчета газостатической опоры [3], выполним оценочный расчет несущей способности газостатической и газомангнитной опор и попутно сравним с опытными данными. Описание конструкции экспериментального стенда и результатов эксперимента приведены в работе [5].

Расчеты, как и эксперимент, проведены для опоры длиной $L=60$ мм и диаметром вкладыша $D=50$ мм при абсолютном давлении наддува $p=6$ МПа.

На рис. 3 показана зависимость несущей способности опор Q от частоты вращения вала n и относитель-

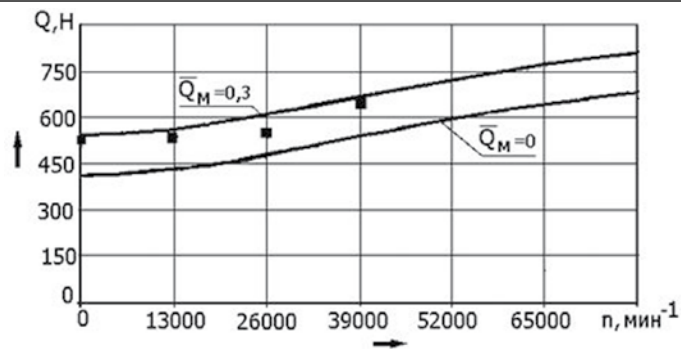


Рис. 3. Зависимость несущей способности опор Q от частоты вращения вала n и относительной магнитной силы \bar{Q}_M

ной магнитной силы \bar{Q}_M , которая определяет долю магнитной силы от максимальной газостатической силы:

$$\bar{Q}_M = \frac{Q_M}{Q_z^{max}} = \frac{Q_M}{pLD}$$

Как видно из представленных графиков, несущая способность газомангнитного подшипника при $\bar{Q}_M=0,3$ на 10...30% выше, чем у газостатической опоры ($Q_M=0$). При этом экспериментальные точки, соответствующие $\bar{Q}_M=0,3$, достаточно близко лежат к теоретической кривой.

В настоящее время в Комсомольском-на-Амуре ГТУ ведутся работы по широкомасштабному исследованию характеристик газомангнитных опор и высокоскоростных шпиндельных узлов шлифовальных станков с такими опорами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пуш А.В. Шпиндельные узлы: Качество и надёжность. -М.: Машиностроение. 1992.-228с.
2. Пат. 2347960 РФ. Способ работы подшипникового узла и подшипниковый узел / Космынин А.В., Щетинин В.С.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре государственный технический ун-т. - № 2007120545/11; заявл. 01.06.07; опубл. 27.02.09. Бюл. №6. – 2с.
3. Космынин А.В. и др. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов. – М.: Академия Естествознания, 2006. – 219с.
4. Журавлёв Ю.П. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003.- 206с.:ил.
5. Космынин А.В., Щетинин В.С., Иванова Н.А. Применение магнитной силы в газостатических опорах высокоскоростных шпиндельных узлов// Вестник машиностроения. - 2009.- №5. -С19-21.

Туркенич А. В.
A. V. Turkenitch

05.08.05

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ AUTOMATED VIBRATION-BASED DIAGNOSTIC SYSTEM FOR BALL BEARINGS



Туркенич Александр Викторович — аспирант Дальневосточного государственного университета путей сообщения, начальник отделения центра автоматизированных средств управления ДВО (г. Хабаровск). E-mail: avtcheg@mail.ru

Alexander v. Turkenitch — PhD candidate, the Far East State Communications University, Head of the Department of Automated Control Systems of the Far East Military District (city of Khabarovsk). E-mail: avtcheg@mail.ru

Аннотация: В статье рассмотрена проблема ранней диагностики и прогнозирования дальнейшей работоспособности подшипниковых узлов с наименьшими временными и экономическими затратами. Описано решение данной проблемы путём создания собственной автоматизированной системы вибродиагностики.

Summary: The paper deals with the problem of early diagnostics of bearings and forecasting their capacity in the most time/resource-efficient way. We propose a solution to this problem in the form of an automated vibration-based troubleshooting system.

Ключевые слова: Автоматизированная система, вибродиагностика, пикфактор, микроконтроллер, АЦП, УСБ.

Keywords: automated system, vibration-based diagnostic system, peak factor, microcontroller, ADC, USB.

Проблемы современной диагностики машин и механизмов

Одной из важнейших проблем создания нового, а также модернизации и эксплуатации существующего оборудования промышленности является обеспечение его средствами технической диагностики. В современных системах диагностики механического и электромеханического оборудования абсолютное большинство диагностических задач решается методами вибрационного мониторинга и диагностики, и именно они составляют основу любой системы технической диагностики. Но на эксплуатируемом оборудовании в России до сих пор работа по внедрению систем диагностики ведется недостаточно [1].

В настоящее время методы обслуживания машин и механизмов принято подразделять в общем случае на три вида: [1]

1. Первый вид - обслуживание оборудования после выхода его из строя.

В этом случае машины и оборудование эксплуатируются до выхода их из строя. В основном это касается дешевого вспомогательного оборудования при наличии его резервирования, когда замена оборудования дешевле, чем затраты на его ремонт и обслуживание. В отсутствие резервирования на время ремонта производственный процесс приходится останавливать.

2. Второй вид обслуживания - обслуживание оборудования по регламенту.

В этом случае обслуживание производится в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя через определенные промежутки времени, независимо от технического состояния оборудования. Такой вид обслуживания обычно называется планово-профилактическим.

Проведённые исследования показали, что не менее 50 % из числа всех технических обслуживаний по регламенту выполняются без фактической их необходимости [1].

3. Третий вид обслуживания - обслуживание по фактическому техническому состоянию.

При этом виде обслуживания состояние машин и механизмов контролируется или периодически (при отсутствии дефектов), или в зависимости от результатов диагностики и прогноза технического состояния.

Проведение технического обслуживания в этом случае производится только тогда, когда это необходимо в связи с наступлением высокой вероятности отказа оборудования, определяемой методами технической диагностики. Тем самым не нарушается работа исправного механизма из-за вмешательства человека [1].

В большинстве оборудования одним из наиболее уязвимых и трудно поддающихся прогнозированию узлов является подшипник качения. Сложность прогнозирования заключается в том, что его долговечность зависит от множества факторов, которые могут влиять при изготовлении и сборке. Следовательно, при эксплуатации возникают проблемы, вызванные необходи-

Туркенич А.В.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

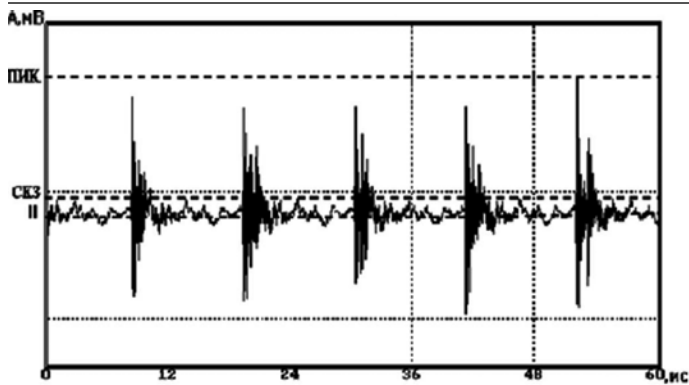


Рис. 1. Вибрация, возбуждаемая ударными импульсами

мостью текущего контроля состояния деталей подшипника качения, с целью определения сроков ремонта.

Для оперативной диагностики подшипника качения наиболее целесообразно применять приборы и устройства, использующие в качестве источника информации процесс излучения вибрационных волн работающим подшипниковым узлом [2]. Подобные средства позволяют без разборки механизма определять текущее состояние деталей узла и оценивать продолжительность его работы без поломок.

Для решения проблемы текущего контроля состояния деталей подшипника существует большое количество сложных и дорогостоящих приборов и устройств [3]. Большинство из них ориентировано для решения определённых задач (например измерение среднеквадратичного значения (СКЗ) виброскорости) и использования на конкретных механизмах (например электродвигателях).

Существует необходимость создать прибор вибродиагностики, на основе несложного метода диагностики, отличающийся простотой в использовании, малогабаритностью и универсальностью, позволяющий принимать решение о необходимости применения более сложного и дорогостоящего диагностического оборудования для детального анализа оборудования либо о его ремонте.

Решение вопроса диагностики в современных условиях

Проведённый анализ методов вибрационного мониторинга и диагностики выявил, что большинство из них являются весьма затратными, поэтому в условиях современной экономической ситуации средства вибродиагностики оборудования не находят широкого применения. Для практического использования одним из самых простых и в то же время информативных методов вибродиагностики является метод ударных импульсов, в отличие от других он позволяет использовать для решения диагностических задач простейшие средства измерения.

Принцип действия метода иллюстрируется примером сигнала, приведенным на рисунке 1.

Как видно из рисунка, вибрация, возбуждаемая

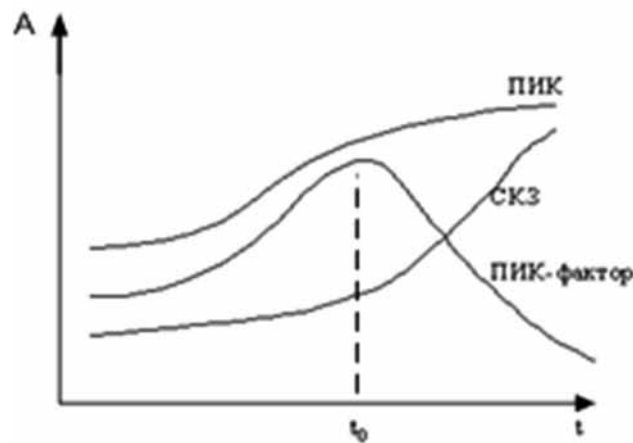


Рис. 2. Метод ударных импульсов [5]

короткими импульсами, значительно изменяет мгновенную (пиковую) амплитуду сигнала, практически не изменяя ее среднеквадратичное значение (СКЗ), называемое мощностью сигнала [4].

Рассмотрим рисунок 2. Максимальное значение сигнала (ПИК) и СКЗ представляют собой монотонные, неубывающие функции одинакового характера, но смещённые друг относительно друга во времени. Сначала, по мере появления и развития дефекта, нарастает функция ПИК, а СКЗ сигнала меняется очень мало, поскольку отдельные, очень короткие амплитудные пики практически не меняют энергетические характеристики сигнала.

В дальнейшем, по мере увеличения и количества пиков, начинает уже соответственно увеличиваться мощность сигнала, возрастает СКЗ вибрации. Сами по себе функции ПИК и СКЗ малоинформативны для диагностики вследствие своей монотонности. Но отношение ПИК/СКЗ, называемое ПИК-фактором, уже представляет значительный интерес, поскольку эта функция из-за временного сдвига между ПИК и СКЗ имеет явно выраженный максимум на временной оси. Так, у случайного сигнала без ударных импульсов типовое значение ПИК-фактора лежит в пределах от 3 до 4, а при появлении редких, но сильных импульсов может превышать значения порядка 20 [4].

Экспериментально было установлено, что момент прохода функции ПИК-фактор через максимум соответствует остаточному ресурсу подшипника порядка 2-3 недель [5].

Структура прибора для измерения ПИК-фактора сигнала вибрации в общем случае показана на рисунке 3.

Для простоты реализации обычно используется механический резонатор в виде металлического стержня с резонансом на частотах выше 25 кГц.

Исследование метода ударных импульсов

Для исследования метода было создано устройство вибродиагностики подшипников качения и смоделирована установка для его тестирования.



Рис. 3. Структура прибора для измерения ПИК-фактора

Функциональная схема устройства приведена на рисунке 4.

Основные элементы устройства, показанные на рисунке:

1. датчик вибросигнала;
2. детектор сигнала;
3. усилитель сигнала;
4. микроконтроллер с АЦП;
5. преобразователь USB-интерфейса;
6. жидкокристаллический индикатор (ЖКИ);
7. клавиатура управления;
8. внешняя память данных.

На рисунке 5 показан общий вид установки для тестирования.

Установка состоит из асинхронного двигателя серии 4А, генератора импульсов Г5-15 и пьезоэлемента марки ЗП-2.

Тестирование производилось следующим образом.

Для эмуляции дефектов подшипника качения на электродвигатель подавались импульсы с генератора Г5-15 через пьезоэлемент, жестко закреплённый на корпусе двигателя.

После включения электродвигателя производилось снятие виросигнала датчиком вибрации АР-40, который также закреплялся на корпусе двигателя.

Далее сигнал подавался на вход детектора сигнала рисунок 6.

После детектирования сигнал подается на вход АЦП микроконтроллера АТ90S8535. Сигнал, получаемый с выхода детектора сигнала, представлен на рисунке 7.

Далее происходит процесс обработки сигнала разработанным устройством — накопление информации (измерений), вычисление СКЗ сигнала и ПИК-фактора.

Данные, сохранённые в устройстве, передавались по интерфейсу USB в ЭВМ, где производилась их обработка в средах Matlab и Excel, соответствующая обработке в реализованном устройстве. Полученные значения СКЗ сигнала и его ПИК-фактора совпали со значениями, показанными системой на ЖКИ, что го-

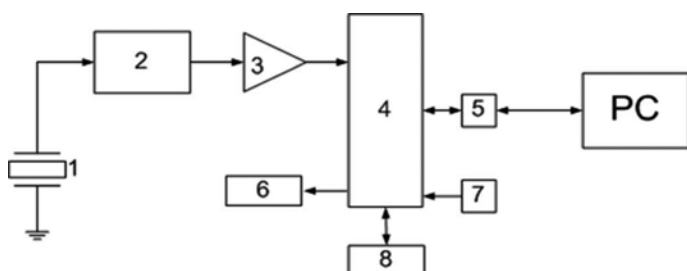


Рис. 4. Функциональная схема устройства

ворит о корректности её работы и возможности для дальнейшего исследования. График, построенный в среде Matlab, на основе принятых от устройства данных, представлен на рисунке 8.

Результаты работы

В результате проделанной работы была разработана и реализована автоматизированная система вибродиагностики подшипников качения, позволяющая в кратчайшие сроки с наименьшими затратами проводить перманентную диагностику подшипниковых узлов. Работа системы основана на простейшем методе ударных импульсов, что не влияет на достоверность получаемых данных. Система позволяет производить измерение амплитуды ударных импульсов, генери-

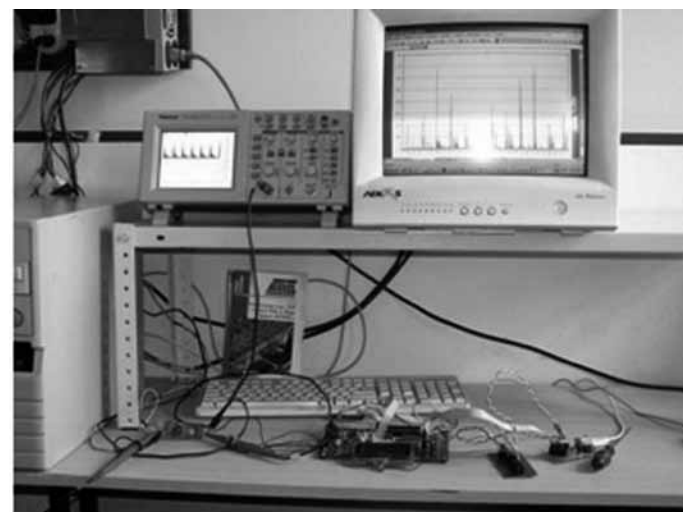
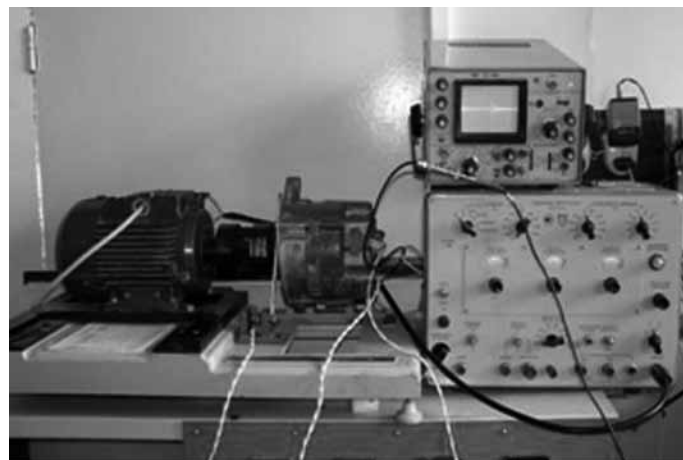


Рис. 5. Установка для тестирования разработанного устройства

Туркенич А.В.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

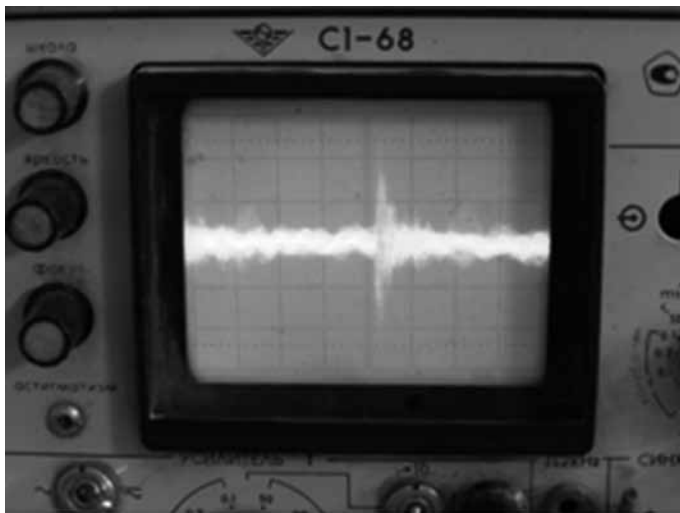
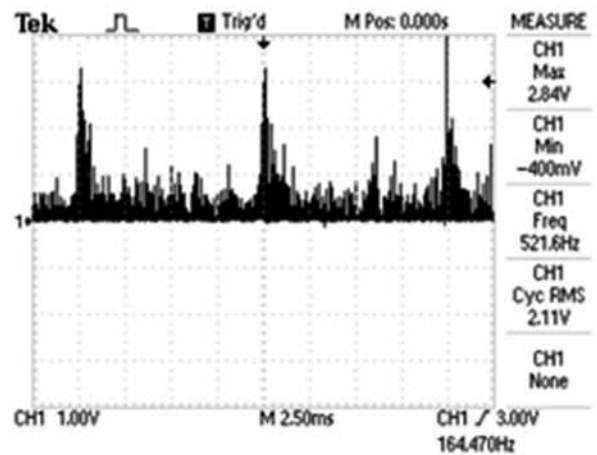


Рис. 6. Сигнал на входе детектора



TDS 1002 - 16:18:44 06.06.2005

Рис. 7. Сигнал на выходе детектора

руемых подшипником качения в диапазоне от 10 Гц до 25 КГц. В ходе одного измерения производится 528 отсчётов, по значениям которых производится вычисление СКЗ и ПИК-фактора с выводом их значений на ЖКИ. Система позволяет запоминать от 10 до 2000 измерений (в зависимости от проведённых настроек).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.А. Азовцев и др. «Диагностика и прогноз технического состояния оборудования целлюлозно-бумажной про-

мышленности в рыночных условиях». – Ж. «Бумага, картон, целлюлоза», №5, 1999 г.

2. Отчёт о НИР: «Разработка технических средств диагностики подшипниковых узлов электрических машин». Хаб. ин-т инженеров ж/д транспорта, 1990. – 22 с.

3. <http://www.vibrocenter.ru> <30.10.09>

4. Барков А.В., Баркова Н.А. Статья: «Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации» – СПб.:ГМТУ, 2000. (www.vibration.com).

5. <http://www.resurs.spb.ru/text/text5.doc> <10.05.2005>

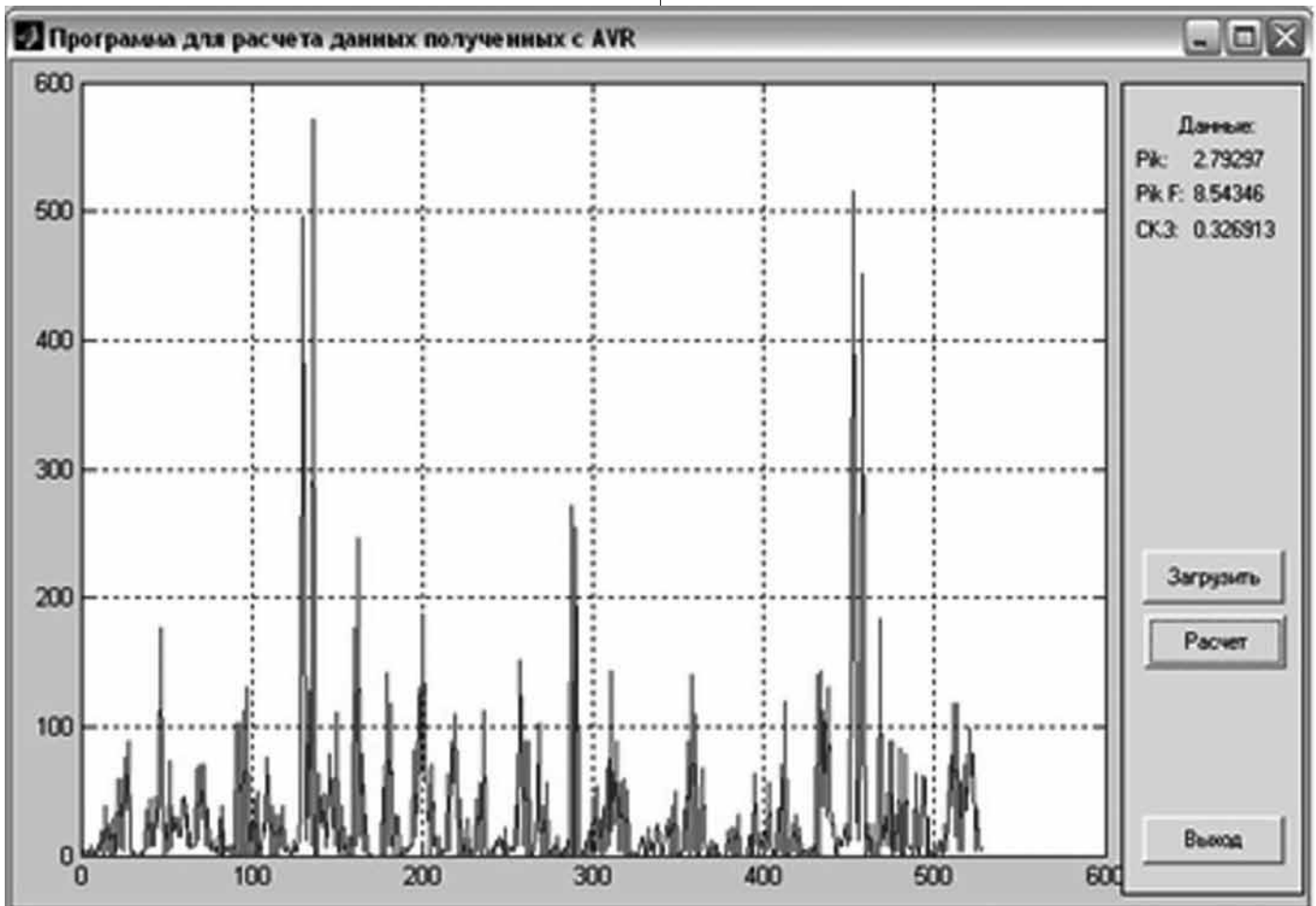


Рис. 8. График в среде Matlab

Ким В. А., Щелкунов Е. Б., Бреев С. В.
V. A. Kim, E. B. Schelkunov, S. B. Breev

05.02.07

ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ROUGHNESS OF MACHINED SURFACE DURING SLAB MILLING



Ким Владимир Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-

Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Vladimir A. Kim — Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

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

Yevgeny B. Schelkunov — PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Бреев Сергей Викторович — аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

Sergey V. Breev — PhD Candidate at the the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Аннотация: Шероховатость при цилиндрическом фрезеровании определяется кинематикой резания, разрушением срезаемого слоя и трением обработанной поверхностью о заднюю поверхность режущего зуба фрезы. Показана роль каждого механизма и циклический характер их проявления.

Summary: Roughness at slab milling is determined by cutting kinetics, by destruction of the skived layer and friction between the machined surface and the back surface of the milling cutter. Each mechanism's role is revealed along with the cyclic nature of the whole process.

Ключевые слова: Шероховатость, фрезерование, радиус режущего клина, кинематика реза-ния, разрушение.

Keywords: roughness, milling, radius of cutting edge, kinetics of cutting, destruction

Шероховатость при резании материала формируется в результате совокупного влияния копирования рельефа режущего лезвия, отображения на обрабатываемой поверхности траектории перемещения режущего клина относительно заготовки, автоколебания относительно этой траектории, наростообразования, деформации и разрушения материала за счет разрыва атомарных связей. Геометрический фактор формирования шероховатости связан с двумя первыми процессами, и образует организованный рельеф, который можно рассчитать на основе кинематики резания [1-4].

Шероховатость в результате разрушения носит стохастический характер, она связана со структурными изменениями материала при пластической деформации и механикой разрушения. Микронеровности при этом возникают за счет разной ориентации микрорельефов разрушения, локальной пластической деформации, выхода дислокаций и других дефектов кристаллического строения на поверхность. Шероховатость в этом случае может быть раскрыта с позиций микрокинетики разрушения материала [5].

При цилиндрическом фрезеровании наибольшая высота организованного профиля шероховатости определяется по формуле (1), теоретически полученной из допущения, что траекторией перемещения режущей кромки зубьев фрезы является дуга окружности, когда неровности микромасштабного уровня возникают в результате смещения дуг относительно друг друга на величину углового шага [1]

$$H_{\max} = \frac{S_z}{8R}, \quad (1)$$

где H_{\max} — максимальная высота неровности; R — радиус фрезы; S_z — подача на зуб.

Однако действительной траекторией перемещения режущего лезвия зуба фрезы относительно обрабатываемой поверхности является трохоида (удлиненная циклоида), представляющая геометрическую сумму кругового и поступательного движений. Схема формирования организованного теоретического профиля шероховатости при трохоидальной траектории представлена на рис. 1. Уравнение трохойды режущего клина первого зуба в параметрическом виде можно представить

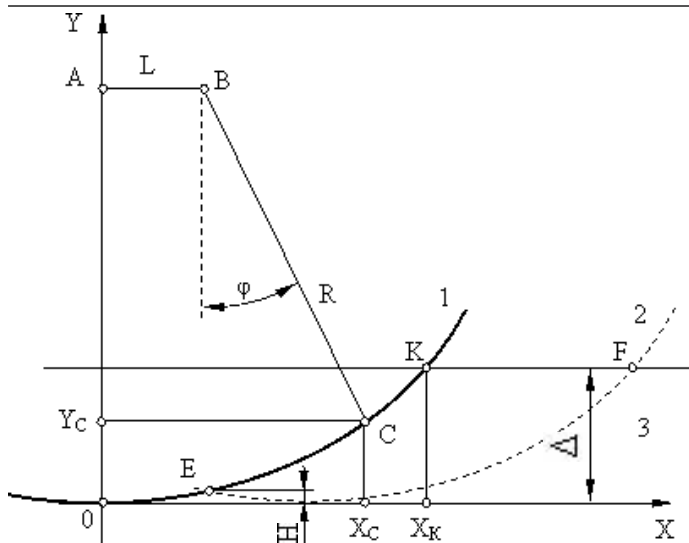


Рис. 1. Схема для определения уравнения движения режущей кромки фрезы относительно заготовки

$$\begin{cases} x = St + R \cdot \sin \omega t \\ y = R(1 - \cos \omega t) \end{cases}, (2)$$

где S — скорость подачи; t — время; ω — угловая скорость фрезы.

Следующий за ним зуб вступает в процесс резания с временным отставанием, пропорциональным угловому шагу между ними. Начало его врезания в обработанную поверхность происходит в точке E .

Обработанная поверхность в результате фрезерования будет складываться из совокупности трохоидальных сегментов, образующих периодически организованный рельеф отклонений от плоскостности. Максимальная высота и шаг неровности принимают значения

$$\begin{cases} p = S_z \\ H_{\max} = R - \sqrt{R^2 - \frac{S_z^2}{4}} \end{cases} (3)$$

Расчеты показывают, что численные значения неровностей H_{\max} могут достигать несколько микрометров и составлять незначительную долю в реальной шероховатости поверхности. Но, как будет показано ниже, кинематика фрезерования оказывает самое активное влияние на шероховатость обработанной поверхности через каналы деформационного процесса.

В реальных условиях резания режущий клин зуба фрезы имеет радиус закругления, величина которого меняется в зависимости от степени износа инструмента. Процесс среза стружки начинается только при превышении толщины удаляемого слоя радиуса закругления, а до этого момента будет иметь место только пластическое смятие обрабатываемого материала. На рис. 2, а представлена схема разделения потоков обрабатываемого материала у вершины режущего клина, имеющего радиус закругления при прямолинейном перемещении инструмента и постоянной толщине срезаемого слоя. При фрезеровании режущая кромка перемещается по трохоиде. Это равносильно тому, что толщина срезаемого слоя не является постоянной (рис. 2, б), и приводит к изменению кинематического переднего угла γ , поэтому точка разделения потоков U может смещаться вдоль кривой закругления режущего клина. В зоне разделения потоков обрабатываемый материал испытывает растягивающие напряжения, и там может возникать «опережающая» трещина или «разрыхленная» область пластического разрушения.

Поток J_1 формирует стружку и подвергается сжатию и сдвигу, а поток J_2 — смятию. В результате обработанная поверхность подвергается деформационному упрочнению, величина которого зависит от радиуса закругления режущего клина, толщины срезаемого слоя

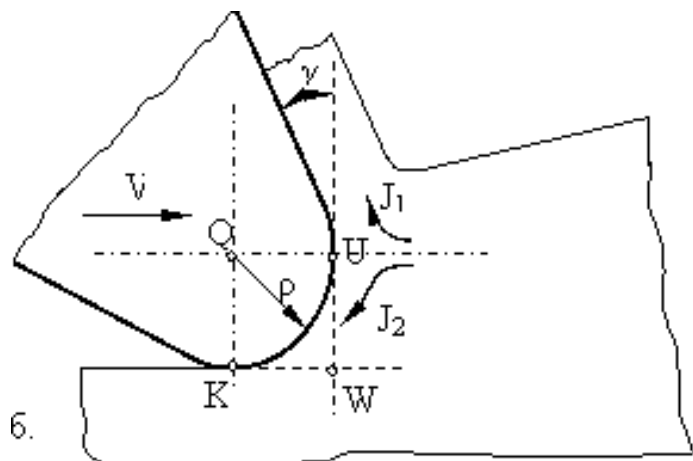
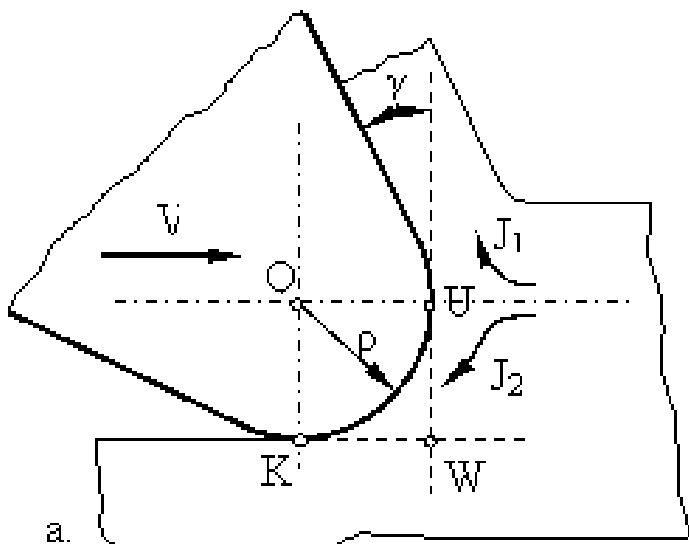


Рис. 2. Геометрия режущего клина и разделение потоков срезаемого слоя: а — при постоянной толщине срезаемого слоя; б — при переменной толщине срезаемого слоя

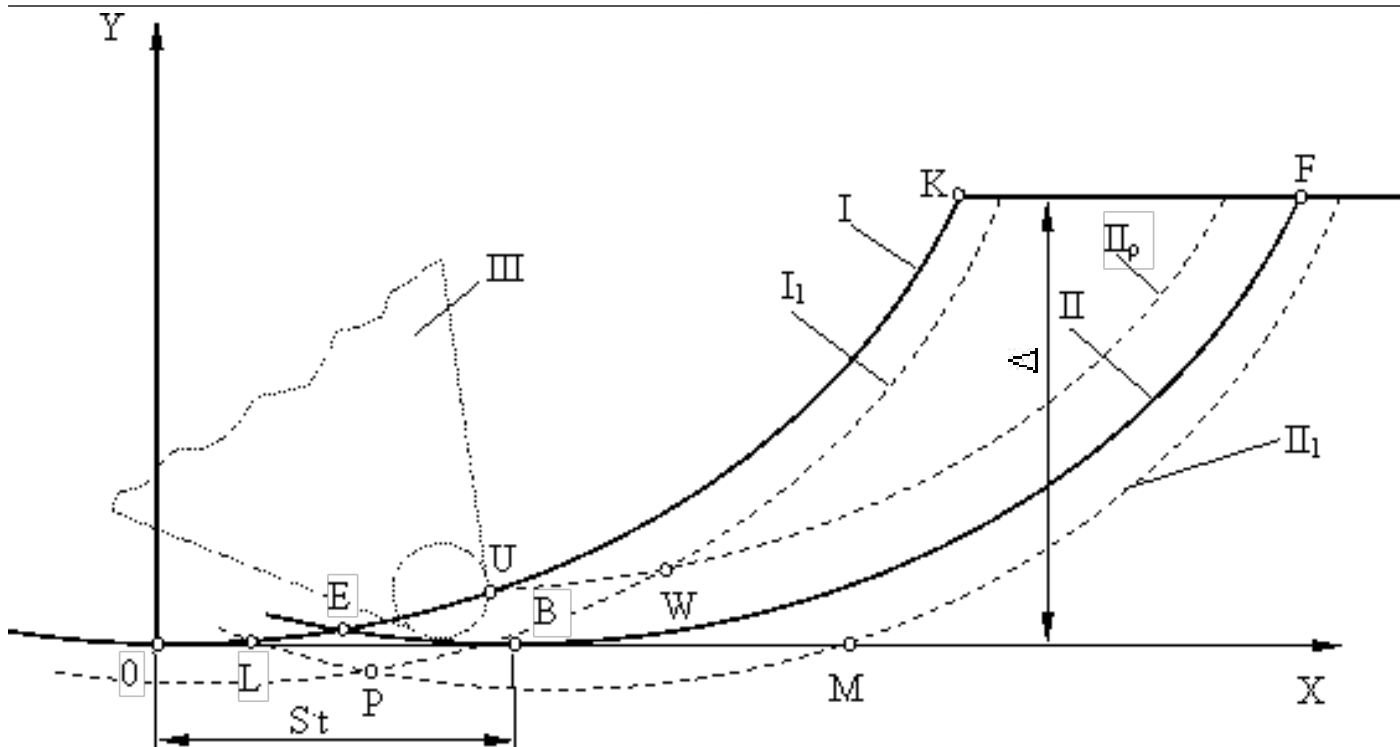


Рис. 3. Схема развития деформированного слоя на обработанной поверхности

и физико-механических свойств обрабатываемого материала. В реальном процессе разделение потоков J1 и J2 будет происходить значительно позже, чем условие достижения толщины срезаемого слоя величины радиуса закругления режущего клина. При фрезеровании относительно хрупких материалов происходит разделение потоков J1 и J2, связанное с упруго-пластической деформацией материала и достижением в зоне разрыва напряжений, равных пределу прочности на растяжение, а при обработке относительно вязких материалов — напряжений, равных пределу текучести на сдвиг. Характер пластической деформации в мо-

мент разделения потоков также будет отличаться в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала. При резании хрупких материалов разделение потоков J1 и J2 сопровождается развитием «опережающей» трещины, направленной по вектору скорости резания, а при фрезеровании пластичных материалов — образованием полос скольжения, ориентированных под углом $\pi/4$ к вектору скорости резания, а при обработке вязких материалов — развитием «разрыхленной» зоны. Теоретически определение периода начала разделения потоков J1 и J2 представляет сложную задачу, поэтому при схематизации деформационных процессов будем считать, что условие разделения определяется равенством толщины срезаемого слоя радиусу закругления режущего клина.

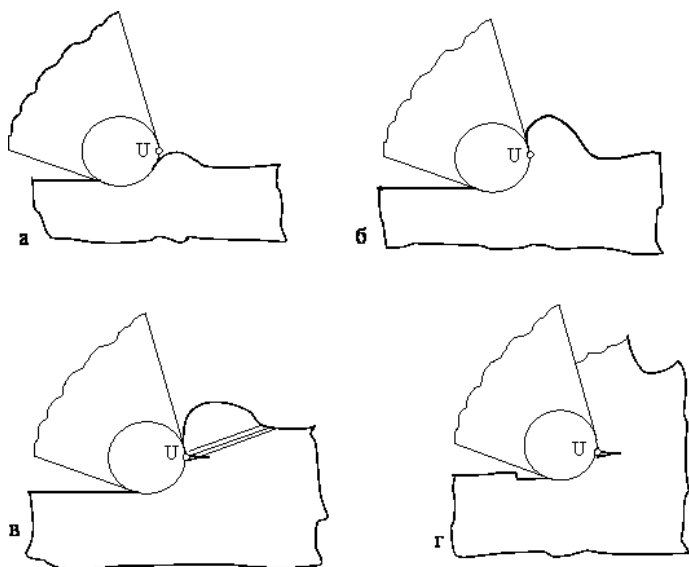


Рис. 4. Основные стадии развития упруго-пластической волны

На рис. 3 показано формирование упрочненного пластическим деформированием слоя обработанной поверхности. При резании первым зубом контур обработанной поверхности определяется линией I, а глубина упрочненного слоя определяется линией I1. Следующий за ним зуб формирует поверхность II и границу упрочненного слоя II1. Срезаемый слой начинает формироваться в точке U, при этом граница разделения потоков J1 и J2 будет соответствовать линии IIp. Линия IIp располагается эквидистантно линии II на расстоянии радиуса закругления ρ . Линии I1 и II1 проходят эквидистантно соответственно линиям I и II. Тогда упрочненный слой будет состоять из областей, ограниченных дугой LM, смещенных относительно друг друга на величину шага ρ между вершинами выступов E.

Объем материала, ограниченный областью EKF, будет подвергаться двойному пластическому деформированию, первый раз при образовании обработанной поверхности в основном смятием, а вто-

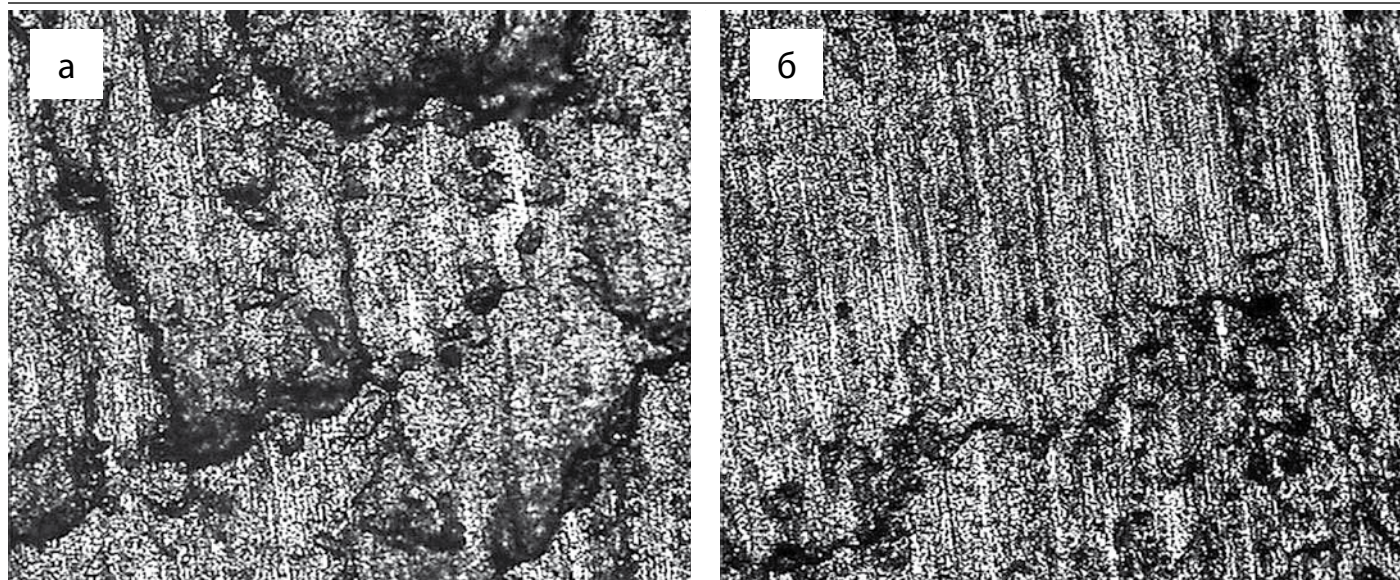


Рис. 5. Зона начала образования стружки при фрезеровании У8 на различных подачах на зуб: а — подача 35 мм/мин; б — подача 390 мм/мин

рой — при удалении стружки, и, следовательно, большем деформационном упрочнении. Зона LEBP является частью обработанной поверхности, которая подвергается двойному смятию, если ширина этого слоя LB превышает подачу на зуб, то вся обработанная поверхность будет складываться из фрагментов двойного смятия.

Микронеровность обработанной поверхности определяется характером пластической деформации при смятии и врезании режущего клина. Сечение удаляемого слоя в случае остро заточенного режущего клина представляет треугольник EKF, ограниченный двумя дугами EK и EF и прямым отрезком FW (рис. 3). Толщина удаляемого слоя определяется до точки К разностью координат линий I и II, и после точки К разностью координат отрезка FW и линии II. Или то точки К

$$\delta(y)_{EK} = R \left[\cos \omega t - \cos \omega \left(t - \frac{\Phi_L}{\omega} \right) \right] \quad (4)$$

и после точки К

$$\delta(y)_{FW} = \Delta - R \left[1 - \cos \omega \left(t - \frac{\Phi_L}{\omega} \right) \right] \quad (5)$$

При учете радиуса закругления режущего клина и разделения потоков обрабатываемого материала толщина удаляемого слоя уменьшается на величину радиуса закругления.

Из выражений (4) и (5) следует, что при срезании удаляемого слоя его толщина до точки К увеличивается, а затем снижается до нуля. Пропорционально площади сечения срезаемого слоя меняются напряжения, действующие на режущий клин, являющиеся основной причиной циклирования силы фрезерования. Переменность сечения срезаемого слоя приводит к тому, что деформационные и геометрические характеристики стружкообразования принимают раз-

ные значения в каждый момент времени.

Разделение удаляемого слоя на два массовых потока J1 и J2 приводит к тому, что процесс резания начинается не в точке E контакта режущего клина с заготовкой, а в точке U, координаты которой вычисляются

$$\begin{cases} X_U = \frac{S\Phi_L}{\omega} + r = \frac{2\pi S}{Z\omega} + r \\ Y_U = R + r - \sqrt{R^2 - \frac{S^2\Phi_L^2}{4\omega^2}} \end{cases} \quad (6)$$

Началу образования срезаемого слоя предшествует появление упругопластического вала, основные этапы развития которого схематично приведены на рис. 4. Упругопластический вал возникает впереди режущего клина за счет его упругого внедрения и оттеснения срезаемого слоя. Упругопластический вал и примыкающая к нему область содержит повышенное значение упругой и внутренней энергии, которая в основном концентрируется вокруг дефектов кристаллического строения и носителей пластической деформации [6]. По мере повышения толщины срезаемого слоя возрастают контактные нагрузки и расширяется зона распространения упругопластической деформации, пропорционально которой увеличивается и энергия упругой деформации. Когда толщина срезаемого слоя превысит радиус закругления режущего клина, то в локальной области точки U возникают растягивающие напряжения. С дальнейшим внедрением режущего клина растягивающие напряжения достигают величин, превышающих предел прочности на растяжение, в результате образуется «опережающая» трещина, другие виды потери сплошности материала или происходит пластический сдвиг. Учитывая, что обрабатываемый материал подвергается сильно-

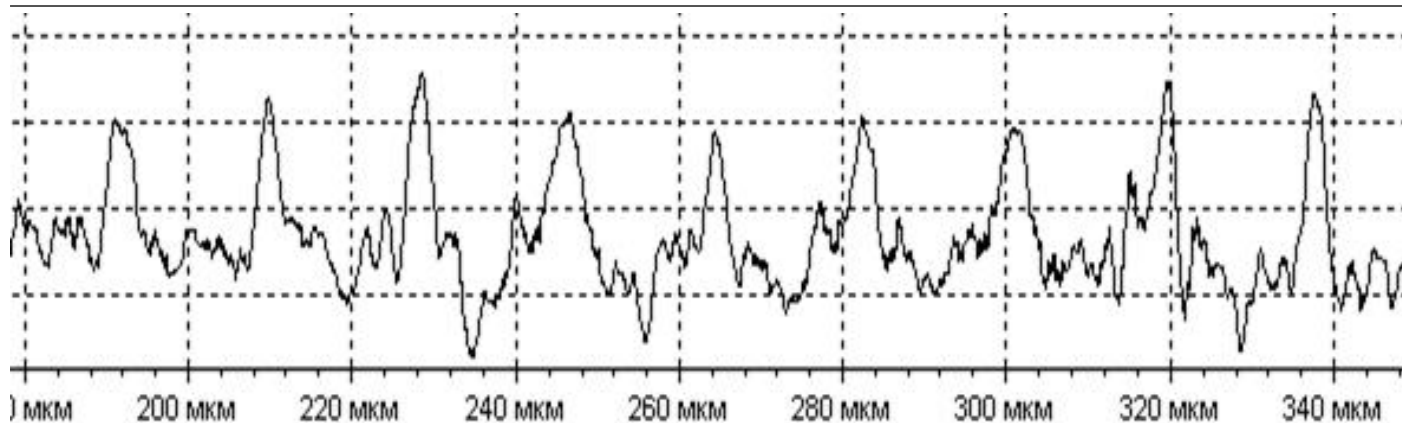


Рис. 6. Фрагмент профилограммы (материал У8, 35 мм/мин)

му деформационному упрочнению наиболее вероятно развитие «опережающей» трещины.

Образование «опережающей» трещины сопровождается импульсным выбросом упругой энергии, пропорциональной объему деформированной области. Направление развития трещины совпадает с вектором истинной скорости резания в точке U . При этом длина трещины в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала может достигать значительных величин, а ее «берега» несут следы хрупкого разрыва. Зона распространения трещины, проходя через область контактного взаимодействия обработанной поверхности с задней поверхностью режущего клина, подвергается дополнительному искажению за счет наложения на нее упругопластического вала. Учитывая, что в этот момент величина упругой составляющей напряженного состояния зоны стружкообразования достигает максимума, то при разделении потоков $J1$ и $J2$ возникает неровность в виде ступеньки со следами разрыва материала. При выходе обработанной поверхности из зоны контакта с задней поверхностью режущего клина происходит упругое восстановление, величина которого пропорциональна абсолютной деформации срезаемого слоя. Поэтому величина упругого восстановления принимает наибольшее значение в зоне разделения потоков $J1$ и $J2$.

На самой обработанной поверхности эти неровности носят организованный периодический характер, шаг которых соответствует подаче на зуб, а возникающая при этом неровность значительно превосходит теоретическую кинематическую составляющую.

Процессы наростообразования вносят дополнительную лепту в развитие шероховатости. Наиболее высокая активность адгезионных процессов наблюдается при максимальных контактных напряжениях, которые имеют место в момент разделения потоков $J1$ и $J2$ и образования «опережающей» трещины. В этот момент следует ожидать наличие наибольшего нароста. Образование трещины вызывает динамический импульс, в результате чего нарост срывается и переносится на обработанную поверхность, подвергается пластическому смятию при взаимодействии с задней поверхностью режущего клина, оставляя на обрабо-

танной поверхности неровность.

На рис. 5 приведена макроструктура обработанной поверхности при различных режимах фрезерования, на которых четко просматриваются следы пластических деформаций, наростообразования и фрикционных контактных процессов.

Представленный на рис. 6 фрагмент профилограммы, снятый в направлении движения инструмента, показывает, что шаг микронеровности носит организованный характер в строгом соответствии с кинематикой фрезерования, а высота микронеровности значительно превосходит H_{max} и несет следы пластической деформации и наростообразования.

На основании изложенного можно сделать следующее заключение.

Геометрический фактор, связанный с кинематикой фрезерования, не оказывает существенного влияния на шероховатость обработанной поверхности, но играет активную роль в процессах пластической деформации при формировании стружки и смятия поверхностного слоя. Возникающая при этом зона развития «опережающей» трещины и вал упругопластической деформации впереди режущего клина создает на обработанной поверхности неровности микро-, мезо- и макромасштабного уровня, шаг которых носит организованный характер, соответствующий подаче на зуб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. — 344 с.
2. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.
3. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностроительных и приборостроительных спец. Вузов. — М.: Высшая шк., 1985. — 304 с.
4. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. — М.: Машгиз, 1954. — 368 с.
5. Хецберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов: Пер. с англ./Под ред. И.Л. Бернштейна и С.П. Ефименко, — М.: Металлургия, 1989. — 576 с.
6. Балохонов Р.Р., Болеста А.В., Бондарь М.П. и др. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах/отв. ред. В.Е. Панин. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — 520 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ A MATHEMATICAL MODEL OF NON-LINEAR OSCILLATIONS AND DETERMINATION OF CONDITIONS FOR NONSTABILITY OF A PROCESS SYSTEM WHILE DRILLING



Еренков Олег Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Химической переработки природных ресурсов Тихоокеанского государственного университета. E-mail: erenkov@list.ru

Oleg Yu. Erenkov — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Department of Chemical Processing of Natural Resources, the Pacific State University, e-mail: erenkov@list.ru



Ивахненко Александр Геннадьевич — доктор технических наук, заведующий кафедрой «Управление качеством» Курского государственного технического университета. E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru

Alexander G. Ivakhnenko — Doctor in Engineering, Head of Department of Quality Management at the City of Kursk State Technical University, e-mail: ivakhnenko2002@mail.ru

Аннотация: Рассмотрено применение гипотезы неустойчивости нелинейных динамических систем при точении полимерных материалов. Представлена математическая нелинейная модель колебаний. Проведена экспериментальная проверка гипотезы неустойчивости. Установлено, что неустойчивость при обработке характеризует прерывание процесса стружкообразования.

Summary: The paper discusses the application of the hypothesis of non-linear dynamic systems instability to the process of polymeric materials turning. A mathematical non-linear model of oscillations is presented. An experimental validity check of the non-stability hypothesis was performed. It was proved that instability during turning of polymeric materials leads to breaks in the chip formation process.

Ключевые слова: динамическая система, нелинейная модель колебаний, жесткость, демпфирование колебаний, режимы резания, стружкообразование, зоны стабильности.

Keywords: dynamic system, mathematical non-linear model, stiffness, damping of oscillations, cut parameters, chip formation, stability zones.

В работе [2] предложена гипотеза неустойчивости динамических систем, в которой рассмотрены условия ее возникновения, и показано, что неустойчивость может возникать только в нелинейных си-

стемах, и данное свойство отличается от устойчивости. Неустойчивость проявляется как разрыв связей между ускорениями, скоростями и перемещениями для процесса, достаточно близкого к заданному процессу, и возникающему при вариации сил, нелинейно зависящих от переменных состояния исходного процесса. Изучение неустойчивости в [2] проводилось на примере механизма с двумя степенями свободы и произвольно выбранной силой нелинейного сопротивления, поэтому выводы по этой работе содержат вопрос, а что, собственно, означает это явление, названное неустойчивостью.

В данной работе рассмотрено применение гипотезы неустойчивости при исследовании процесса точения полимерных материалов. За основу принята неоднократно апробированная модель колебаний технологической системы при точении [1, 3]. На рис. 1 представлена принятая расчетная схема технологической системы. На заготовку действуют составляющие силы резания P_x , P_y , P_z , а на инструмент те же составляющие силы резания, но взятые с обратным знаком, т. е. — P_x , $-P_y$, $-P_z$. Коэффициенты жесткости для заготовки и инструмента обозначены: по оси X — j_1 и c_1 , Y — j^2 и c^2 , Z — j^3 и c^3 . Коэффициенты демпфирования для детали и инструмента: по оси X — H_1 и h_1 , Y — H_2 и h^2 , Z — H_3 и h^3 . Инерционные коэффициенты для детали и инструмента: по оси X — M_1 и m_1 , Y — M_2 и m^2 , Z — M_3 и m^3 ; т. е. принято, что инерционные коэффициенты одинаковы для изгибных колебаний (для детали — по осям Y и Z , а для инструмента — по осям X и Z), и отличаются от инерционных коэффициентов

Поступила в редакцию 25.12.2009.

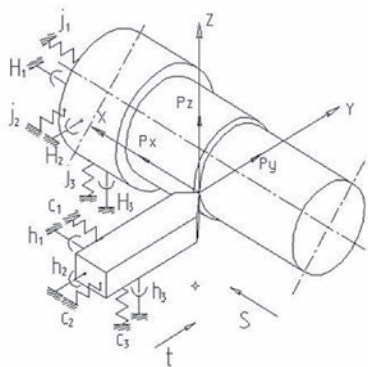


Рис. 1 – Расчетная схема технологической системы при точении

для продольных колебаний (для детали — по оси X, а для инструмента — по оси Y).

С учетом предложенной расчетной схемы и принятых обозначений математическая модель колебаний технологической системы может быть представлена в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{x}_* + H_1 \dot{x}_* + j_1 x_* = P_x \\ m_1 \ddot{x}_* + h_1 \dot{x}_* + c_1 x_* = -P_x \\ M_2 \ddot{y}_* + H_2 \dot{y}_* + j_2 y_* = P_y + F_y^* \\ m_2 \ddot{y}_* + h_2 \dot{y}_* + c_2 y_* = -P_y \\ M_3 \ddot{z}_* + H_3 \dot{z}_* + j_3 z_* = P_z + F_z^* \\ m_3 \ddot{z}_* + h_3 \dot{z}_* + c_3 z_* = -P_z \end{cases} \quad (1)$$

где x_d, y_d, z_d и x_u, y_u, z_u — составляющие вектора вибро смещений по осям X, Y и Z заготовки и инструмента соответственно; F_y^d и F_z^d — составляющие силы, вызванные наличием статического дисбаланса вращающейся заготовки. Для учета параметров динами-

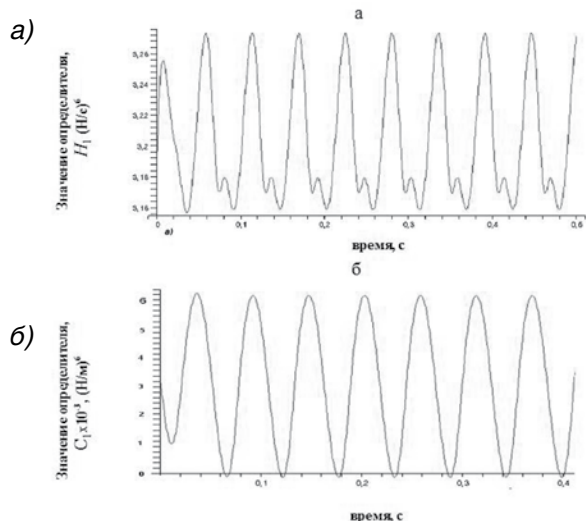


Рис.3-Значения определителей при обработке капролона: а) определитель H_1 ; б) определитель C_1

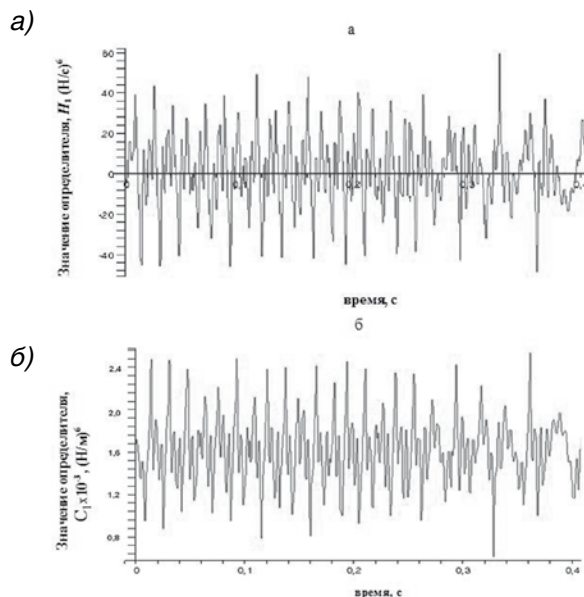


Рис.2. Значения определителей при обработке стали 40X: а) H_1 б) C_1

ческого состояния технологической системы, вместо номинально заданных значений подачи s_0 , скорости v_0 и глубины резания t_0 рассматриваются их мгновенные значения — s , v и t :

$$s = s_0 - \dot{x}_d + \dot{x}_u \quad t = t_0 - y_d + y_u \quad v = v_0 - \dot{z}_d + \dot{z}_u \quad (2)$$

В отличие от предшествующих работ, разложения выражения для составляющих силы резания в кратный ряд Тейлора по переменным, входящим в (2) до кубических членов. С учетом такого разложения система уравнений (1) представляет собой нелинейную модель колебаний технологической системы.

В соответствии с гипотезой неустойчивости динамических систем, если, наряду с основным процессом

с векторами перемещений $X = \{x_d, x_u, y_d, y_u, z_d, z_u\}^T$,

скоростей $\dot{X} = \{\dot{x}_d, \dot{x}_u, \dot{y}_d, \dot{y}_u, \dot{z}_d, \dot{z}_u\}^T$ и ускорений

$\ddot{X} = \{\ddot{x}_d, \ddot{x}_u, \ddot{y}_d, \ddot{y}_u, \ddot{z}_d, \ddot{z}_u\}^T$, существует другой процесс, близкий к нему, с векторами перемещений

$X + \Delta X = \{x_d + \Delta x_d, x_u + \Delta x_u, y_d + \Delta y_d, y_u + \Delta y_u, z_d + \Delta z_d, z_u + \Delta z_u\}^T$,

скоростей

$\dot{X} + \Delta \dot{X} = \{\dot{x}_d + \Delta \dot{x}_d, \dot{x}_u + \Delta \dot{x}_u, \dot{y}_d + \Delta \dot{y}_d, \dot{y}_u + \Delta \dot{y}_u, \dot{z}_d + \Delta \dot{z}_d, \dot{z}_u + \Delta \dot{z}_u\}^T$

и ускорений

$\ddot{X} + \Delta \ddot{X} = \{\ddot{x}_d + \Delta \ddot{x}_d, \ddot{x}_u + \Delta \ddot{x}_u, \ddot{y}_d + \Delta \ddot{y}_d, \ddot{y}_u + \Delta \ddot{y}_u, \ddot{z}_d + \Delta \ddot{z}_d, \ddot{z}_u + \Delta \ddot{z}_u\}^T$,

мало отличающимися от основного процесса, то линеаризованные уравнения относительно вариаций перемещений, скоростей и ускорений можно представить в матричном виде:

$$M \Delta \ddot{X} + H_1 \Delta \dot{X} + C_1 \Delta X = 0 \quad (3)$$

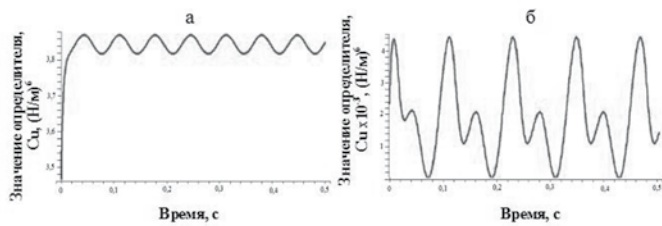


Рис.4- Влияние дисбаланса заготовки из капрлона на стабильность динамической системы при точении: а) $e = 0,12 \cdot 10^{-3}$ мм; б) $e = 0,32 \cdot 10^{-3}$ мм

где

$$\Delta X = \{\Delta x_\delta, \Delta x_u, \Delta y_\delta, \Delta y_u, \Delta z_\delta, \Delta z_u\}^T,$$

$$\Delta \dot{X} = \{\Delta \dot{x}_\delta, \Delta \dot{x}_u, \Delta \dot{y}_\delta, \Delta \dot{y}_u, \Delta \dot{z}_\delta, \Delta \dot{z}_u\}^T,$$

$\Delta \ddot{X} = \{\Delta \ddot{x}_\delta, \Delta \ddot{x}_u, \Delta \ddot{y}_\delta, \Delta \ddot{y}_u, \Delta \ddot{z}_\delta, \Delta \ddot{z}_u\}^T$ — вектора вариаций перемещений, скоростей и ускорений, соответственно; М, Н1, С1 — матрицы масс, демпфирования и жёсткости соответственно.

Матрица масс и структура матриц демпфирования и жёсткости имеют вид:

$$M_1 = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & 0 & 0 & h_{15} & h_{16} \\ 0 & h_{22} & 0 & 0 & h_{25} & h_{26} \\ 0 & 0 & h_{33} & 0 & h_{35} & h_{36} \\ 0 & 0 & 0 & h_{44} & h_{45} & h_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{55} & h_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{65} & h_{66} \end{bmatrix}$$

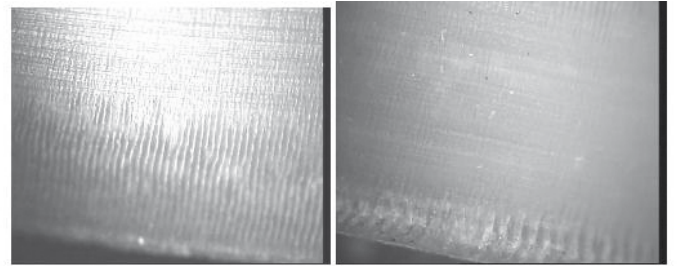


Рис. 5- Стружка капрлона, полученная при значениях дисбаланса заготовки: а) $e = 0,12 \cdot 10^{-3}$ мм; б) $e = 0,32 \cdot 10^{-3}$ мм

$$C_1 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & 0 & 0 \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & 0 & 0 \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & 0 & C_{65} \end{bmatrix} \quad (4)$$

В таблице 1 представлены некоторые элементы матриц Н1 и С1.

Таблица 1
Элементы матриц демпфирования Н1 и жёсткости С1

Элемент матрицы	Выражения для определения элемента
h_{11}	H_1
h_{15}	$10C_{p1}k_{p1}\{s_0^{xx}t_0^{xx}v_0^{m-1} - \frac{1}{2}s_0^{m-1}t_0^{xx}v_0^{m-1} \cdot xx \cdot nx(x_\delta - x_u) - \frac{1}{2}s_0^{xx}t_0^{xx}v_0^{m-2} \cdot nx(nx-1)(z_\delta - z_u) - \frac{1}{2}s_0^{xx}t_0^{xx-1}v_0^{m-1} \cdot yx \cdot nx(y_\delta - y_u)\}$
h_{16}	$-h_{15}$
h_{22}	h_1
h_{25}	$-h_{15}$
h_{26}	h_{15}
c_{11}	$j_1 - 10C_{p1}k_{p1}\{s_0^{xx-1}t_0^{xx-1}v_0^m \cdot xx + \frac{1}{2}s_0^{xx-2}t_0^{xx}v_0^{m-1} \cdot xx(xx-1)(x_\delta - x_u) + \frac{1}{2}s_0^{xx-1}t_0^{xx-1}v_0^{m-1} \cdot xx \cdot nx(z_\delta - z_u) + \frac{1}{2}s_0^{xx-1}t_0^{xx-1}v_0^{m-1} \cdot yx \cdot nx(y_\delta - y_u)\}$

C_{12}	$j_1 - C_{11}$
C_{13}	$10C_{p,1}k_{p,1} \{ s_0^{xx} t_0^{yy-1} v_0^{zz} \cdot yx -$ $-\frac{1}{2} s_0^{xx-1} t_0^{yy-1} v_0^{zz} \cdot xx \cdot yx(x_0 - x_0) -$ $-\frac{1}{2} s_0^{xx} t_0^{yy-1} v_0^{zz-1} \cdot yx \cdot xx(z_0 - z_0) -$ $-\frac{1}{2} s_0^{xx} t_0^{yy-2} v_0^{zz} \cdot yx \cdot (yx-1)(y_0 - y_0) \}$
C_{14}	$-C_{13}$
C_{21}	C_{12}
C_{22}	$C_1 - C_{12}$
C_{23}	$-C_{13}$
C_{24}	C_{13}

Тогда для рассматриваемой динамической системы условия неустойчивости имеют следующий вид:

$$\det H_1 = 0, \quad (5)$$

$$\det C_1 = 0. \quad (6)$$

Алгоритм определения неустойчивости включает следующую последовательность действий:

1. Составление нелинейной модели колебаний (1);
2. Вариация перемещений, скоростей и ускорений;
3. Линеаризация уравнений колебаний относительно вариаций (3);
4. Формирование определителей матриц H_1 и C_1 для расчета точек неустойчивости (4);
5. Задание параметров модели и режимов обработки;
6. Решение нелинейной модели колебаний;
7. Вычисление определителей матриц H_1 и C_1 ;
8. Проверка выполнения условий неустойчивости (5) и (6).

Представляет значительный интерес рассмотрение механизма возникновения неустойчивости при обработке металлов и полимеров. Такое сравнение было выполнено для различных конструкционных металлических и полимерных материалов.

На рис. 2 представлены значения определителей, соответствующих условиям (5) и (6) при обработке стали 40X при следующих значениях технологических режимов: $t = 2$ мм; $s = 1$ мм/об; $v = 40$ м/мин.

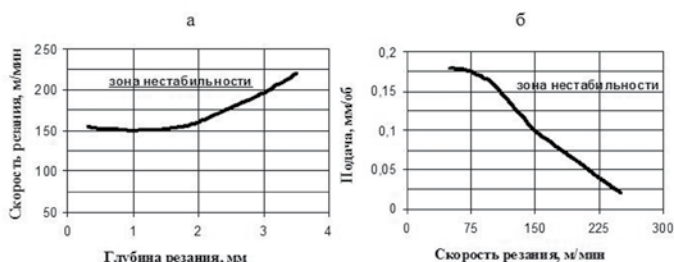


Рис. 6 - Зона неустойчивости при обработке капролона: а - подача 0,1 мм/об; б - глубина резания 1,0 мм

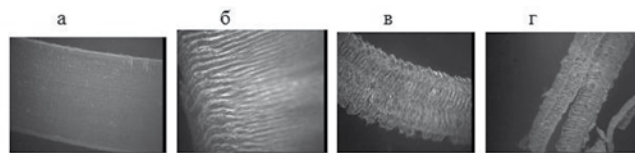


Рис. 7- Фотографии стружек капролона: а - скорость резания 100 м/мин; б - скорость резания 150 м/мин; в - скорость резания 180 м/мин; г - скорость резания 240 м/мин

Из рис. 2 видно, что процесс обработки при данных режимах является неустойчивым, поскольку выполняется условие (5). Данные значения режимов обработки были выбраны на основе результатов экспериментальных исследований [4], согласно которым при них имеет место высокий уровень колебаний $\approx 0,1$ мм и интенсивное наростообразование с частотой срыва наростов ≈ 900 Гц.

На рис. 3 представлены значения определителей, соответствующих условиям (5) и (6) при обработке капролона при следующих значениях технологических режимов: $t_0 = 2$ мм; $s_0 = 0,1$ мм/об; $v_0 = 170$ м/мин.

Сравнительный анализ условий возникновения неустойчивости при обработке резанием металлических и полимерных материалов позволил сделать следующий вывод: возникновение неустойчивости при обработке металлических материалов связан с выполнением условия (5), а при обработке полимерных материалов — с условием (6).

На наш взгляд, это связано с высокой жесткостью и невысоким демпфированием колебаний у металлических материалов и, наоборот, с низкой жесткостью и высоким демпфированием колебаний у полимерных материалов.

Согласно основным положениям гипотезы стабильности динамических систем, переход системы из стабильного состояния в неустойчивое состояние может быть вызван только внешними воздействиями. В модели нелинейных колебаний технологической системы таким источником является дисбаланс заготовки.

На рис. 4 показано влияние дисбаланса заготовки из капролона на стабильность динамической системы при точении. На рис. 5 показаны фотографии стружек, полученные при обработке капролона на соответствующих режимах обработки, выбранных при моделировании (рис. 4). Различные значения дисбаланса заготовки обеспечивались при её предварительной обработке посредством пробных проходов.

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования подтверждают положение гипотезы стабильности динамических систем, согласно которому, переход системы из стабильного состояния в неустойчивое состояние связан с внешними воздействиями, каковым в данном случае является сила от дисбаланса вращающейся заготовки.

Из представленных результатов видно принципиальное отличие таких свойств динамических систем, как устойчивость и стабильность. Неустойчивость динамических систем проявляется при любой величине внешнего воздействия, отличной от нуля. Неустойчивость динамических систем имеет потенциальный

характер, т. е. возникновение интенсивных колебаний в нестабильной системе, изменяющих характер процесса обработки, возможно только при превышении определенного порога величины внешнего воздействия. При малой величине внешнего воздействия нестабильность динамической системы может не проявиться.

Исследование моделей колебаний (1) и (3) показало, что нестабильность технологической системы связана с такими колебаниями заготовки и инструмента, при которых составляющие силы резания принимают нулевые или отрицательные значения, т. е. происходит прекращение собственно самого процесса резания.

В данной работе посредством моделирования определены зоны стабильного и нестабильного состояния динамической системы при точении полимерных материалов, а также проведены экспериментальные исследования процесса стружкообразования при обработке в зонах стабильного и нестабильного состояний. На рис. 6 представлены границы зоны стабильности, полученные при моделировании процесса точения заготовок из капролона.

Экспериментальная проверка возможности появления нестабильности при обработке капролона выполнялась при различных технологических режимах. Фотографии полученных стружек представлены на рис. 7. Анализ полученных данных показал соответствие характера процесса стружкообразования зонам стабильности и нестабильности технологической системы. Так, фотография стружки, представленная на рис. 7, а, соответствует процессу обработки в зоне стабильности, а фотография стружки, представленная на рис. 7, б, процессу обработки в области перехода от зоны стабильности к зоне нестабильности. Фотографии стружек представленные на рис. 7, в, г, соответствуют процессу обработки капролона в зоне нестабильности технологической системы.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований предлагается следующее объяснение механизма возникновения нестабильности динамической системы при точении. Нелинейный характер рассмотренной модели колебаний динамической системы обусловлен степенной зависимостью силы резания от смещений и скоростей заготовки и режущей кромки инструмента. Вариация связей обусловлена изменением коэффициентов C_r , K_r , x , y , z в выражении для силы резания (2), причинами чего могут быть неоднородность обрабатываемого материала заготовки и износ режущего инструмента. Изменение коэффициентов в выражении для силы резания (2) приводит к изменению параметров технологической системы, что отражается в изменении параметров модели колебаний (1). Данные изменения параметров могут привести к переходу технологической системы в потенциально нестабильное состояние. При наличии внешнего воздействия (силы от дисбаланса вращающейся заготовки), величина которого превышает некоторый пороговый уровень, в технологической системе будут развиваться интенсивные колебания, приводящие к выполнению (в т. ч.

одновременному) следующих условий: $v = 0$; $s = 0$; $t = 0$. Их выполнение вызовет прекращение процесса стружкообразования и, как следствие, ухудшение параметров качества обработанной поверхности.

Таким образом, разработана нелинейная модель колебаний технологической системы при точении, а также создан и реализован алгоритм определения нестабильности динамической системы при точении. Установлено, что внешним воздействием, приводящим к переходу технологической системы в нестабильное состояние, является сила от дисбаланса обрабатываемой заготовки. Экспериментально установлено наличие взаимосвязи между параметрами колебаний технологической системы при обработке и шероховатостью обработанной поверхности детали, что подтверждает правомерность результатов теоретического исследования о наличии зон нестабильности технологической системы СПИЗ при токарной обработке полимерных материалов.

Выводы по работе:

1. Разработана нелинейная модель колебаний технологической системы при точении полимерных материалов.
2. Путем сравнительного анализа условий установлено, что возникновение нестабильности при обработке металлических материалов связано с высокой жесткостью и незначительным демпфированием колебаний у металлических материалов и, наоборот, с пониженной жесткостью и высоким демпфированием колебаний у полимерных материалов.
3. Посредством моделирования определены зоны стабильного и нестабильного состояний динамической системы при точении полимерных материалов.
4. По результатам экспериментальных исследований процесса точения капролона установлено, что нестабильность при обработке характеризуется прерыванием процесса стружкообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивахненко Е. О. Обеспечение точности обработки на токарных станках посредством выбора рациональных режимов резания с учетом состояния динамической системы СПИД. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре: 1997. — 19 с.
2. Кирсанов М. Н. Определение и анализ стабильности движения с использованием Maple/Exponenta Pro. Математика в приложениях. №3-4 (7-8). 2004. С. 134-137.
3. Комялова Е. В. Повышение качества токарной обработки капролона с учетом предварительного термомеханического воздействия. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Хабаровск: 2005. — 16 с.
4. Кудинов В. А. Динамика станков/В. А. Кудинов. — М.: Машиностроение, 1967. — 359 с.

Смирнов А.В., Суходоев И.Г.

A.V.Smirnov, I.G.Sukhodoev

05.08.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

STUDY OF OPERATIONAL PERFORMANCE OF GAS-STATIC BEARINGS IN HIGH-SPEED SPINDLE ASSEMBLIES



Смирнов Алексей Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: faks@knastu.ru.

Alexey V. Smirnov — PhD in Engineering, Associate

Professor at the Department of Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: faks@knastu.ru.



Суходоев Иван Георгиевич — ассистент кафедры «Тепловые энергетические установки» ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: faks@knastu.ru.

Ivan G. Sukhodoev — Assistant Lecturer at the Department of

Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: faks@knastu.ru.

Аннотация: Проанализированы преимущества и недостатки использования различных типов подшипников в составе высокоскоростных шпиндельных узлов. Исследовано влияние размещения пористых вставок на эксплуатационные характеристики частично пористых газостатических опор подшипников.

Summary: The paper analyzes the advantages and limitations of different types of bearings within a high-speed spindle unit. The effect of using porous insertions upon operational performance of partially porous gas-static bearing seats was studied.

Ключевые слова: Шпиндельный узел, газостатический подшипник, эксплуатационные характеристики.

Keywords: spindle unit, gas-static bearing, operational performance.

Современный уровень требований к точности, быстроходности и долговечности шпиндельных узлов (ШУ) характеризуется следующими общими показателями: погрешность вращения менее 0,5 мкм; долговечность более 5000 ч; быстроходность более 5·10⁵ мм·мин⁻¹.

Достижение таких высоких показателей при шлифовании изделий на металлообрабатывающих станках с использованием шпиндельных узлов на опорах качения осложняется сравнительно малой окружной скоростью резания, что вынуждает прибегать к сильному прижатию круга. Это приводит к изгибу оправ-

ки, искажению геометрии изделия и к снижению качества шлифуемой поверхности.

Не решают проблемы и так называемые гибридные подшипники качения. Это подшипники, в которых в качестве тел качения используются керамические шарики, а кольца сепаратора изготовлены из стали. Опыт эксплуатации таких опор в высокоскоростных ШУ свидетельствует о снижении потерь на трение с одновременной невысокой надежностью сепараторов подшипников, что связано со свойствами применяемых сталей для их изготовления.

Находят применение в качестве опор для ШУ и подшипники на жидкой смазке. Вместе с тем, несмотря на принимаемые прогрессивные технические решения по совершенствованию способов и систем смазки, ШУ с гидростатическими подшипниками имеют ограничения по частоте вращения и усложнённые конструкции опорного узла.

В международной практике известен опыт применения магнитных опор в ШУ металлорежущих станков. Работа магнитного подшипника основана на известном принципе активного магнитного подвеса ферромагнитного тела — стабилизация тела в заданном положении осуществляется силами магнитного притяжения, действующими на тело со стороны управляемых электромагнитов. Однако до настоящего времени применение их затруднено из-за сложности конструкции подшипникового узла и схемы управления.

Внедрение в конструкцию ШУ подшипников на газовой смазке позволяет повысить жесткость и массу

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

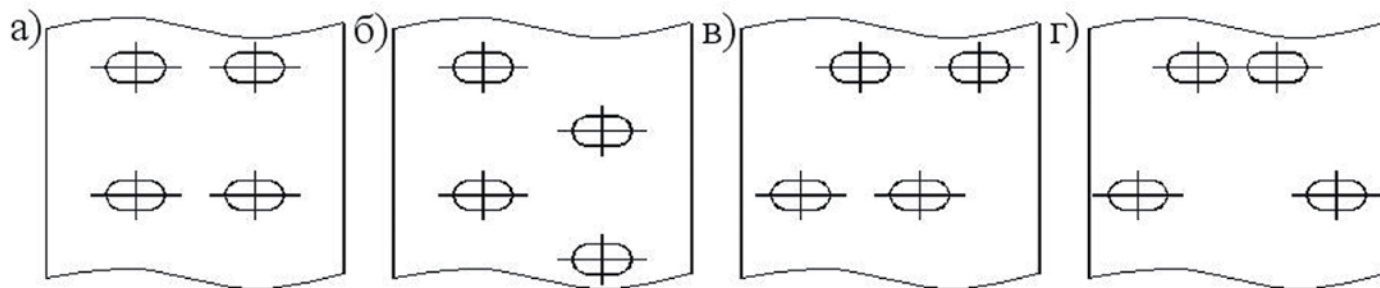


Рис.1. Варианты расположения пористых вставок во вкладыше подшипника

а — симметричное расположение рядов наддува; б — шахматное смещение; в — асимметричное смещение вдоль направляющей вкладыша; г — симметричное смещение вдоль направляющей вкладыша

шпинделя путем увеличения диаметра рабочих шеек при одновременном повышении окружной скорости шлифовального круга. Последнее позволяет шлифовать изделия с большими подачами, что приводит к повышению производительности труда, улучшению качества шлифования и уменьшению чувствительности, к дисбалансу оправки и круга, так как их масса заметно меньше массы шпинделя.

Выполненные в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете исследо-

вания показали, что среди известных конструкций газостатических опор лучшими характеристиками обладают подшипники с частично пористой стенкой вкладыша.

Частичная пористость стенок вкладыша подшипника достигается размещением в непроницаемом теле вкладыша пористых вставок. При этом форма вставок и их размещение могут быть различными, что, в свою очередь, влияет на эксплуатационные характеристики газовой опоры.

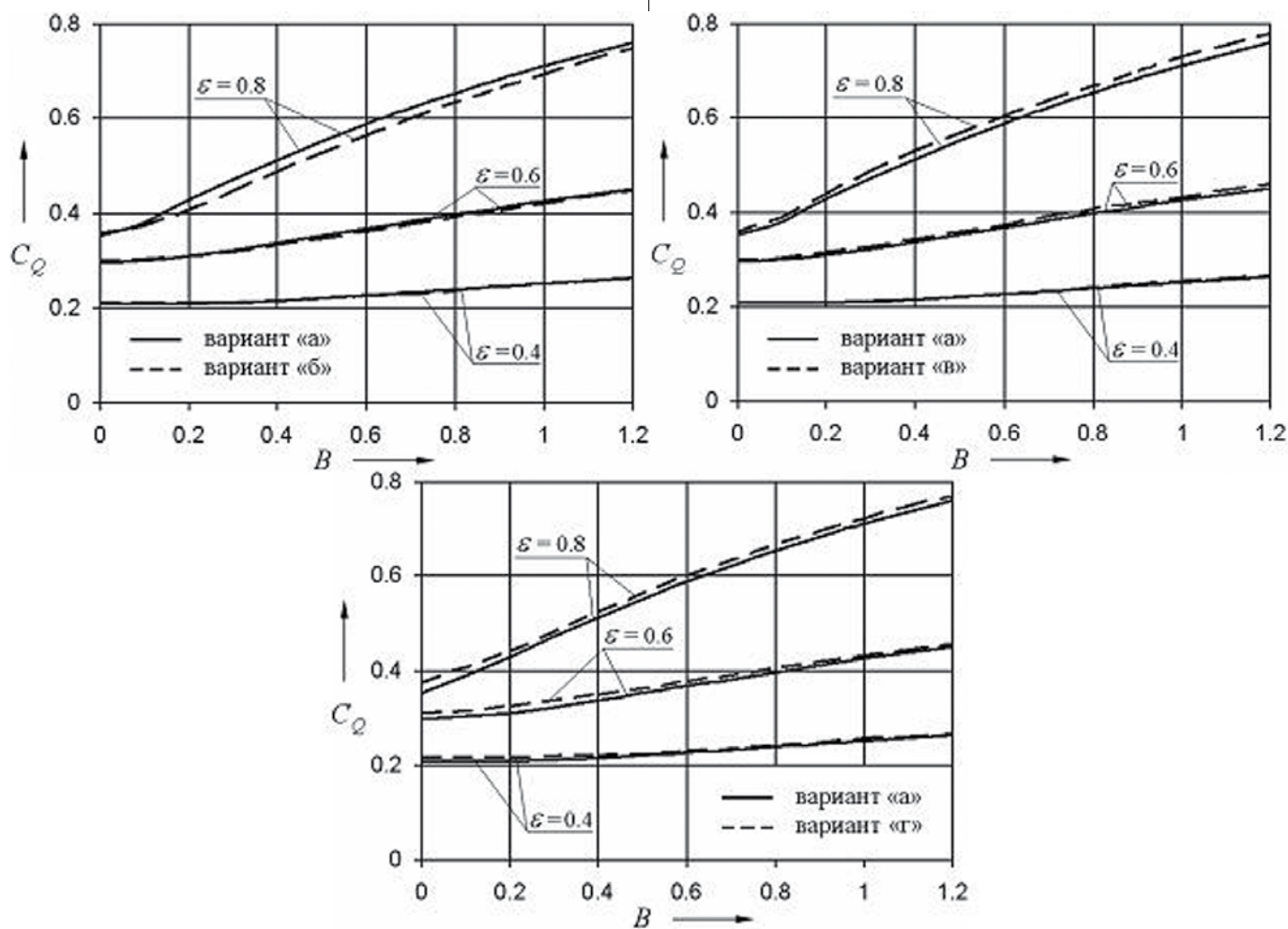


Рис. 2. Зависимость коэффициента несущей способности C_Q от числа сжимаемости B и относительного эксцентриситета ϵ

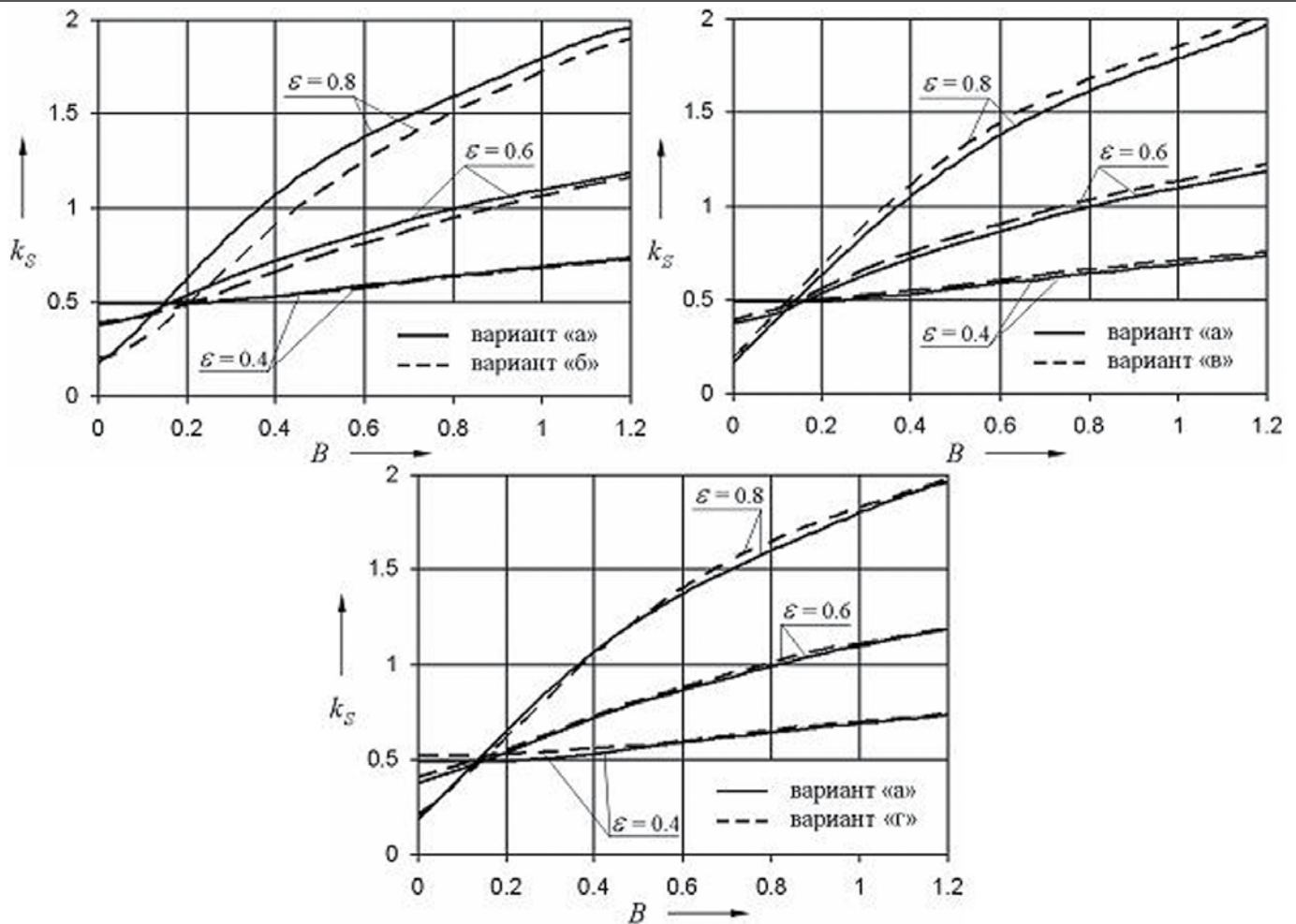


Рис. 3. Зависимость коэффициента жесткости k_s от числа сжимаемости B и относительного эксцентриситета ε

В настоящей работе анализируются результаты исследований эксплуатационных характеристик газовых опор в зависимости от различных способов размещения вставок во вкладыше подшипника (рис. 1).

При этом во всех вариантах используется двухрядное размещение вставок, а сама вставка имеет форму шпонки.

Расчет эксплуатационных характеристик подшипника выполнен при следующих исходных данных: относительное давление газа $\bar{p}_g = p/p_s = 1.6$; относительная длина подшипника $\bar{L} = L/D = 1.2$; относительная длина пористой вставки $\bar{a} = a/L = 0.2$; относительная раздвижка линий наддува $\bar{b} = b/L = 0.4$; количество вставок $N_{вст} = 6$. Здесь p — атмосферное давление; p_s — давление наддува; L — длина подшипника; D — диаметр подшипника; a — длина пористой вставки; b — раздвижка линий наддува.

Ниже представлены результаты расчета эксплуатационных характеристик газовой опоры (коэффициента несущей способности C_Q , коэффициента жесткости смазочного слоя k_s , угла положения нагрузки ψ) в зависимости от числа сжимаемости B (безразмерной частоты вращения вала) при различных значениях относительного эксцентриситета $\varepsilon = e/c$ (e — абсолютный эксцентриситет, c — сред-

ний радиальный зазор).

Симметричный вариант расположения вставок (см. рис. 1, а) принят за основной, и поэтому на всех графиках он сравнивается с остальными вариантами.

Зависимость коэффициента несущей способности C_Q от числа сжимаемости B и относительного эксцентриситета ε представлена на рис. 2.

Из представленных графиков видно, что с увеличением относительного эксцентриситета и числа сжимаемости коэффициент несущей способности частично пористых опор заметно растет. Это объясняется существенным влиянием на структуру течения смазки эффекта смазочного клина, который начинает преобладать над внешним наддувом газа. Расчеты также показывают на незначительное отличие нагрузочных характеристик опор с различным расположением пористых вставок.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента жесткости k_s от числа сжимаемости и относительного эксцентриситета ε .

Представленные графики демонстрируют повышение коэффициента жесткости смазочного слоя с увеличением относительного эксцентриситета и числа сжимаемости, что наглядно говорит о воз-

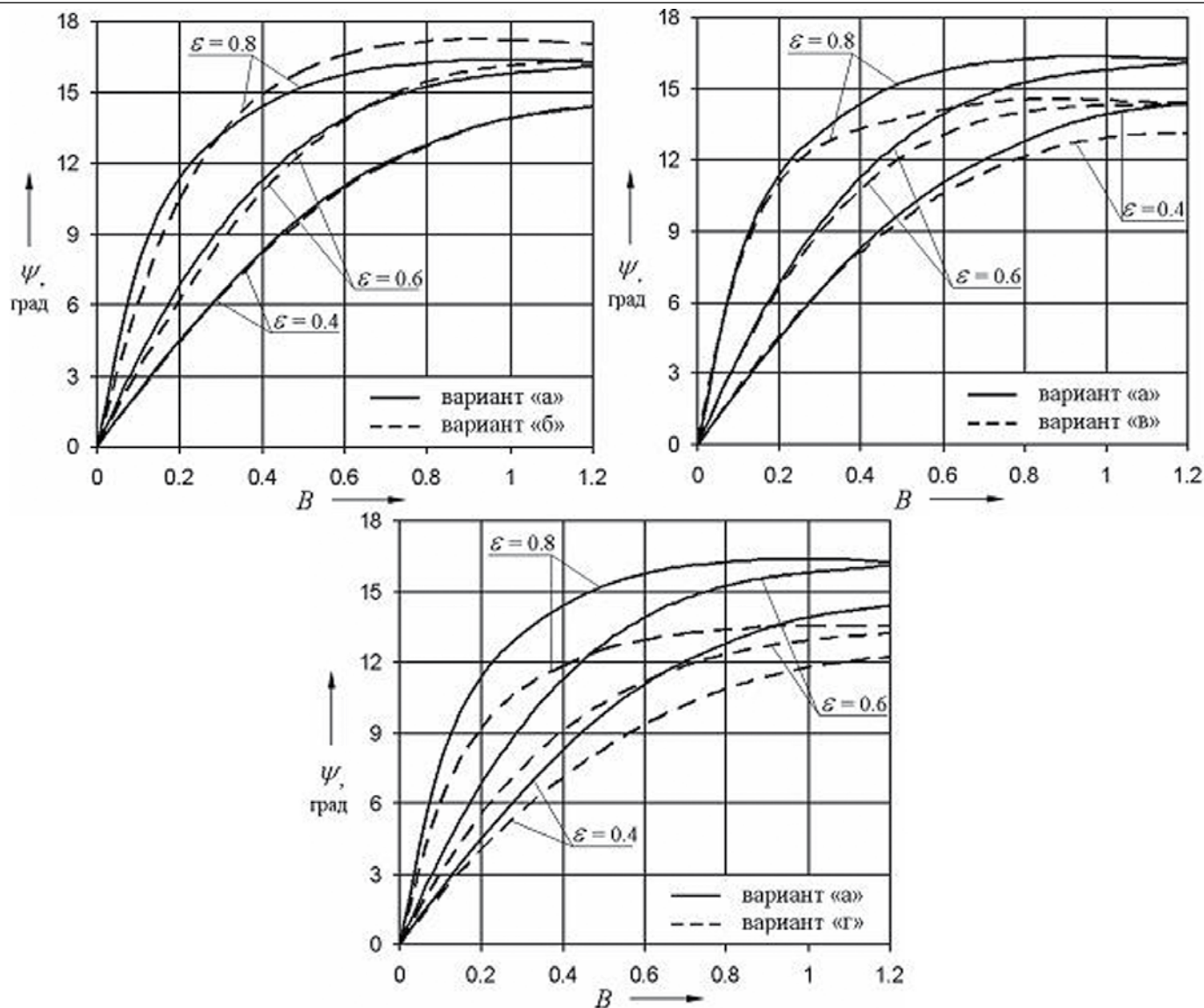


Рис. 4. Зависимость угла положения нагрузки ψ от числа сжимаемости B и относительного эксцентриситета ε

растающем влиянии эффекта смазочного клина. При этом существенной разницы в коэффициенте жесткости различных вариантов газовых опор нет.

Зависимость угла положения нагрузки ψ (смещение вала от равновесного положения) от числа сжимаемости B и относительного эксцентриситета ε представлена на рис. 4.

Из представленных графиков видно, что при малых числах сжимаемости B угол положения нагрузки ψ интенсивно увеличивается. Дальнейший рост числа сжимаемости B сопровождается незначительным изменением угла положения нагрузки.

Полученный результат объясняется сменой преобладающего влияния на характеристики опор внешнего наддува газа и вращения вала. Так, при увеличении ψ преобладает внешний наддув, а при стабилизации значения ψ доминирующее влияние оказывает вращение вала. С возрастанием ε влияние вращения усиливается и поэтому максимальное значение угла ψ достигается при меньших значениях B .

Заметим, что при доминирующем влиянии враще-

ния настоящими расчетами получен хорошо известный из теории газовой смазки результат уменьшения угла ориентации нагрузки с ростом относительного эксцентриситета.

Из представленных графиков видно, что наиболее благоприятным, с точки зрения устойчивой работы, является расположение вставок варианта «г».

В результате выполненного анализа эксплуатационных характеристик газостатических опор можно сделать следующие выводы.

Изменение положения вставок во вкладыше не приводит к существенному изменению эксплуатационных характеристик газовой опоры. Вместе с тем, изменение положения вставок по сравнению с основным вариантом ведет к усложнению технологии изготовления газовой опоры. Поэтому наиболее целесообразным следует считать применение в частично пористой газовой опоре симметричного расположения вставок.

Сариллов М. Ю., Чугай Е. А., Жихарева Д. А. 05.02.07
M. Y. Sarilov, E. A. Chugai, D. A. Zhikhareva

ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ STABILITY IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESSES

Сариллов Михаил Юрьевич, д. т. н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (ГОУВПО «КНАГТУ»), E-mail: sarilov@knastu.ru

Mikhail Y. Sarilov — Doctor in Engineering, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: sarilov@knastu.ru

Чугай Е. А., инженер-технолог ОАО «КНААПО им. Ю. А. Гагарина»

E. A. Chugai — Process control Engineer for JSC «Yury Gagarin KnAAPO»

Жихарева Д. А., инженер-технолог ОАО «КНААПО им. Ю. А. Гагарина»

D. A. Zhikhareva — Process control Engineer for JSC «Yury Gagarin KnAAPO»

Аннотация: В данной статье дано как общее понятие о надежности обработки металлов, так и применительно для электроэрозионной обработки. Приведены и подробно объяснены основные причины появления нестабильности в результате ЭЭО, а также освещены основные способы устранения этой нестабильности. Далее освещена проблема регуляторов МЭП и их влияние на устойчивость процесса обработки. Описана краткая история исследования данного вопроса и определены основные технические требования для устройств данного типа.

Summary: This paper provides a general idea of what reliability of metal processing is, including when used for electrical discharge machining (EDM). We present and explain in detail all main causes of instability manifestations resulting from EDM, as well as the key ways to eliminate this instability effect. Further on in the paper the problem of EDM controls is discussed along with their impact upon the stability of processing. The history of studies on this issue is reviewed, and key technical requirements for devices of this type are identified.

Ключевые слова: Надежность, устойчивость, нестабильность, электроэрозия, регулятор, эвакуация, зазор, износ, электрод, ЧПУ.

Keywords: reliability, stability, instability, EDM, control, evacuation, clearance, wear, electrode, CNC.

Надежность обработки — это устойчивость технологического процесса, т.е. его способность обеспечивать в течение заданного времени выпуск деталей с установленными требованиями по точности формы и размеров и физико-механическим свойствам поверхностного слоя. Устойчивость процесса ЭЭО является основным условием получения высокой производительности, возможной при данном режиме обработки, материале и форме электродов, составе и характеристиках жидкой среды и других заданных факторах. Появление нестабильности процесса, выражающейся в непрерывных, недопустимо больших отклонениях регулируемой величины от заданного значения, приводит к резкому снижению производительности ЭЭО и делает его малоэффективным. Нестабильность процесса ЭЭО обусловлена разнообразными причинами, в частности [1]:

— ухудшением условий эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Станок, работавший вначале стабильно, по мере углубления электрода инструмента в обрабатываемую деталь может начать работать неустойчиво, если не принять мер для улучшения условий эвакуации продуктов эрозии. Возрастет количество импульсов, энергия которых затрачивается на повторное разрушение частиц в МЭП;

— несоответствием между обрабатываемой площадью и выбранным режимом обработки. Если площадь обработки мала, а режим слишком жесткий, происходит периодическое вытеснение жидкой среды из МЭП образующимися парами и газами. При этом разряды прерываются, а при попытках уменьшить зазор между электродами начинаются короткие замыкания;

— малой энергией единичных разрядов, недостаточной для эффективной эвакуации постепенно накапливающихся продуктов эрозии при обработке больших площадей на чистовых режимах. На чистовых режимах обработки величины геометрического зазора между электродами во много раз меньше, чем при черновых режимах, что также затрудняет эвакуацию продуктов эрозии;

— несоответствием между поддерживаемой величиной геометрического зазора и максимальным размером образующихся частиц. Чаще всего мы не задаемся вопросом, какие частицы будут получаться при данном режиме и какой зазор между электродами нужно поддерживать, так как процесс электрической эрозии обладает свойством саморегулирования величины геометрического зазора. Появление в МЭП крупных частиц вызывает увеличение зазора, а уменьшение максимального диаметра образующихся частиц неизбежно приведет к уменьшению зазора. Но само-

регулирование величины МЭП обеспечивает стабильность процесса только при условии, что появление крупных частиц будет закономерным, т.е. достаточно частым. Если же они будут появляться как исключение и после того, как величина зазора установилась, то неизбежны резкие изменения зазора вплоть до коротких замыканий электродов;

— материалом некоторых пар электродов, не соответствующих друг другу при электроэрозионной обработке, например стальной ЭИ при стальной ЭЗ. Появление нестабильности выражается в том, что независимо от оператора вышеуказанные параметры процесса начинают резко изменяться, вслед за серией разрядов наступают короткие замыкания и устойчивый процесс не устанавливается.

В настоящее время существует ряд способов обеспечения устойчивости процесса электроэрозионной обработки [2]. К ним можно отнести:

— принудительную прокачку жидкой среды через межэлектродное пространство, что улучшает условия эвакуации продуктов эрозии (внешне или через электрод-инструмент);

— сообщение одному из электродов колебательного движения в направлении подачи, что приводит к резкому увеличению средней величины геометрического зазора между торцевыми поверхностями электродов, а следовательно, содействует лучшей эвакуации продуктов эрозии, облегчает доступ жидкой среды и приводит к ликвидации случайных коротких замыканий между электродами;

— сообщение одному из электродов орбитального движения или другого относительного движения в плоскости, перпендикулярной подаче, что приводит к увеличению зазора между боковыми поверхностями электродов и содействует улучшению эвакуации продуктов эрозии;

— повышение амплитудного значения напряжения на электродах, что приводит к увеличению электрического и геометрического зазоров;

— правильный выбор пар материалов электродов, состава жидкой среды и электрических режимов, в настоящее время только на основе трудоемких экспериментов.

На ранней стадии развития ЭЭО устойчивость электроэрозионной обработки обеспечивалась сохранением, по мере удаления материала, снимаемого слоя, постоянства межэлектродного зазора путем применения различных регуляторов. Качество их работы определяется, прежде всего, правильным выбором критерия для регулирования, он должен отражать процесс формирования рабочего зазора, который происходит в результате взаимодействия физико-химического процесса съема материала с электрической, механической и тепловой систем станка.

Механизм и характер процесса эвакуации продуктов из полости определяет устойчивость процесса, зависимости между электрическими и технологическими параметрами, определяющими режим обработки, возможности и пути дальнейшей интенсификации процесса [3].

Исследование этого механизма долгое время выпадало из поля зрения исследователей, хотя можно утверждать, что нельзя построить единую теорию процесса ЭЭО, не рассмотрев сложные и интересные явления, связанные с механизмом эвакуации продуктов эрозии. Под устойчивостью понимают [1] способность сохранять в течение заданного промежутка времени непрерывный съем металла и эвакуацию продуктов эрозии, несмотря на возникновение в системе случайных или закономерных возмущающих воздействий.

Если обозначить через Δp отклонение от какого-либо из определяющих процесс параметров, то условие устойчивости будет иметь вид

$$\lim_{t \rightarrow \tau} \Delta p(t) \leq \varepsilon,$$

где ε — малое, заданное значение параметра; τ — заданный интервал времени.

Это условие означает, что если система, выведенная из равновесия и будучи (после прекращения действия возмущающих сил) предоставлена самой себе, вновь вернется к установившемуся состоянию — исходному или новому, то такая система будет устойчивой в данном интервале времени. В общем случае устойчивость следует рассматривать в целом для системы «генератор — станок — эрозионный промежуток (собственно процесс) — регулятор» [4].

Рассмотрим устойчивость собственно процесса в той мере, в какой она связана с механизмом эвакуации из полости. Если интервал времени τ в условии ограничить длительностью импульса $t_{\text{и}}$, а в качестве Δp считать отклонение от падения напряжения на промежутке, то при несоблюдении условия возникает неустойчивость в импульсе. Это означает, что по каким-то причинам (отсутствие пробоя, несоответствия напряжений, зазоров, материалов электродов, среды, наличия участка шлакования и др.) единичный разряд не может быть инициирован. Если $\tau = n t_{\text{и}}$ соизмеримо с продолжительностью серии импульсов и при этом условие также не соблюдается, то получим локальную неустойчивость. Соблюдение же условия означает, что система устойчива в общем, и в импульсе, и локально. Устойчивость в общем будет иметь место при соблюдении в заданном весьма большом интервале времени баланса вновь образующихся эвакуируемых продуктов эрозии.

Необходимость управлять процессом обработки очевидна, так как позволит: снизить процент производственного брака; снизить себестоимость изготавливаемых деталей за счет уменьшения износа электрода-инструмента; теоретически, без проведения (часто дорогостоящих) экспериментов назначать и корректировать режимы обработки.

В подавляющем большинстве случаев для управления процессом ЭЭО применяют пропорциональные или пропорционально-интегральные регуляторы. В ка-

честве обратной связи используются отклонения одного из сигналов, связанных с величиной МЭП, от задаваемого оператором уровня. Как правило, в устройстве управления процессом используется принцип сравнения сигналов, снимаемого с МЭП после соответствующей фильтрации и усиления, с задаваемыми пороговыми значениями. В результате сравнения вырабатывается сигнал на сближение электродов или их разделение. Скорость обработки существенно зависит от выбора и задания пороговых значений и выбора параметров аналоговой части регулятора. Как показывает практика, процедура настройки регулятора на оптимальную скорость обработки сравнительно сложна. Причина неэффективности работы регуляторов, особенно при ЭЭО отверстий малого диаметра, заключается в том, что оценка состояния МЭП не всегда отражает его реальное состояние, так как позволяет судить о нем лишь косвенно.

Известные системы автоматической настройки на оптимальную скорость обработки используют экспериментальный характер зависимости скорости съема материала от величины МЭП. При этом используются известные принципы реализации экстремальных самонастраивающихся систем. Критерием оценки состояния МЭП может служить относительное количество импульсов холостого хода и коротких замыканий. Отношение вычисляется по 1000 импульсов. Система на базе ЭВМ ищет максимум коэффициента использования импульсов с помощью градиентного метода либо по методу проб и ошибок с помощью директив оператора.

Очевидно, что данный подход к оценке состояния МЭП дает неточное представление о процессах, происходящих в МЭП, так как позволяет судить о них лишь косвенно.

Для организации непрерывного контроля состояния МЭП целесообразно внедрение подсистем автоматического контроля. Функции обработки информации в подсистеме автоматического контроля могут возлагаться на ЭВМ ЧПУ или на сателлитную для ЧПУ микро-ЭВМ — вариант локальной подсистемы контроля. Учитывая многофакторность процессов ЭЭО, для создания подсистем автоматического контроля состояния МЭП требуется комбинированное применение различных методов и средств диагностики, а также использование различных алгоритмов обработки получаемой информации. Для успешного выполнения функции контроля состояния МЭП к элементам подсистемы предъявляются определенные технические требования [5].

В общем виде эти требования можно сформулировать следующим образом:

а) общие требования для измерительного преобразователя: обеспечение необходимого быстродействия на всех режимах, выполняемых на станке; надежность при эксплуатации в заводских условиях; малые габаритные размеры и простота встраивания в станок; возможность настройки и регулировки в процессе эксплу-

тации; инвариантность к воздействию таких внешних факторов, как температура, вибрация, шумы, действие технологической среды (РЖ);

б) требования к диагностическому сигналу измерительного преобразователя: высокая чувствительность к изменению измеряемых параметров; низкий уровень помех при воздействии внешних факторов (ГИ, технологической среды (РЖ), изменения температуры и т.д.); высокое быстродействие (менее 1...100 мс); возможность передачи сигнала от контрольной точки на определенное расстояние; возможность ввода в систему управления станком;

в) требования к аппаратуре обработки диагностического сигнала: прием сигналов от измерительных преобразователей; задание эталонных значений контролируемых параметров и допустимых отклонений от них; логико-математическая обработка входных сигналов с требуемым быстродействием и точностью; сравнение величин обрабатываемых сигналов между собой и эталонными величинами, выдача сигналов управления в систему ЧПУ; надежность работы в заводских условиях, экономичность и безопасность.

В настоящее время надежных методов и средств контроля состояния МЭП и управления процессом ЭЭО, удовлетворяющим всем этим требованиям, не разработано. Существующие средства и методы контроля и управления в каждом конкретном случае имеют определенные преимущества и недостатки. Поэтому актуальность и практическая значимость исследований в области устойчивости процесса и разработки средств управления процессом ЭЭО не вызывает сомнений.

Таким образом, традиционная схема управления электроэрозионных операций до настоящего времени еще не реализована в полной мере и перспективы ее развития остаются под вопросом. Между тем, более эффективным видится подход в формировании единой, не разделенной на подсистемы, адаптивной системы управления процессом ЭЭО, созданной на общем принципе анализа устойчивости процесса обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотых, Б. Н. Физические основы электроэрозионной обработки/Б. Н. Золотых, Р. Р. Мельдер — М.: Машиностроение, 1977. — 42 с.
2. Кабалдин, Ю. Г. Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта/Ю. Г. Кабалдин, М. Ю. Сариков, С. В. Биленко — г. Комсомольск-на-Амуре, КНАГТУ — 2007. — 191 с.
3. Лившиц, А. Л. Электроимпульсная обработка металлов/А. Л. Лившиц, А. Т. Кравец, И. С. Рогачев, А. Б. Сосенко — М.: Машиностроение, 1967. — 183 с.
4. Мицкевич, М. К. Электроэрозионная обработка материалов/Мицкевич М. К., Бушин А. И., Бакуто И. А. и др.; Под ред. Некрашевича И. Г. Минск: Наука и техника, 1988. — 216 с.
5. Сариков, М. Ю. Выбор параметров управления процессом электроэрозионной обработки/М. Ю. Сариков, М. А. Покотило // Известия ТулГУ. — г. Тула, ТулГУ. — 2006. — С. 80-87.

Саблин П. А., Серебренникова А. Г.
P. A. Sablin, A. G. Serebrennikova

05.02.04

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
БЫСТРОИЗНАШИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ
ДРОБЕМЕТНЫХ АППАРАТОВ
WAYS OF IMPROVING WEAR
RESISTANCE PARAMETERS OF
LIMITED-LIFE PARTS OF SHOT
BLASTER EQUIPMENT**

Саблин Павел Алексеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ГОУВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»;
Pavel A. Sablin — PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Серебренникова Анжела Геннадьевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ГОУВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет».

Ms Anzhella G. Serebrennikova — PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация: Рассмотрена проблема износостойкости узлов и агрегатов дробеметных аппаратов, используемых на заводе «Амурлитмаш» и подверженных ударно-абразивному износу. Сделан вывод, что для повышения износостойкости поверхностей данных деталей недостаточно использование только упрочняющих технологий.

Summary: The paper considers the problem of wear resistance of parts and units of shot blasters used at the factory “AmurLitMash” that are subject to severe dispatch&abrasive deterioration. A conclusion is made that for better wear resistance of such surfaces the application of solely strengthening technologies is not sufficient.

Ключевые слова: дробеметный аппарат, импеллер, лопасть.

Keywords: shot blaster, impellor, blade.

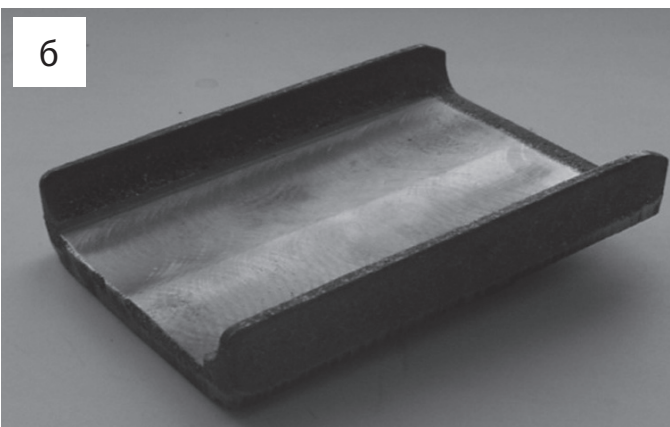
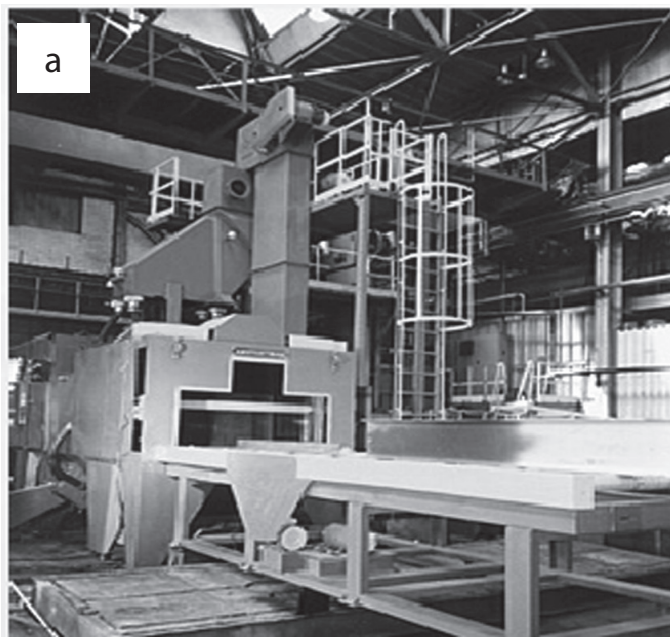


Рис. 1 Установка дробеметной модели 24581 для очистки листового и профильного проката (а); лопасть ротора дробеметного аппарата, выпускаемая заводом «Амурлитмаш» (б)

Современная промышленность требует использования в производстве новых материалов с повышенными эксплуатационными свойствами, обладающих заданными физико-механическими свойствами и обеспечивающих надежность различных конструкций, частей оборудования и их узлов к постоянно возрастающим нагрузкам. Одним из направлений, обеспечивающих этот стратегический путь развития, является применение принципиально новых методов синтеза компонентов и создание на их основе новых композиционных материалов. За счет применения высокопрочных композиционных материалов в машиностроении можно добиться упрочнения различных деталей машин и, как следствие, повышения работоспособности узлов и агрегатов.

Вопросы плохой износостойкости быстроизнашивающихся узлов дробеметных аппаратов пытались решить еще давно и во многих странах, не считая СССР. Эта проблема до сегодняшнего дня окончательно не решена. Небольшой срок службы таких узлов мешает пред-

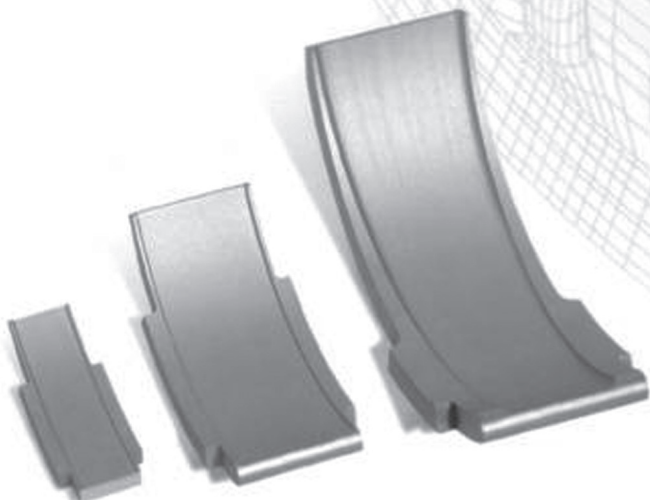


Рис. 2. Лопасти ротора дробебетного аппарата производства Herstal Belgium (Бельгия)

приятиям быть конкурентоспособными в своей сфере деятельности.

В качестве примера можно отметить предприятия Южной Кореи, где расположено около 60 заводов по производству дробебетных аппаратов. Нельзя не сказать о странах Западной Европы — Бельгия, Германия, Италия, Польша, Франция и т.д., где также располагается немало таких заводов.

В данной статье в роли проблематики фигурирует завод «Амурлитмаш», расположенный в г. Комсомольске-на-Амуре Хабаровского края, который является единственным предприятием такого профиля на Дальнем Востоке России. Данный завод производит дробебетное (рис. 1, а) и дробеструйное оборудование.

Неконкурентоспособность продукции этого завода в настоящее время обусловлена устаревшими технологиями изготовления механизмов, конструктивных элементов оборудования и комплектовующих деталей к ним. Это технологии 1970-80-х годов. Низкая износостойкость и, как следствие, надежность, высокая себестоимость продукции не совсем хорошо влияют на развитие и выживание предприятия в условиях рыночной экономики и кризиса в отечественной металлургической промышленности, но такие проблемы дают почву для их дальнейших исследований и принятия решений.

Ранние поставки (в 80 — 90 гг.) машин в страны Европы — в Бельгию, Германию, Украину, Беларусь и т.д., и рабочее их состояние на сегодняшний день вынуждают применять массовое производство лопастей ротора, дисков турбин, броней корпуса для дробебетного аппарата, а между тем качество этих изделий, в сравнении с импортными образцами, оставляет желать лучшего.

Например, стойкость лопасти ротора, выпущенной заводом «Амурлитмаш» (рис. 1, б), составляет 200 часов при работе в идеальных условиях, а при работе в экстремальных условиях стойкость этих же лопастей составит уже 30 часов [1]. Производители из КНР предлагают широкий спектр лопастей, стойкость которых составляет от 200 до 3000 часов. Больше всех в вопросе износостойкости лопастей ротора преуспели производители из Бельгии, стойкость их лопастей составила 8000 часов.



Рис. 3. Износ лопасти ротора дробебетного аппарата

Материал, из которого изготавливается лопасть ротора отечественного производства, — ИЧХ20 (износостойкий чугун с содержанием хрома 20 % с присутствием редкоземельных металлов). Данная технология изготовления лопасти имеет низкую эффективность, поскольку упрочнить такую лопасть не представляется никакой возможности, а сам материал ИЧХ20 является дорогостоящим, учитывая, что 80-90 % материала остается незадействованным и отправляется в переплавку.

Лопасти ротора для дробебета, производимые в Бельгии (рис. 2), обладают высокой износостойкостью благодаря применению принципиально новых для этой области промышленности материалов. Кроме того, конструкторы из Бельгии долго работали над формой лопасти, об этом будет сказано чуть позже.

В настоящее время российская промышленность испытывает дефицит в качественных конструкционных материалах, а именно в современных технологиях получения износостойких конструкционных материалов. Как следствие, падает работоспособность и надежность широкого спектра узлов, агрегатов и машин. В связи с этим необходимо разрабатывать и применять новые технологии нанесения упрочняющих покрытий для деталей, подверженных ударно-абразивному износу.

Исследовав изношенную лопасть производства завода «Амурлит-маш» (рис. 3), можно увидеть участки с неравномерным износом. Исходя из этого, можно сказать, что дробь, которая на большой скорости попадает на лопасть из импеллера, в первое мгновение отскакивает от нее и в дальнейшем не катится по лопасти и даже не скользит по ней, а «скачет», увеличивая с каждым ударом амплитуду колебания и, как следствие, силу уда-

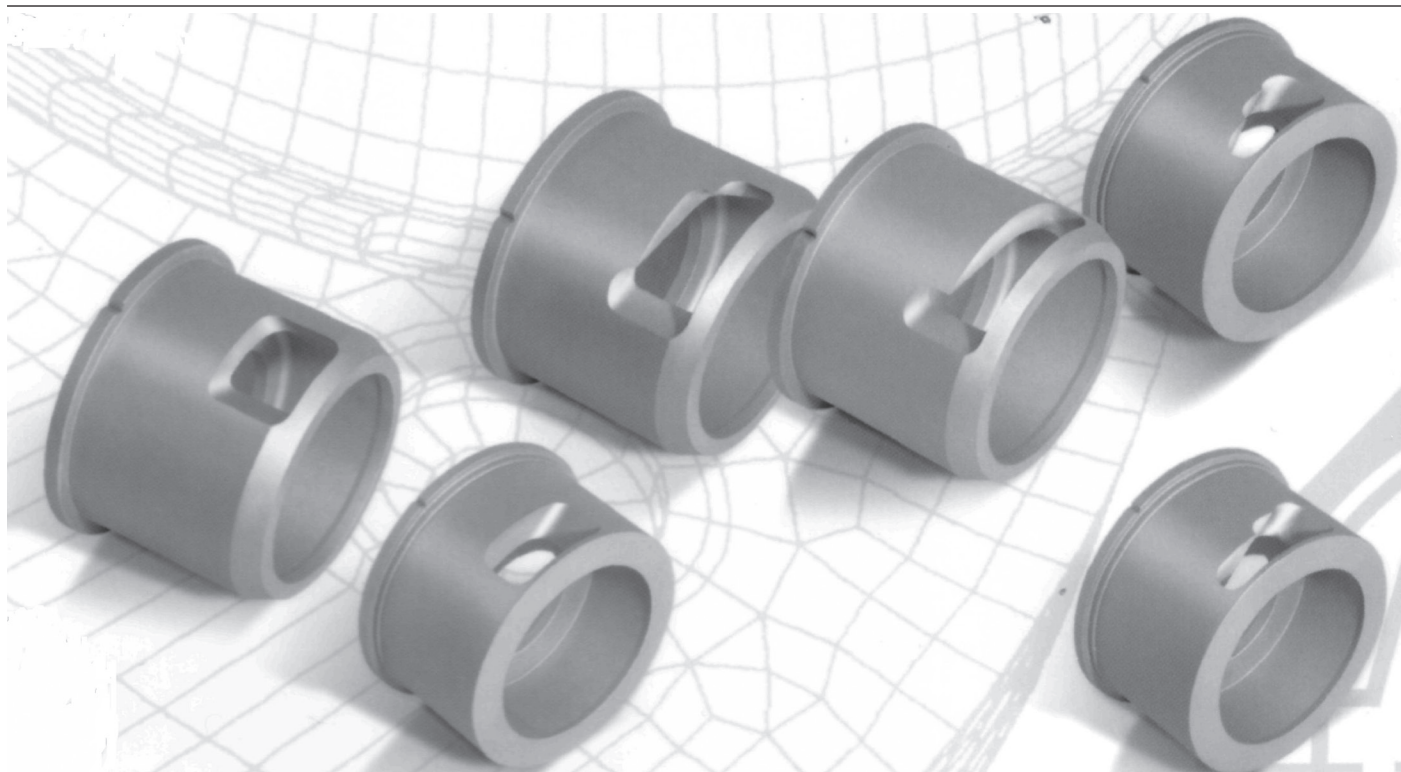


Рис. 4. Дозирующие втулки дробедробного аппарата производства Herstal Belgium (Бельгия)

ра. На рисунке 4 четко видно, что выходная часть лопасти пробита дробью насквозь.

Таким образом, становится актуальным подбор материала для лопасти ротора отечественного производства, который имел бы высокую абразивную стойкость и не меньшую ударную стойкость.

Учитывая вышесказанное, нужно обратить внимание на форму лопасти, произведенной в Бельгии (рис. 2). Здесь можно сделать вывод о том, что благодаря такой форме появляется возможность значительно сократить силу удара дробы о лопасть на самом ее выходе, избежать нарастания амплитуды удара дробы. Но при такой форме лопасти повышается сила трения дробы о ло-

пасть на самом ее выходе.

Кроме формы лопасти, необходимо учесть характер поступления порции дробы на лопасть дробедробета. В этом вопросе опять же преуспели производители из Бельгии (рис. 4).

Они разработали такую форму дозирующего сопла втулки импеллера, которая постепенно и в заданном направлении выдает порцию дробы на лопасть. Чего нельзя сказать об отечественных втулках, где порция дробы выдается «пачкой» и происходит резкий удар о лопасть.

Установленные выше проблемы повышения работоспособности отечественных дробедробных аппаратов и успешный опыт зарубежных стран в решении этих проблем подтолкнул и нас к необходимости моделирования комплексного подхода. Эти решения можно разделить на два больших этапа: теоретический и практический.

На рис. 5 предложена схема решения данных проблем.

Выводы:

1. Производство дробедробных аппаратов в России имеет низкую конкурентоспособность и высокую себестоимость.
2. Данные показатели могут быть следствием плохого качества конструкционного материала и несовершенной конструкции дробедробного аппарата.
3. Предложены пути решения данных проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ри Хосен, Ри Э.Х. Комплексно-легированные чугуны специального назначения. Владивосток: Дальнаука, 2000. 287 с. ISBN 5-7442-1303-1.



Рис. 5. Структурная схема этапов повышения износостойкости деталей дробедробных аппаратов, выпускаемых заводом «Амурлитмаш»

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

METALLURGY AND MATERIALS TECHNOLOGY

Ковалевич Е. В.
E. V. Kovalevitch

05.16.02

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ ENVIRONMENTALLY FRIENDLY TECHNOLOGY OF PRODUCING SPHERICAL GRAPHITE IRON

Ковалевич Евгений Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ЦНИИТМАШ (г. Москва)
ev_kov@mail.ru

Evgeniy V. Kovalevitch — Doctor in Engineering, Professor, Head of a Laboratory at the Central Research Institute for Heavy Engineering Industry

Аннотация: В статье рассматривается технологический процесс модифицирования чугуна диспергирующей смесью.

Summary: The paper discusses the process of iron inoculation by dispersant mixture.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, шаровидный графит, модификатор.

Keywords: high duty cast iron, spherical graphite, inoculants.

Обработка чугуна чистым магнием или модификаторами, содержащими магний, как правило, сопровождается сильным пироэффектом и сопутствующим ему

дымовыделением.

Одной из основных причин возникновения пироэффекта и значительного дымовыделения в процессе модифицирования чугуна комплексными лигатурами является быстрое всплывание этих лигатур в среде расплава, так как их плотность значительно меньше плотности чугуна. При этом магний, содержащийся в лигатуре, не успевает прореагировать с компонентами жидкого чугуна

Как показала практика, полезное использование магния в большинстве случаев составляет от 25 до 60% в зависимости от способа его ввода, остальной магний вылетает из чугуна и сгорает на его поверхности с ослепительным пироэффектом и большим количеством дыма, состоящего из мелкодисперсных оксидов магния.

Можно легко подсчитать, что при остаточном содержании магния 0,05% и усвоении 60% бесполезно сгорает в атмосфере над поверхностью ковша до 0,1% магния. Это, в свою очередь, даёт 1,6 кг тонкодисперсных оксидов магния на каждую тонну жидкого чугуна. Такое количество оксидов магния загрязняет 158000 м³ воздуха до уровня ПДК по окиси магния. При данных условиях применение таких технологий возможно только при наличии хорошей вытяжной вентиляции. Однако такая вентиляция без очистных сооружений не изменяет опасную экологическую обстановку.

В НПО ЦНИИТМАШ разработан и освоен на ряде российских и зарубежных предприятий технологический процесс получения чугуна с шаровидным графитом при производстве отливок с применением модифицирующей диспергированной смеси (МДС-процесс).

Сущность МДС-процесса заключается в обработке жидкого чугуна измельчённым до определённой фракции модификатором, главной составляющей которого является магний. В настоящее время это наиболее перспективная технология, которая может быть использована в любом производстве без дополнительных капиталовложений и при соблюдении санитарных норм.

Технология подготовки ковшей при МДС-процессе аналогична сэндвич-процессу. Принципиальное отличие заключается в подготовке модификатора. Модификатор МДС-процесса имеет фракционный состав, который обеспечивает удерживание модификатора на дне ковша при заполнении его чугуном силами поверхностного натяжения чугуна до полного завершения процесса.

При укладке вещества между его частицами всегда остаются пустоты — поры, размер которых зависит от величины и конфигурации частиц. Если жидкость проникает в поры между частицами, то на них действует подъемная сила и при массе частицы меньшей массы жидкости она всплывает. В противоположном случае, когда за счет сил поверхностного натяжения жидкость не проникает в поры, подъемная сила не возникает и частица не всплывает. При условии не смачивания пористого материала жидким чугуном металл будет проникать в поры между частицами, если их радиус удовлетворяет условию:

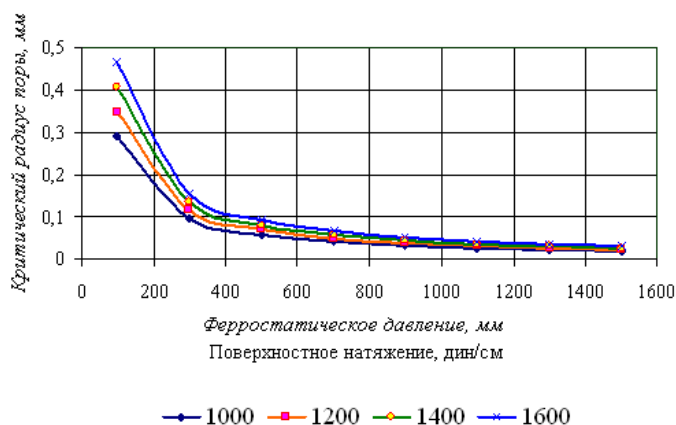


Рис 1. Влияние поверхностного натяжения и высоты столба чугуна на критический радиус поры при краевом угле смачивания 180

Поступила в редакцию 12.02.2010

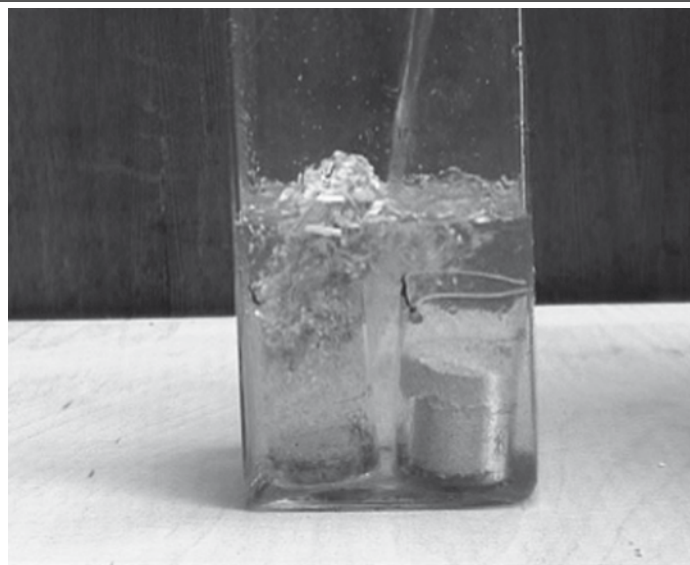
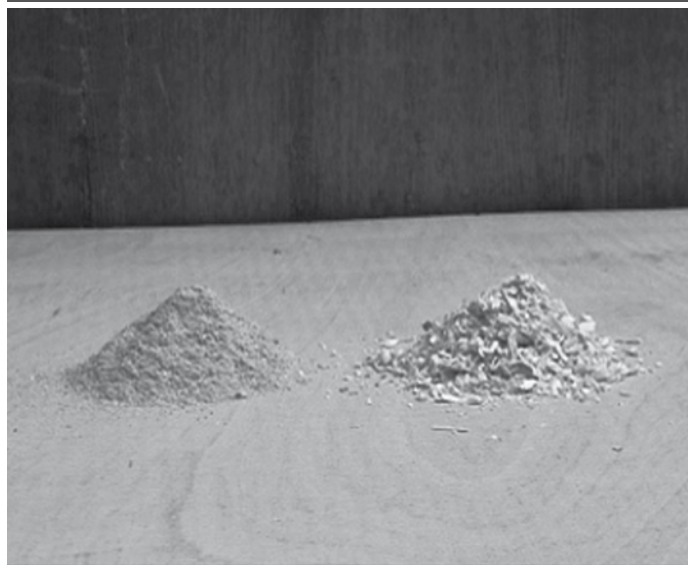


Рис 2. Моделирование поведения модификатора разной дисперсности в жидком чугуна

$$R \text{ пор} = 2 \sigma \text{ Cos } Q/P,$$

где σ — поверхностное натяжение
 P — внешнее давление
 Q — краевой угол смачивания

Таким образом, радиус поры, равный $2 \text{ Cos } \sigma/P$, будет критическим. При меньшем радиусе металл не будет проникать в поры между частицами.

Расчеты показали, что в зависимости от поверхностного натяжения, глубины погружения в жидкий чугун и степени смачиваемости величина критического радиуса может меняться от 0.01 до 0.45 мм (рис. 1). Следовательно, существуют реальные условия, при которых модификатор, помещенный на дно ковша, не будет всплывать в жидком чугуна и будет удерживаться там силами поверхностного натяжения чугуна. Это наглядно подтверждается при моделировании процесса при использовании воды и опилок. Опилки разной крупности свободно засыпали в два одинаковых ста-

канчика и поместили их в стеклянную ёмкость. При заливке ёмкости водой крупные опилки сразу всплыли на поверхность, как только вода залилась в стаканчик. Мелкие же опилки остались в своём стаканчике (рис. 2). Приведенный опыт убедительно доказывает возможность удерживания модификатора определённого фракционного состава на дне ковша при заполнении его жидким чугуном.

Влияние технологических факторов, температуры чугуна, химического и фракционного состава модификатора и массы обрабатываемого чугуна на проте-

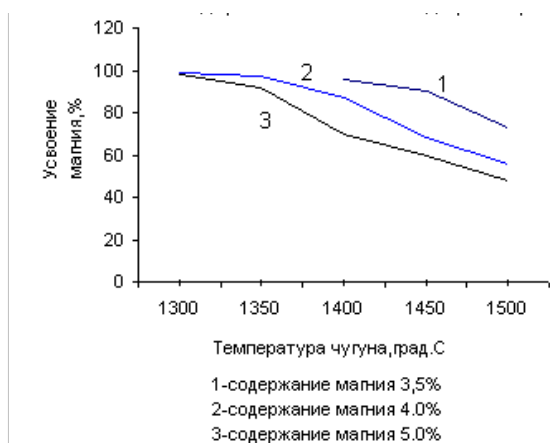


Рис 3 Усвоение магния в зависимости от температуры чугуна и содержания магния в модификаторе

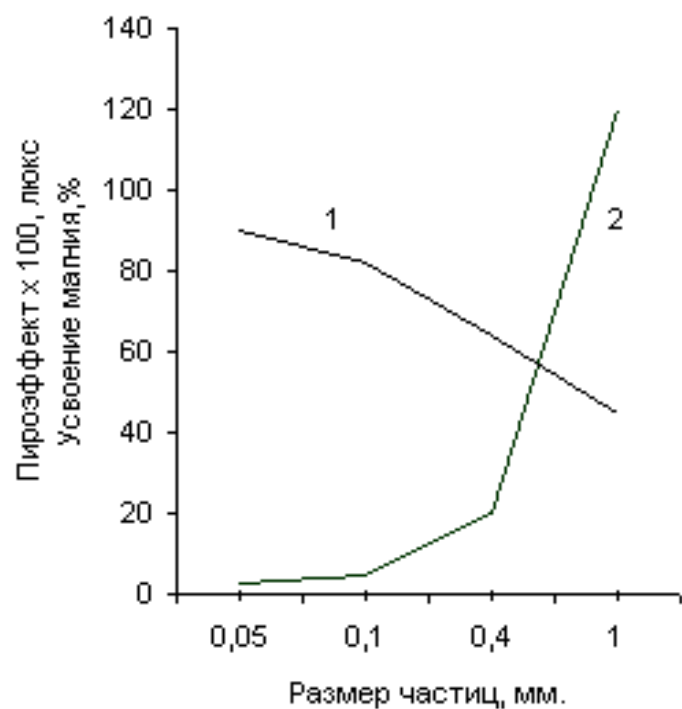


Рис 4 Влияние размеров частиц модификатора на величину пирозэффекта и усвоения магния при 1400°C
 1 — усвоение магния; 2 — пирозэффект

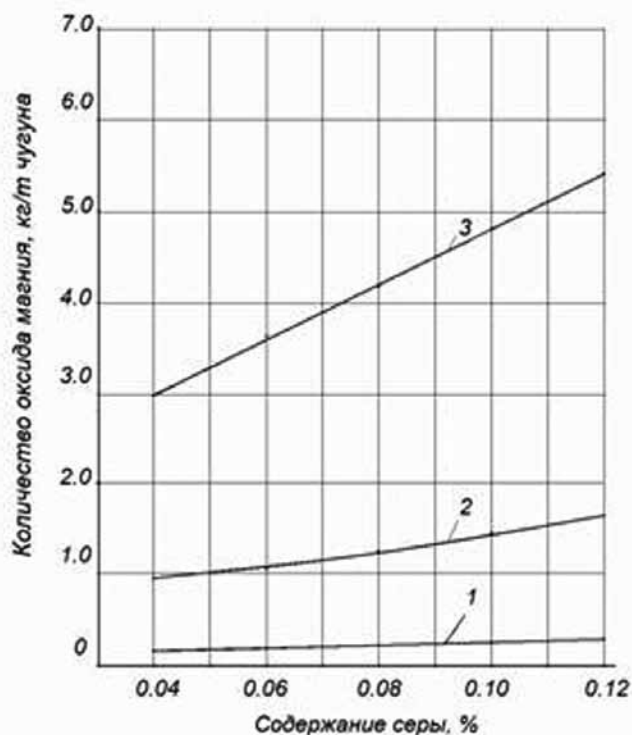


Рис. 5. Влияние содержания серы и усвоения магния на выделение оксида магния при модифицировании чугуна:

- 1 — коэффициент усвоения — 0.9
 2 — коэффициент усвоения — 0.6
 3 — коэффициент усвоения — 0.3

вание процесса модифицирования достаточно хорошо изучено. Это позволяет управлять процессом с целью минимизации пироэффекта и дымовыделений и получения заданной структуры и свойств чугуна.

Для МДС-процесса пригодны все существующие в настоящее время магнийсодержащие лигатуры, которые возможно размельчить до определённого фракционного состава, и даже дисперсный порошок чистого магния в смеси с ферросилицием или другими добавками. Подготовленный таким образом модификатор обеспечивает протекание процесса модифицирования без пироэффекта с высоким усвоением магния. Более того, применение модификатора, в котором магний находится в связанном состоянии, позволяет использовать более крупную его фракцию в сравнении с порошком чистого магния, так как в этом случае упругость паров магния значительно снижается.

Для полного усвоения магния в чугуне при модифицировании его мелкодисперсным модификатором необходимо, чтобы пузырьки паробразного магния, образующиеся из его твердых частиц при контакте с жидким чугуном, успевали полностью аннигилировать за время своего образования и всплывания в чугуне. При этом необходимо также, чтобы модификатор до окончания процесса находился на дне ковша, не всплывал бы в жидком чугуне и послойно, по мере растворения, контактировал с жидким чугуном. Указанные требования могут быть выполнены при соответствующем подборе

фракционного и химического состава модификатора

Правильно подобранный химический и фракционный состав модификатора позволяет получать чугун с шаровидным графитом в обычных разливочных ковшах с коэффициентом усвоения 90-95% практически без пироэффекта и выделений оксида магния в рабочей зоне ковша, не превышающей предельно допустимую концентрацию. Отсутствие пироэффекта позволяет достигать высокой степени усвоения магния, что снижает расход магния при модифицировании и делает технологию МДС-процесса на сегодняшний день самой экономичной.

Для спокойного модифицирования без пироэффекта с повышением температуры чугуна необходимо снижать концентрацию магния в модификаторе (рис. 3). Снижение содержания магния в модификаторе легко достигается подмешиванием в него измельченного ферросилиция, что дополнительно даёт сильный графитизирующий эффект и позволяет получать даже в тонких сечениях отливки структуру без включений свободного цемента.

Модифицирование чугуна методом МДС отличается высокой стабильностью и гибкостью процесса. Возможность составлять различные комбинации модифицирующих смесей с добавками РЗМ, кальция, бария и других элементов, в том числе легирующих, позволяет получать чугун с шаровидным графитом с высокими прочностными и пластическими свойствами в литом состоянии как при выплавке чугуна в электропечах, так и при выплавке в вагранках.

Необходимое количество модифицирующей смеси определяется, в основном, в зависимости от содержания серы в исходном чугуне и, как правило, составляет до 0.1% магния от массы обрабатываемого чугуна. Дозируется смесь с помощью мерной емкости или по массе. Модифицирующая смесь засыпается в разогретый до 600-800 °С ковш не ранее 5 мин до выпуска металла. При повторении цикла модифицирования в ковше не должно быть остатков жидкого чугуна. В случае, если после слива металла в ковше все же есть остатки жидкого металла, последний перед загрузкой модификатора необходимо засыпать чугунной стружкой.

Выплавка чугуна для модифицирования может производиться в любых плавильных агрегатах (вагранка, дуговая или индукционная электропечь). Химический состав исходного чугуна должен соответствовать составу требуемой марки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом с учетом повышения содержания кремния при модифицировании на 0.6-1.0% в зависимости от состава применяемой модифицирующей смеси. Температура чугуна перед модифицированием должна быть в пределах 1360-1500 °С. Модифицирование чугуна проводится в обычных разливочных ковшах чайникового типа. На дне ковша устраивается перегородка для размещения необходимого количества модификатора. Сливать чугун в ковш следует с максимально возможной скоростью, направляя струю металла в свободный от модификатора отсек. При случайном попадании струи металла в карман с модификатором происходит вспышка магния в результате перемешивания струей

модифицирующей смеси, которая всплывает в чугуна и за несколько секунд сгорает на поверхности чугуна. В этом случае модифицирование следует считать неудачным, металл должен быть слит в печь для последующего повторного модифицирования или разлит как серый чугун.

Нормально процесс модифицирования сопровождается кипением металла, интенсивным его перемешиванием без выплесков и пироэффекта. По окончании процесса кипение прекращается. Продолжительность модифицирования в ковшах емкостью от 0,5 до 5 т составляет от 1 до 3 минут.

Сравнительные замеры величины свечения над поверхностью ковша при модифицировании чугуна одного химического состава при температуре 1450 °С никель-магниевого лигатурой и МДС-процессом показали, что свечение в первом случае достигает 10 тыс люкс, тогда как во втором лишь 1 тыс люкс при уровне фона 500 люкс. Взаимосвязь между величиной частиц модификатора, величиной пироэффекта и усвоением магния приведена на рис. 4.

Выброс MgO в атмосферу зависит от величины коэффициента полезного использования магния, который определяется способом модифицирования. С понижением коэффициента полезного использования магния количество пылевидного оксида резко возрастает (рис. 5).

Расчеты показывают, что выбросы окислов магния при МДС-процессе в 10-20 раз меньше, чем при модифицировании лигатурами обычной крупности сэндвич-процессом.

Для реальной оценки выбросов при модифицировании чугуна по технологии МДС проводили исследования воздушной среды при производстве чугуна с шаровидным графитом в промышленных условиях. Исследования проводили параллельно: НИИ гигиены труда и профессиональных заболеваний АМН и санитарно-промышленная лаборатория завода. Отбор проб воздушной среды проводили в трех рабочих зонах в разные дни и при различных условиях модифицирования. Плавки проводили в печах ИЧТ-10. Чугун модифицировали МДС-процессом в ковшах емкостью 3 т. Температура чугуна перед модифицированием 1450-1460 °С.

Отбор проб воздуха проводили:

— в зоне дыхания плавильщика, находящегося у пульта опрокидывания печи с момента начала выпуска чугуна из печи в ковш до окончания выпуска и прекращения реакции модифицирования;

— в зоне дыхания заливщика при очистке шлака из ковша после модифицирования и при разливке металла в формы.

Результаты исследований приведены в таблице 1.

Исследования показали, что концентрация оксида магния в зоне дыхания рабочих при получении чугуна по технологии МДС в два раза ниже предельно допустимой концентрации по санитарно-гигиеническим требованиям к воздуху рабочей зоны. Причем выделение оксида непосредственно при модифицировании, то есть когда происходит обработка чугуна магнием, даже несколько меньше, чем при очистке шлака и при разлив-

ке чугуна в формы, что позволяет рекомендовать этот способ к использованию при существующей в цехе обменной вентиляции.

Таблица 1

Содержание окислов магния в воздушной среде при модифицировании чугуна по технологии МДС

Время отбора проб	Место отбора проб	Содержание окислов магния, мг/м			
		1 ковш	2 ковш	3 ковш	среднее
1 февраля	ИЧТ-10	1,73	4,33	-	3,03
	Счистка шлака	0,43	2,62	-	1,52
	Заливка форм	0,43	0,86	-	0,64
3 февраля	ИЧТ-10	0,43	0,88	-	0,65
	Счистка шлака	-0,43	0,88	-	0,88
	Заливка форм	-	0,88	-	0,65
23 марта	ИЧТ-10	3,26	5,80	5,0	4,68
	Счистка шлака	5,20	4,81	-	5,00
	Заливка форм	3,40	4,27	-	3,83
3 апреля	ИЧТ-10	4,02	5,43	-	4,72
	Счистка шлака	4,22	3,62	-	3,92
	Заливка форм	4,21	-	-	4,21
8 апреля	ИЧТ-10	4,12	4,77	-	4,44
	Счистка шлака	3,70	3,10	-2,94	3,40
	Заливка форм	-	4,75	-	3,84
12 апреля	ИЧТ-10	4,65	3,66	4,33	4,21
	Счистка шлака	2,91	5,81	3,43	4,05
	Заливка форм	2,94	-	-	2,94
13 апреля	ИЧТ-10	3,67	4,49	2,42	3,52
	Заливка форм	3,16	4,62	2,28	3,35

Предлагаемый процесс имеет преимущества в сравнении с существующими методами модифицирования, в том числе:

— обеспечивает стабильное получение чугуна с шаровидным графитом в обычных разливочных ковшах любой емкости;

— может быть использован в любом литейном цехе, поскольку не требует специального оборудования и дополнительной вентиляции;

— обеспечивает спокойное протекание процесса без пироэффекта;

— позволяет проводить модифицирование чугуна в широком интервале температур 1360-1500 °С, что дает возможность использовать для модифицирования металл, полученный из любых плавильных агрегатов (вагранка, дуговые и индукционные электропечи);

— выделение в атмосферу окислов магния при модифицировании составляет 0,002... 0,006 мг/л;

— позволяет получать чугун с заданной структурой и высокими параметрами механических свойств в литом состоянии. Чугун марок ВЧ-40 и до ВЧ-60 включительно может быть получен без дополнительного легирования с относительным удлинением в литом состоянии 22-3 % соответственно;

— характеризуется экономичностью, низким расходом магния (0,05...0,1% от массы модифицируемого чугуна в зависимости от содержания серы) и высокой степенью десульфурации.

Заводинский В. Г.
V. G. Zavodinsky

05.16.01

КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА QUANTUM MECHANICAL STUDY OF TUNGSTEN CARBIDE NANOPARTICLES

Заводинский Виктор Григорьевич — доктор физико-математических наук, профессор, директор Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН ул. Тихоокеанская 153, (г. Хабаровск). E-mail: vzavod@mail.ru

Victor G. Zavodinsky — Doctor in Physics and Mathematics, Professor, Director of the Material Technology Institute at the Khabarovsk Research Centre of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 153 Tikhookeanskaya str., Khabarovsk, Russia vzavod@mail.ru

Аннотация: Методами теории функционала электронной плотности и псевдопотенциала изучены структура, энергия и механические свойства наночастиц WC. Обнаружено, что малые частицы (содержащие менее 15 атомных пар WC) обладают кубоподобной структурой типа NaCl. В области 10-20 пар WC частицы с кубической и тригональной структурой имеют примерно равные энергии, однако их внутренняя атомная структура сохраняет свойственный для NaCl характер чередования атомов W и C. Тригональная частица $W_{15}C_{15}$ была использована для изучения твердости и прочности на разрыв. Оказалось, прочность наночастицы намного превышает прочность массивного материала. Вакансии W и C снижают прочность частиц, однако атомы кобальта, внедряясь в вакансионные позиции, могут восстанавливать прочность и твердость наночастиц почти до величин, характерных для бездефектного случая. Плотность электронных состояний наночастиц WC имеет вид, близкий к плотности состояний массивной кубической фазы карбида вольфрама, с высокой плотностью вблизи уровня Ферми.

Summary: By the methods of the electron charge/pseudo charge functional theory the structure, energy and mechanics of WC nanoparticles were studied. It was revealed that smaller particles (containing less than 15 atomic pairs of WC) have a cube-like structure of the NaCl type. In the range of between 10 to 20 pairs of WC, particles with cubic or trigonal structure have more or less equal energy, although their inner atomic structure retains its NaCl-like pattern of W and C sequence. A trigonal particle $W_{15}C_{15}$ was used for

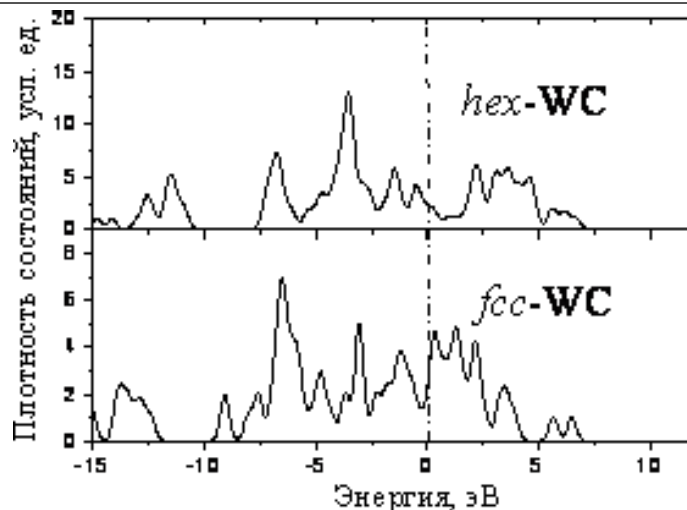


Рис. 1. Рассчитанные плотности состояний для массивного гексагонального (hex-WC) и кубического (fcc-WC) карбида вольфрама. Вертикальная пунктирная линия означает уровень Ферми

studying hardness and breaking strength. It turned out that strength of a nanoparticles was much in excess of that of bulk material. W and C vacancies reduce particle strength, on the other hand cobalt atoms when taking these vacant positions may recover strength and hardness of nanoparticles up to the values characteristic of defect-free example. Density of electron states for WC nanoparticles looks similar to the density of the cubic phase in bulk of tungsten carbide, with a high density closer to the Fermi level.

Ключевые слова: карбид вольфрама, кобальт, наночастицы, псевдопотенциал, твердость, прочность

Keywords: tungsten carbide, cobalt, nanoparticles, pseudo charge, strength, hardness.

Данная работа поддержана грантами Российской академии наук и Российского фонда фундаментальных исследований.

Введение

Твердые сплавы на основе карбида вольфрама (кристаллиты WC внутри матрицы Co) широко используются как материал для режущего инструмента. Недавние исследования показывают, что рабочие характеристики твердых сплавов существенно улучшаются при уменьшении размеров кристаллитов до 300-500 нм [1-4]. Однако природа такого изменения неясна. Более того, не ясно, как изменятся свойства твердых сплавов при дальнейшем уменьшении кристаллитов WC. Кроме того, отсутствует информация об атомной и электронной структуре наночастиц WC и об их механических свойствах. Показано [5, 6], что наночастицы с размерами 300-500 нм имеют треугольную внешнюю форму, однако их внутренняя атомная структура неизвестна. Отдельный вопрос связан с кобальтом. Исследова-

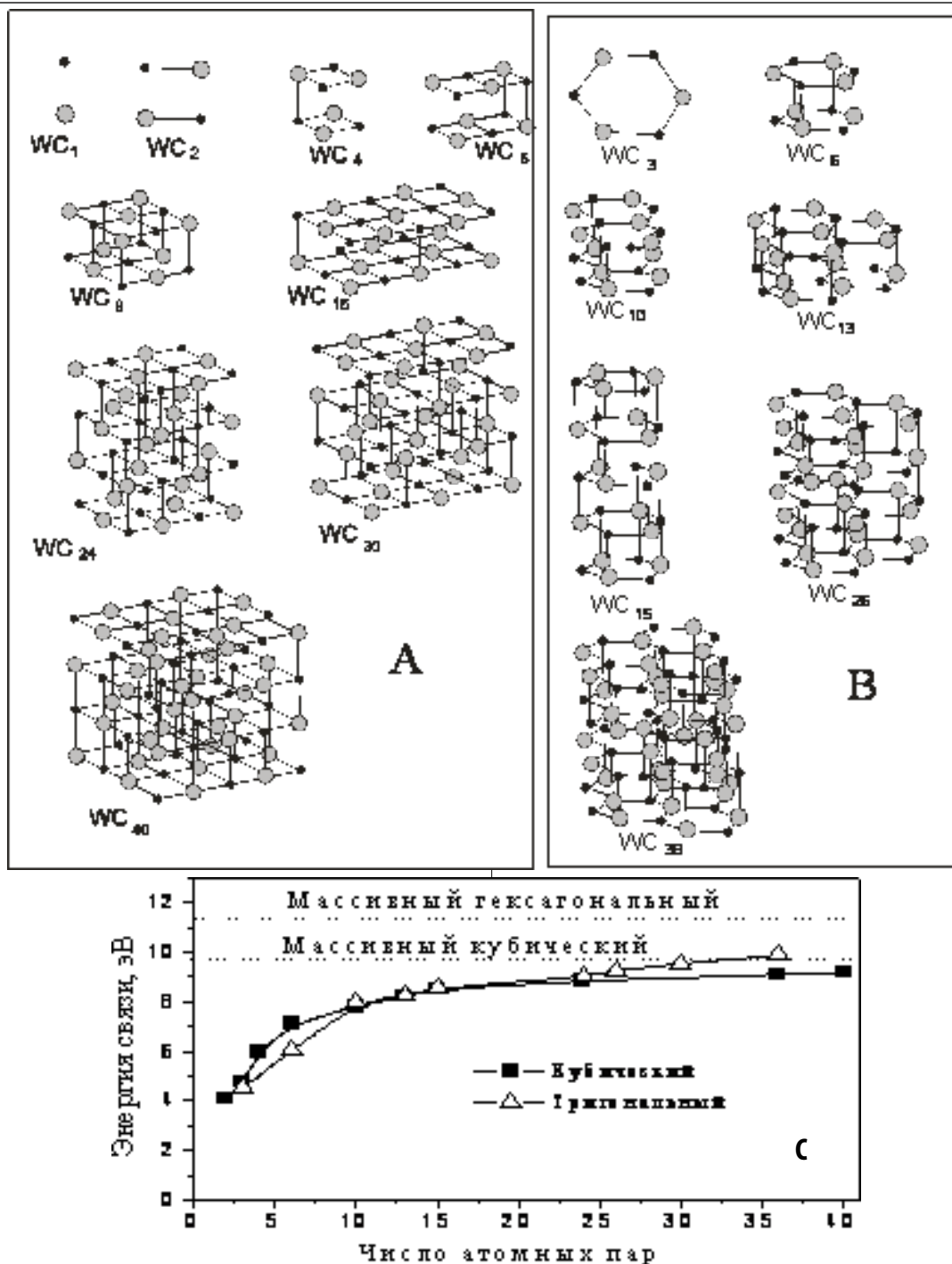


Рис. 2. Атомные схемы наночастиц WC с кубической (А) и тригональной (В) структурой. Малые черные кружки — атомы углерода, большие серые — атомы вольфрама. Панель С демонстрирует зависимость энергии связи (на одну атомную пару WC) от структуры и размера наночастицы WC

ния границы WC/Co с помощью высокоразрешающей электронной микроскопии показывают [7], что кобальт может проникать внутрь кристаллитов WC. Спрашивается: ограничена ли его роль только цементирующей функцией или кобальт активно влияет на механические свойства карбида вольфрама?

Данная статья посвящена квантово-механическому моделированию наночастиц карбида вольфрама и изучению их электронной структуры и механических свойств.

Использованные методы и подходы

Полная энергия, электронная структура и механические свойства наночастиц WC были рассчитаны с помощью программного пакета FHI96spin, который является модификацией пакета FHI96md [8], ранее использованного для многих систем, включая переходные металлы и их соединения [9-12]. Этот пакет основан на спин-поляризованной версии теории функционала электронной плотности, методе псевдопотенциала и использовании набора плоских волн. В данной работе

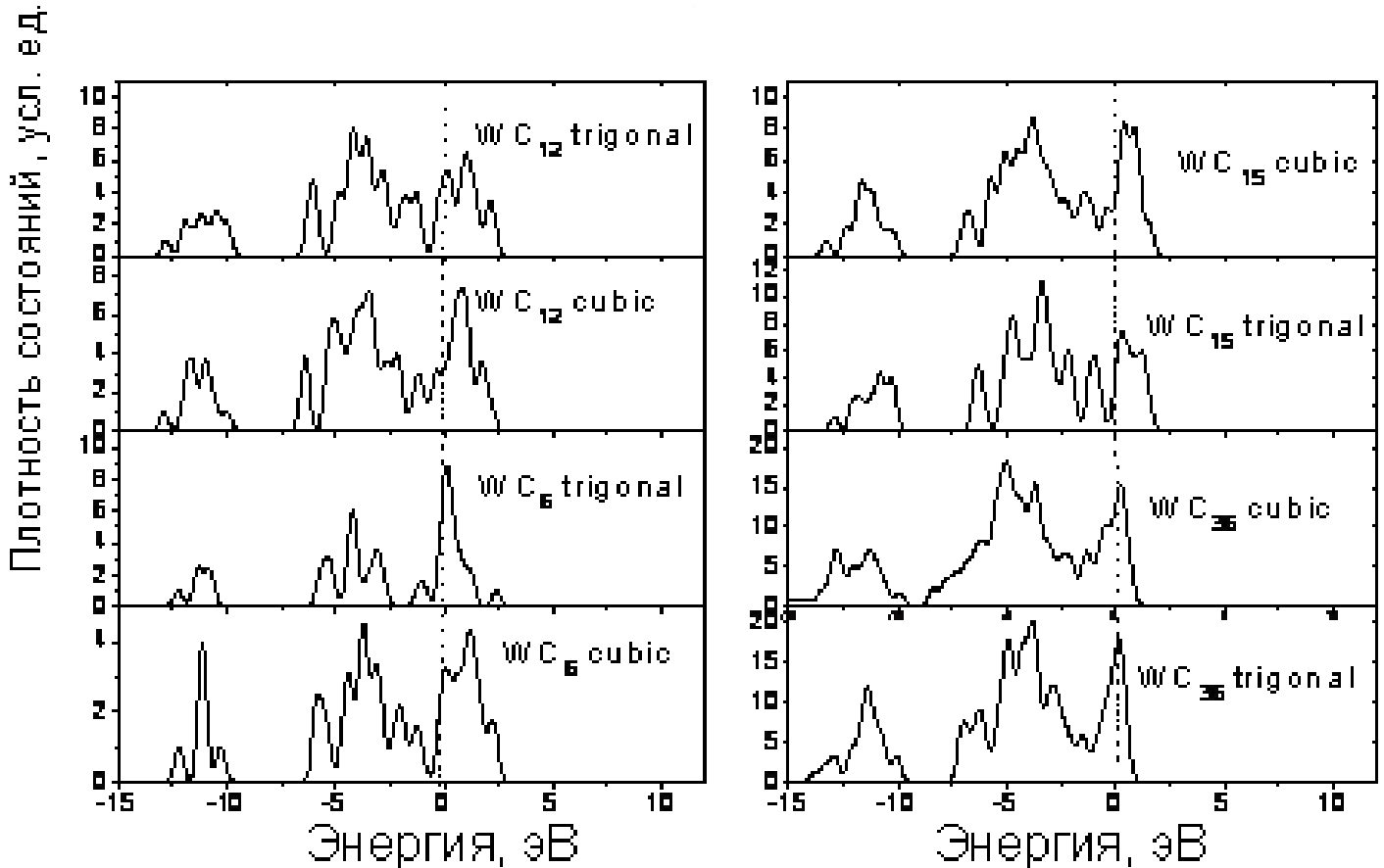


Рис. 3. Плотности состояний для кубических и тригональных наночастиц WC. Вертикальные пунктирные линии обозначают уровень Ферми

я использовал псевдопотенциалы углерода и кобальта, построенные с помощью пакета FHI98PP [13] по схеме Труллера-Мартинса [14], однако для вольфрама была применена схема Хаманна [15]. Все эти потенциалы являются сепарабельными, трансферабельными и нормосохраняющими. Они проверены на отсутствие так называемых «ложных» состояний (ghost states) и использованы для тестового определения равновесных параметров решетки и объемного модуля упругости. Параметры псевдопотенциала приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Критические радиусы для s, p и d компонент (r_s , r_p , r_d) и тип локальной части (lloc) псевдопотенциалов.

Элемент	r_s , Å	r_p , Å	r_d , Å	lloc
W	1,57	1,78	0,88	s
C	1,50	1,50	1,50	d
Co	2,18	2,92	2,18	s

Во всех случаях применялась аппроксимация обобщенных градиентов (generalized gradient approximation) и выполнялась оптимизация атомной геометрии. Поскольку в наш метод была включена гибкая спиновая поляризация, вычисления не требовали специального выбора мультиплетности. Она получалась автоматически, самосогласованным образом. Равновесные параметры решетки и модули упругости рассчитывались с использованием уравнения состояния Мурнагама [17].

Поскольку пакет FHI96spin работает с периодически-

ми волновыми функциями, для исследования наночастиц использовалась кубическая суперячейка размером 30 а. е. (1 а. е. равна 0,529 нм), достаточно большая для изучения наночастиц с числом пар WC до 40 как одиночных, не взаимодействующих частиц. В большинстве случаев (за исключением объемных вычислений) я использовал только одну точку зоны Бриллюэна, а именно, гамма-точку (0, 0, 0). Для объемных вычислений были использованы схемы (3X3X3 и 5X5X5) Монкорста-Пака [18] с числом k-точек до 27. Энергия обрезания набора плоских волн составляла 40 Ry. Самосогласование по энергии происходило с точностью 0.005 эВ.

Массивный WC

Структура массивного карбида вольфрама хорошо известна. Гексагональный WC существует ниже 2525 °C, а выше этой температуры стабилен кубический fcc WC со структурой типа NaCl [19].

Для hex-WC я нашел равновесную постоянную решетки $a = 2.92 \text{ \AA}$, энергию когезии $E_{\text{coh}} = 9.69 \text{ эВ}$ и объемный модуль упругости $B = 388 \text{ ГПа}$. Экспериментальные величины равны $a=2.91 \text{ \AA}$, $E_{\text{coh}}=8.34 \text{ эВ}$, and $B=331 \text{ ГПа}$ [20]. Опубликованные теоретические данные лежат в интервалах 2.88-2.92 Å, 379-413 ГПа и 8.14-9.72 эВ, соответственно [21].

Для кубического fcc-WC вычисленные величины постоянной решетки и энергии когезии равны $a=4.39 \text{ \AA}$ и $E_{\text{coh}}=8.89 \text{ эВ}$. Соответствующие опубликованные вели-

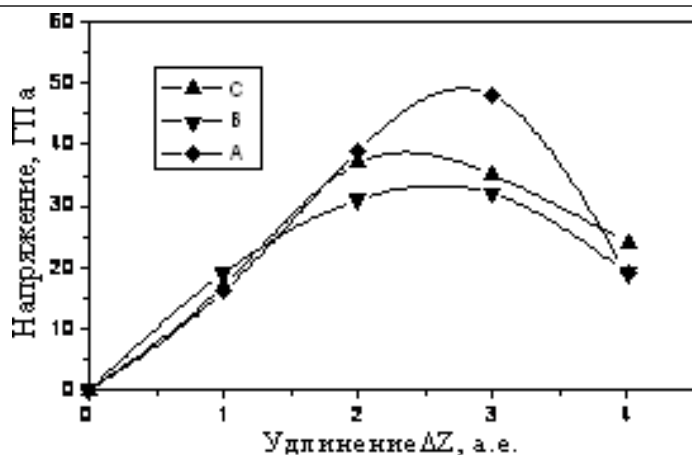
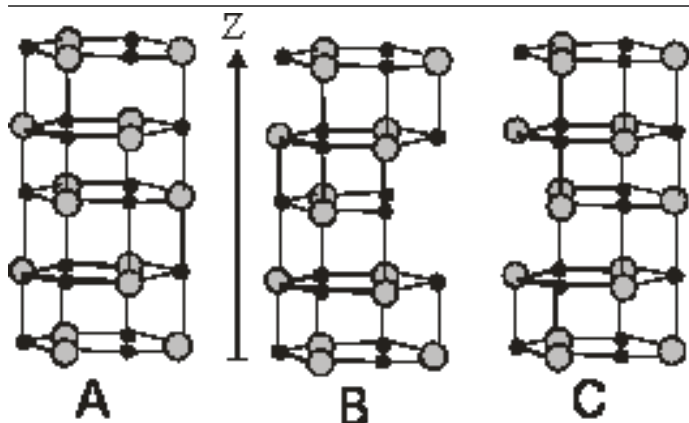


Рис. 4. Исследование напряжения разрыва тригональной частицы $(WC)_{15}$: А) идеальная частица; В) частица с W-вакансией; С) частица с С-вакансией. Вертикальная стрелка Z представляет направление удлинения

чины равны 4.29-4.38Å и 7.71-9.46 эВ [21].

Кроме того, я рассчитал плотности электронных состояний (ПЭС) (рис. 1). Кривые ПЭС для hex-WC и fcc-WC выглядят очень похоже на результаты, приведенные в других теоретических работах [20, 22, 23]. Главное отличие fcc-ПЭС от hex-ПЭС заключается в различных величинах плотности состояний на уровне Ферми, а именно: в гексагональном случае уровень Ферми расположен вблизи минимума кривой, а в кубическом случае — вблизи максимума.

Атомная структура и электронные состояния наночастиц

Существует экспериментальная и теоретическая информация [5, 24-28], что нанокристаллы карбида вольфрама скорее треугольные, чем гексагональные. Однако неизвестно, какова атомная структура наночастиц WC, каковы их электронные и иные свойства.

Я исследовал стехиометрические частицы с числом (N) пар WC от 2 до 40, сравнивая их энергию связи, приходящуюся на одну пару WC. Прежде всего, я обнаружил, что связи типа NaCl предпочтительны для всех изученных частиц. Гексагональные частицы с расположением атомов W и C как в массивном hex-WC (послойно) нестабильны и имеют тенденцию самопроизвольно перестраиваться в частицы с тригональной симметрией и упорядочением типа NaCl. Тригональные частицы конкурируют с кубическими: при for $N < 15$ выгодны кубические частицы, а при $N > 15$ становятся выгодными тригональные. Атомные схемы типичных частиц с кубической и тригональной симметрией показаны на рис. 2 А, Б, а зависимость энергии связи от структуры и размера частиц отображена на рис. 2С.

Несмотря на то, что связывание атомов W и C в наночастицах имеет тот же самый тип Na-Cl, что и в объемном fcc-WC, длины этих связей отличаются от кристаллических, а именно: в отрелаксированной тригональной частице $(WC)_{15}$ расстояния W-C варьируются от 1,98 до 2,20 Å, а в кубической частице $(WC)_{24}$ они равны 1,98 Å в углах частицы и возрастают до 2,40 Å с приближением к центру. В целом, средние расстояния W-C ($d(W-C)_{av}$)

в тригональных частицах меньше, чем в кубических (см. табл. 2). Кроме того, в тригональных частицах средние расстояния W-C быстро сходятся к 2,04 Å, в то время как в кубических частицах они имеют тенденцию возрастать до объемной величины 2,20 Å. Возможно, в этом заключается главная причина того, что с увеличением размеров частиц тригональные частицы становятся более выгодными.

Таблица 2

ТСредние длины связей W-C ($d(W-C)_{av}$) в кубических и тригональных частицах WC.

	$(WC)_6$		$(WC)_{15}$		$(WC)_{24}$		$(WC)_{36}$	
	Куб.	Тригон.	Куб.	Тригон.	Куб.	Тригон.	Куб.	Тригон.
$d(W-C)_{av}, \text{Å}$	2,07	1,98	2,11	2,04	2,12	2,04	2,13	2,04

Электронная структура наночастиц WC представлена на рис. 3. Все построенные плотности состояний (ПС) выглядят похожими на ПС массивного fcc-WC, показанную выше на рис. 1 и имеющую уровень Ферми недалеко от локального максимума плотности состояний. Можно предположить, что природа такого сходства лежит в сходстве типа связей атомов W и C в наночастицах (как в тригональных, так и в кубических) с типом связей в объемном fcc-WC. Во всех этих случаях это тип Na-Cl.

Прочность на разрыв и твердость. Влияние кобальта

Прочность и твердость являются наиболее важными механическими характеристиками карбида вольфрама как материала для режущих инструментов. Поскольку тригональные частицы более стабильны при реальных размерах, то при исследовании прочности и твердости я ограничился именно этим случаем, а именно, для исследования была выбрана частица $(WC)_{15}$, изображенная на рис. 2.

Для нахождения предела прочности на разрыв я удлинял шаг за шагом частицу $(WC)_{15}$ вдоль оси Z третьей симметрии, фиксируя каждый раз координаты край-

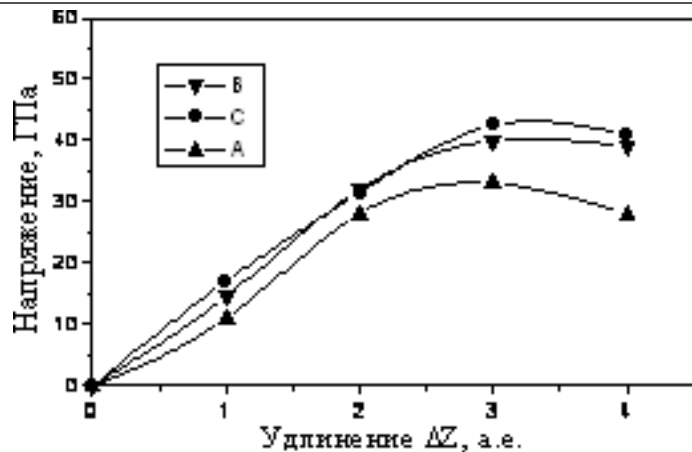
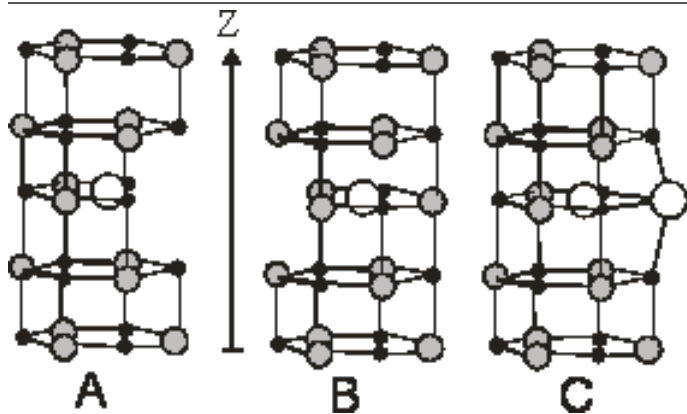


Рис. 5. Исследование напряжения разрыва для наносистемы WC-Co; белые кружки — атомы кобальта. А) частица с W-вакансией и одним атомом кобальта внутри; В) частица с C-вакансией и одним атомом кобальта внутри; С) частица с W-вакансией и двумя атомами кобальта — один внутри, другой снаружи.

них атомов и давая возможность релаксировать всем остальным атомам (рис. 4). Величина напряжения T вычислялась при этом через производную полной энергии E как функции Z :

$$T = \frac{dE}{dZ} \cdot \frac{1}{S},$$

где S — поперечное сечение частицы.

Зависимость напряжения как функции Z для идеальной частицы представлена на рис. 4, А. Максимум этой зависимости соответствует 48 ГПа, что значительно больше

известных величин для массивного карбида вольфрама (0,3-0,4 ГПа) и для твердых сплавов на его основе (0,5-2,0 ГПа). На рис. 4, В, С представлены результаты аналогичных расчетов для частиц с вакансиями: с W-вакансией; с C-вакансией. Можно видеть, что вакансии уменьшают предел прочности, однако это влияние не слишком значительное: коэффициент снижения предела прочности не превышает 0,7. То есть дефектные наночастицы достаточно хорошо сохраняют свою прочность.

В твердых сплавах WC-Co частицы карбида вольфрама окружены атомами кобальта. Если частицы WC имеют некие поверхностные дефекты (в нашем случае вакансии), атомы кобальта могут взаимодействовать с ними и даже проникать в поверхностные слои части-

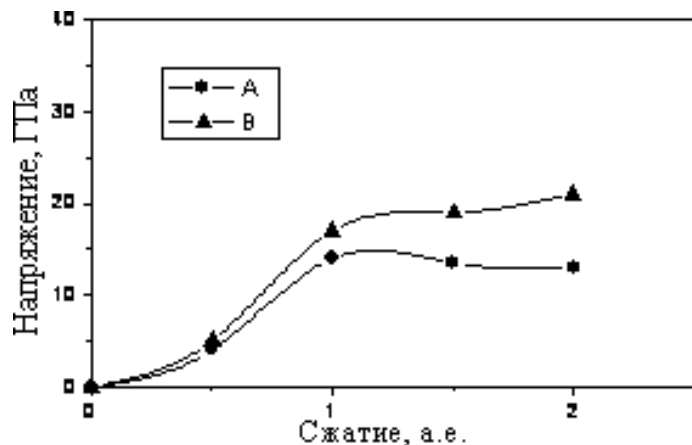
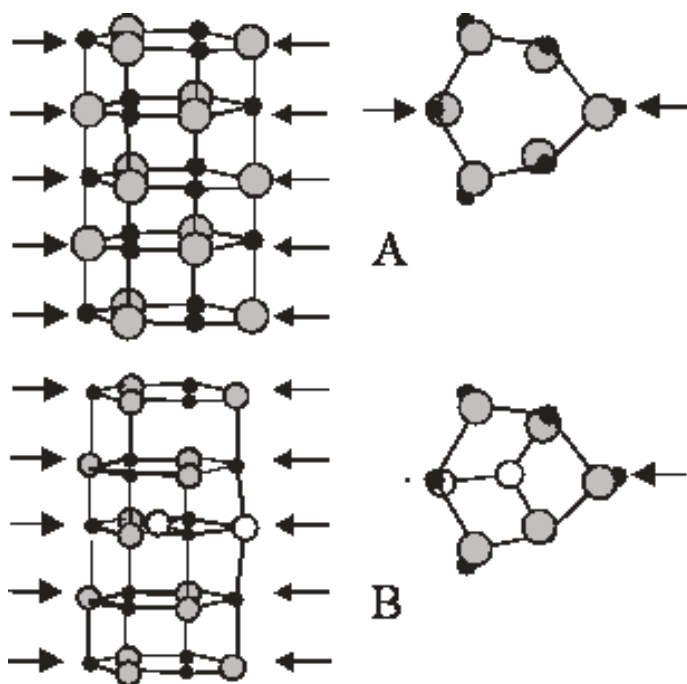


Рис. 6. Схема изучения реакции частицы $(WC)_{15}$ на сжатие: А) идеальный случай; В) случай с W-вакансией и двумя атомами кобальта

цы, как это отмечается в экспериментальных исследованиях [7]. Некоторые примеры такой ситуации продемонстрированы на рис. 5, где в случаях А и В атомы кобальта проникают внутрь частицы WC через вакансии W и C, а в случае С один атом кобальта проникает внутрь частицы, а второй атом Со заполняет вакансию. При этом в случае А атом Со внутрь частицы безбарьерно, а в случае В высота энергетического барьера достаточно мала (около 0,5 эВ).

Из сравнения рисунков 5 и 4 ясно, что атомы кобальта могут увеличивать предел прочности дефектных частиц WC, доводя его до 90% от величины, характерной для бездефектного состояния. Другими словами, кобальт может залечивать некоторые поверхностные дефекты частиц WC, улучшая их свойства.

Поскольку мы изучаем твердые материалы, естественно сделать особый акцент на их твердости. Однако твердость является технической характеристикой и не имеет точного физического эквивалента. Невозможно напрямую сравнить твердость массивного материала и наночастиц. К тому же в данной работе нас интересовала не сама твердость наночастиц, а то влияние, какое на нее оказывают дефекты. Поэтому я исследовал способность наночастицы $(WC)_{15}$ сопротивляться сжатию, обращая особое внимание влиянию на этот процесс атомов кобальта.

Как ясно из рис. 6, дефектная наночастица карбида вольфрама, содержащая атомы кобальта, может сопротивляться сжатию примерно в полтора раза сильнее, чем бездефектная, т. е. ее твердость увеличивается.

Заключение

Квантово-механические вычисления подтверждают, что наночастицы WC обладают тригональной симметрией. Предел прочности на разрыв для наночастиц оказывается в 10-15 раз больше, чем для массивного материала. Атомы кобальта могут залечивать некоторые поверхностные дефекты частиц WC и улучшать их механические свойства.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Schubert WD, Bock A, Lux B. General aspects and limits of conventional ultrafine WC powder manufacture and hard metal production. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 1995; 13; 281-6.
- 2 Jia K, Fischer TE, Gallois B. Microstructure, hardness and toughness of nanostructure and conventional WC-Co composites. *Nanostruct. Mater.* 1998; 10; 875-91.
- 3 Kim BK, Ha GH, Lee DW, Lee GG, Ahn IS. Chemical processing of nanostructured cemented carbide. *Advanced Performance Materials* 1998; 5; 341-52.
- 4 Ferreira JAM; Pina Amaral MA, Antunes FV, Costa JDM. A study on the mechanical behavior of WC/Co hard metals. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 2009; 27; 1-8.
- 5 Christensen M, Wahnström G, Alibert C, Lay S. Quantitative analysis of WC grain shape in sintered WC-Co cemented carbides. *Phys. Rev. Lett.* 2005; 94; 066105 (4).

- 6 Delanoe A, Lay S. Evolution of the WC grain shape in WC-Co alloys during sintering: Effect of C content. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 2009; 27; 140-8.
- 7 Yamamoto T, Ikuhara Y, Watanabe T, Sakuma T, Taniuchi Y, Okada K, Tanase T. High resolution electron microscopy study in Cr³C₂-doped WC-Co. *Journ. of Materials Science* 2001; 36; 3885-90.
- 8 Beckstedte M, Kley A, Neugebauer J, Scheffler M. Density functional theory calculations for poly-atomic systems: electronic structure, static and elastic properties and ab initio molecular dynamics. *Comp. Phys. Commun.* 1997; 107; 187-205.
- 9 Dabrowski J, Mussig H-J, Zavodinsky VG, Baierle R, Caldas MJ. Mechanism of dopant segregation to SiO₂/Si (001) interfaces. *Phys. Rev. B* 2002; 65; 245 305.
- 10 Zavodinsky VG. The mechanism of ionic conductivity in stabilized cubic zirconia. *Phys. Solid State* 2004; 46 (3); 453-7.
- 11 Zavodinsky VG, Chibisov AN. Zirconia nanoparticles and nanostructured systems. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2006; 29; 173-6.
- 12 Zavodinsky VG, Chibisov AN. Influence of impurities on the stability and electronic states of titanium dioxide in the form of anatase. *Phys. Solid State* 2009; 51 (3); 507-13.
- 13 Fuchs M, Scheffler M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density functional theory. *Comp. Phys. Commun.* 1999; 119; 67-165.
- 14 Troullier N, Martins JL. Efficient pseudopotentials for plane-wave calculations. *Phys. Rev. B* 1991; 43; 1993-006.
- 15 Hamann DR. General norm-conserving pseudopotentials. *Phys. Rev. B* 1989; 40; 2980-1.
- 16 Perdew JP, Wang Y. Accurate and simple density functional for the electronic exchange energy. *Phys. Rev. B* 1986; 33; 8800-2.
- 17 Murnaghan FD. The compressibility of media under extreme pressures. *Proc. Natl. Acad. Sci USA* 1944; 30; 244-7.
- 18 Monkhorst H J, Pack JD. Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev. B* 1976; 13; 5188-2.
- 19 Russian site «Chemical encyclopedia/tungsten carbide» <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/813.html>.
- 20 Price DL, Cooper BP. Total energies and bonding for crystallographic structures in titanium-carbon and tungsten-carbon systems. *Phys. Rev. B* 1989; 39; 4945-77.
- 21 Christensen M, Wahnström G. Co-phase penetration of WC (10)/WC (10) grain boundaries from first principles, *Phys. Rev. B* 2003; 67; 115415 (11).
- 22 Mattheiss LF, Hamman DR. Bulk and surface electronic structure of hexagonal WC. *Phys. Rev. B* 1984; 30; 4, 1731-8.
- 23 Liu AY, Wentzcovitch RM, Cohen ML. Structural and electronic properties of WC. *Phys. Rev. B* 1989; 38, 9483-9.
- 24 Nabarro FRN, Bartolucci Luyckx S, Waghmare UV. Slip in tungsten monocarbide: I. Some experimental observations. *Materials Science and Engineering: A.* 2008; 483-484; 139-2.
- 25 Nabarro FRN, Bartolucci Luyckx S, Waghmare UV. Slip in tungsten monocarbide: II. A first-principles study. *Materials Science and Engineering: A.* 2008; 483-484; 9-12.
26. Kim C-S, Rohrer GS. Geometric and crystallographic characterization of WC surfaces and grain boundaries in WC-Co composites, *Interface Sci.* 2004; 12 (1); 19-7.
- 27 Shatov AV, Firstov SA, Shatova IV. The shape of WC crystals in cemented carbides. *Mater. Sci. Eng. A,* 1998; 242; 7-4.
- 28 Kim S, Han S-H, Park J-K, Kim H-E. Variation of WC grain shape with carbon content in the WC-Co alloys during liquid-phase sintering, *Scripta Mater.* 2003; 48 (5); 635-9.

Григорьев С. Н.
S. N. Groigoryev

05.16.08

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОСАЖДЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ НАНОПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ PRINCIPLES OF THE DEPOSITION OF WEAR-RESISTANT NANOCOATINGS IN TOOL PRODUCTION

Григорьев Сергей Николаевич Ректор, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Высокоэффективные технологии обработки» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный технологический университет «Станкин». E-mail: rector@stankin.ru
Sergey N. Grigoryev — Rector, Doctor in Engineering, Professor, Head of Department of High Performance Process Technologies, State Educational Institution for Higher Professional Education «Moscow City State Technological University STANKIN», rector@stankin.ru

Аннотация: Представлен обзор способов повышения износостойкости лезвийного инструмента путем применения различных методов нанесения покрытий и модификации поверхностного слоя.

Summary: The paper offers a review of methods for improving wear resistance of edge tools by using various techniques of coating deposition and modification of surface layer of material.

Ключевые слова: высокоскоростная механическая обработка, устойчивость, лезвийный инструмент, покрытия.

Keywords: high-speed machining, resistance, edge tool, coatings.

Хорошо известно, что используемые в настоящее время материалы для изготовления различных видов режущих инструментов специализированы для определенных условий работы и имеют различные основные свойства — например, быстрорежущие стали ха-

рактеризуются высокими прочностными свойствами, но имеют сравнительно невысокую твердость и теплоустойчивость, а керамика, напротив, имеет высокие значения твердости и теплоустойчивости, но обладает низкими прочностными свойствами. Поэтому создание современного инструментального материала, пригодного для эксплуатации в существенно отличающихся условиях резания, путем применения различных методов нанесения покрытий и модификации поверхностного слоя, является очень важной задачей для инструментального производства. Важным преимуществом методов нанесения покрытий и модификации является то обстоятельство, что их легко применить к уже готовому «рыночному» инструменту, когда реализация других направлений его совершенствования в большинстве случаев уже невозможна.

По своей сути методы, использующиеся для нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущих инструментов, имеют существенные различия в применяемых источниках энергии (лазерный луч, низкотемпературная плазма и др.), рабочих средах (воздух, вакуум и др.) и т. д. Однако, несмотря на это, эффекты, которые могут быть достигнуты при их применении, имеют существенные сходства и связаны с улучшением наиболее важных показателей эффективности (выходных параметров) процесса резания.

На рис. 1 представлена взаимосвязь между выходными параметрами процесса резания и физико-механическими и кристаллохимическими свойствами поверхности и поверхностного слоя инструмента. Представленная взаимосвязь наглядно демонстрирует, что улучшение выходных параметров процесса резания является следствием изменения функциональных и физических параметров процесса резания, которое, в свою очередь, является следствием изменения физико-механических и кристаллохимических свойств поверхности и поверхностного слоя инструмента, происходящего в результате применения того или иного метода нанесения покрытий и модификации [1].

В зависимости от решаемых задач поверхностный слой, сформированный каким-либо из методов поверхностной обработки, может выполнять функции:

- высокотвердого поверхностного слоя, препятствующего абразивному изнашиванию рабочих поверхностей инструмента в процессе резания;
- промежуточной среды, обладающей низким сродством с обрабатываемым материалом и препятствующей интенсивному схватыванию в условиях адгезионного изнашивания;
- антифрикционной твердой смазки, минимизирующей налипание обрабатываемого материала на инструмент в процессе резания;
- барьерного слоя, препятствующего отпуску поверхностного слоя инструмента в результате воздействия повышенных теплосиловых нагрузок;
- барьерного слоя, способного тормозить или останавливать распространение сетки усталостных трещин, приводящей к макровыкрашиванию рабочих кромок.

Поступила в редакцию 12.02.2010

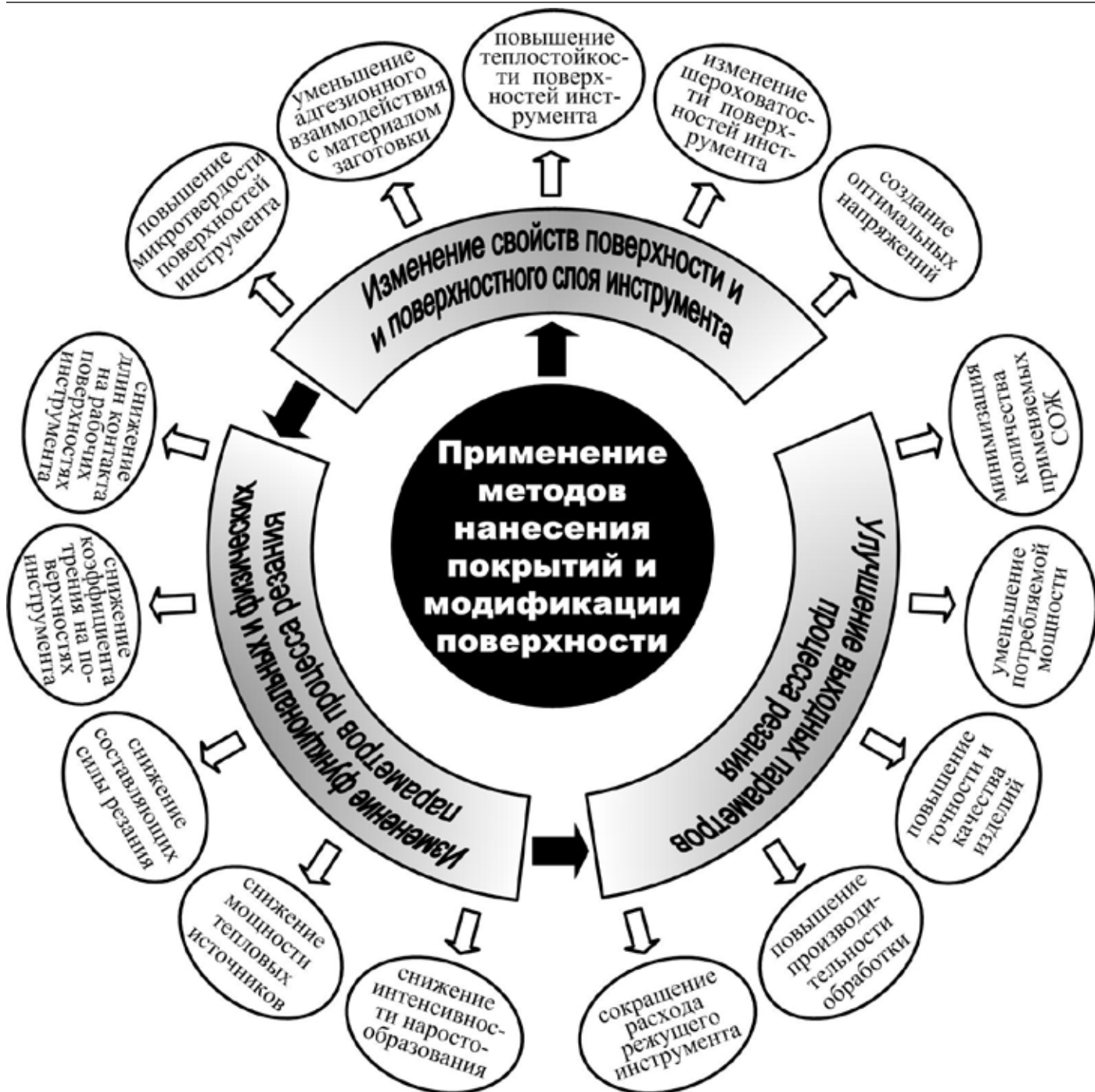


Рис. 1. Эффекты, достигаемые применением различных методов нанесения покрытий, и модификации рабочих поверхностей режущих инструментов

Широко применяемые в инструментальном производстве покрытия типа TiN, TiAlN, TiCrN и др., характеризуются высокими значениями твёрдости (до 35 ГПа) и низкими коэффициентами трения. Но в то же время эти покрытия характеризуются значительной хрупкостью, которая резко сужает область их рационального применения. Именно поэтому сегодня особый интерес во всем мире вызывают исследования, связанные с получением нанопокровтий с размерами зерен менее 100 нм, позволяющие реализовать в одном покрытии уникальный комплекс свойств. Впервые концепция наноматериалов была отчетливо сформулирована Г. Глейтером, который ввел в научный оборот термин

«нанокристаллические материалы», а затем «наноструктурные», «нанофазные», «нанокompозитные» и т.д. [2].

Практика показывает, что механическими свойствами наноматериалов можно варьировать в широких пределах путем изменения формы и структуры входящих в них наночастиц, а также структуры и свойств границ их раздела. У наноматериала с уменьшением размеров частиц наблюдается рост теплоемкости и, как следствие, внутренней энергии и энтропии системы. Это означает, что у поверхности при увеличении внутренней энергии и повышении твердости может увеличиваться пластичность вследствие роста энтро-

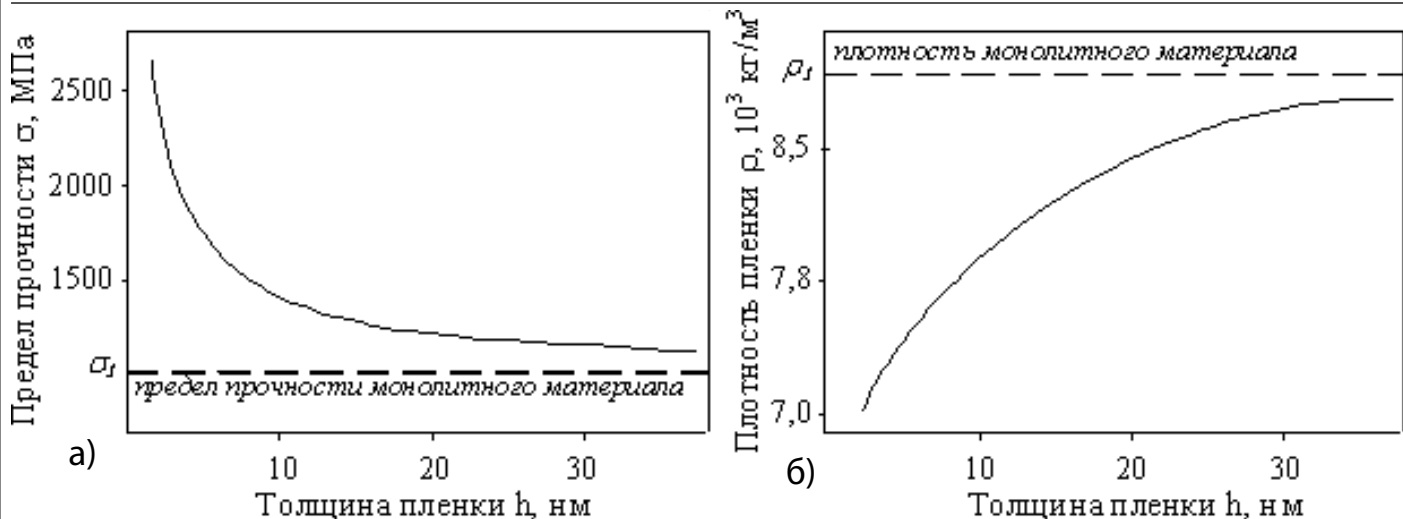


Рис. 2. Зависимости предела прочности σ (а) и плотности ρ (б) пленки от ее толщины h

пийного фактора, в то время как в обычных материалах с увеличением твердости возрастает хрупкость.

Все без исключения материалы в виде тонкой пленки имеют характеристики, значительно отличающиеся от объемного (монокристаллического) материала, причем, чем тоньше покрытие, тем сильнее отличаются его свойства [3]. На рис. 2, а показана тенденция изменения предела прочности материала от толщины пленки. Такая тенденция связана с тем, что в процессе формирования тонкая пленка сначала не сплошная, а состоит из отдельных островков, которые затем увеличиваются, сливаются друг с другом вплоть до образования сплошного слоя. При этом изменяется и плотность формируемой пленки (рис. 2, б).

За последние несколько лет работы в области создания наноматериалов получили значительное развитие. Было доказано, что роль поверхностей раздела между элементами структуры (нанозерна, нанокристаллиты, нанопазы и т.д.) наноматериала очень важна, но не всегда определяющая. Роль среднего размера элемента структуры наноматериала сегодня остается ключевой.

На рис. 3 представлена зависимость изменения микротвердости покрытия от среднего размера его зерна. Видно, что измельчение зеренной структуры материала покрытия сопровождается ростом твердости до некоторого критического среднего размера нанозерна (наноразмерный эффект). Снижение твердости при дальнейшем уменьшении среднего размера зерна в покрытии происходит из-за проскальзывания по межзеренным границам (ротационный эффект). В этом случае для дальнейшего повышения твердости требуется затормозить процесс скольжения по межзеренным границам. Такое торможение может быть достигнуто за счет формирования соответствующей наноструктуры с упрочнением межзеренных границ. Эта проблема может быть решена синтезом многофазной (нанокомпозитной) структуры, которая имеет наноразмерные поверхности раздела с высокой когезионной прочностью. Развитие исследований в указанном направлении в скором времени сделает возможным синтез ультратвердых покрытий нового поколения — имеющих твердость до 100 ГПа в сочетании с достаточно высокой трещиностойкостью.

Все существующие сегодня в нашей стране и за рубежом технологические приемы нанесения нанопокровов, которые могут быть использованы для нужд инструментального производства, можно условно разделить на три основные группы: осаждение покрытий в условиях ионного сопровождения; осаждение многослойных покрытий со слоями нанометрической толщины; осаждение многофазных покрытий; комбинация перечисленных способов.

Осаждение нанопокровов в условиях ионного сопровождения

Процессы физического осаждения покрытий в сопровождении ионным пучком (ионно-стимулированное осаждение), за рубежом получившие название «Ion beam assisted deposition», сегодня являются наиболее простым средством для формирования нанопокровов.

Ассистирование пучком при конденсации покрытия

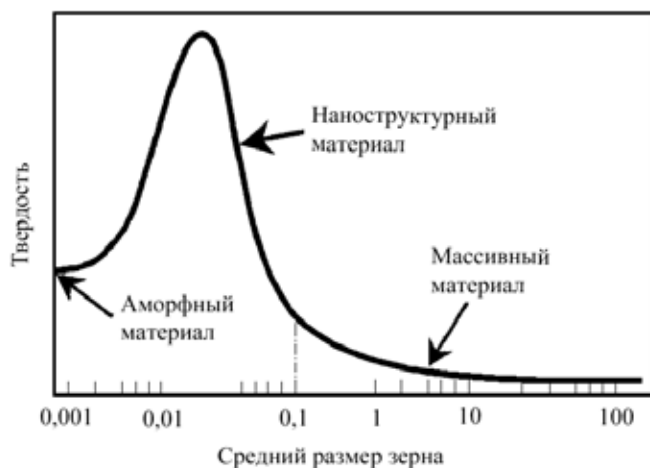


Рис. 3. Зависимость твердости материала от среднего размера зерна

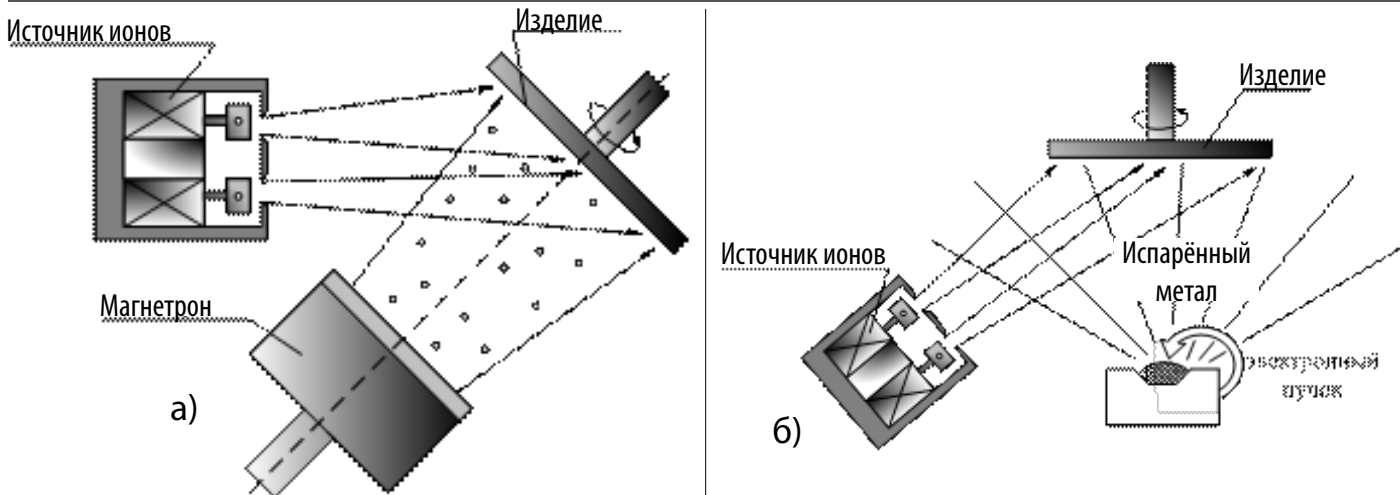


Рис. 4. Принципиальная схема осаждения покрытий магнетронным распылением (а) и электронно-лучевым испарением (б) в сопровождении ионного пучка

обеспечивает поддержание высокой подвижности поверхностных атомов. Ионная бомбардировка управляет механизмом роста конденсируемого покрытия при помощи энергии, поставляемой в плёнку ионами. Кинетическая энергия бомбардирующих ионов превращается в тепловую в очень малых объёмах, которые затем охлаждаются с крайне высокими скоростями. Ионная бомбардировка в процессе осаждения также увеличивает плотность центров зародышеобразования, подвижность атомов, уменьшает количество вакансий и пор, вводит тепловую энергию непосредственно в поверхностную зону, стимулируя реакции и диффузионные процессы. Это приводит к уменьшению размеров зёрен, способствует формированию нанокристаллических плёнок. Регулируя энергию и плотность потока бомбардирующих ионов, можно регулировать размеры и ориентацию зёрен и, как следствие, управлять микротвердостью, плотностью, стехиометрией и остаточными напряжениями в покрытиях.

Принципы, которые используются для осаждения

покрытий с ассистированием пучком, в основном заключаются в том, что на подложку из отдельных источников поступают металлический пар и ускоренные частицы. Схема осаждения покрытий магнетронным распылением в сопровождении ионного пучка представлена на рис. 4, а, а электронно-лучевым испарением — на рис. 4, б.

Плотность формируемого покрытия существенно зависит от плотности энергии, подводимой ионами на его поверхность. В качестве примера можно привести изменение плотности покрытий из свинца и магния при осаждении на подложку в вакууме ионов этих металлов. Плотность покрытия растёт с увеличением энергии ионов и достигает 100% плотности исходной мишени при энергии осаждаемых ионов свинца 72 эВ и при энергии осаждаемых ионов магния 48 эВ. С дальнейшим ростом энергии ионов плотности покрытий в обоих случаях снова снижаются и при энергиях 170 эВ составляют 35% от плотности исходной свинцовой мишени и всего 17% от плотности исходной магниевой

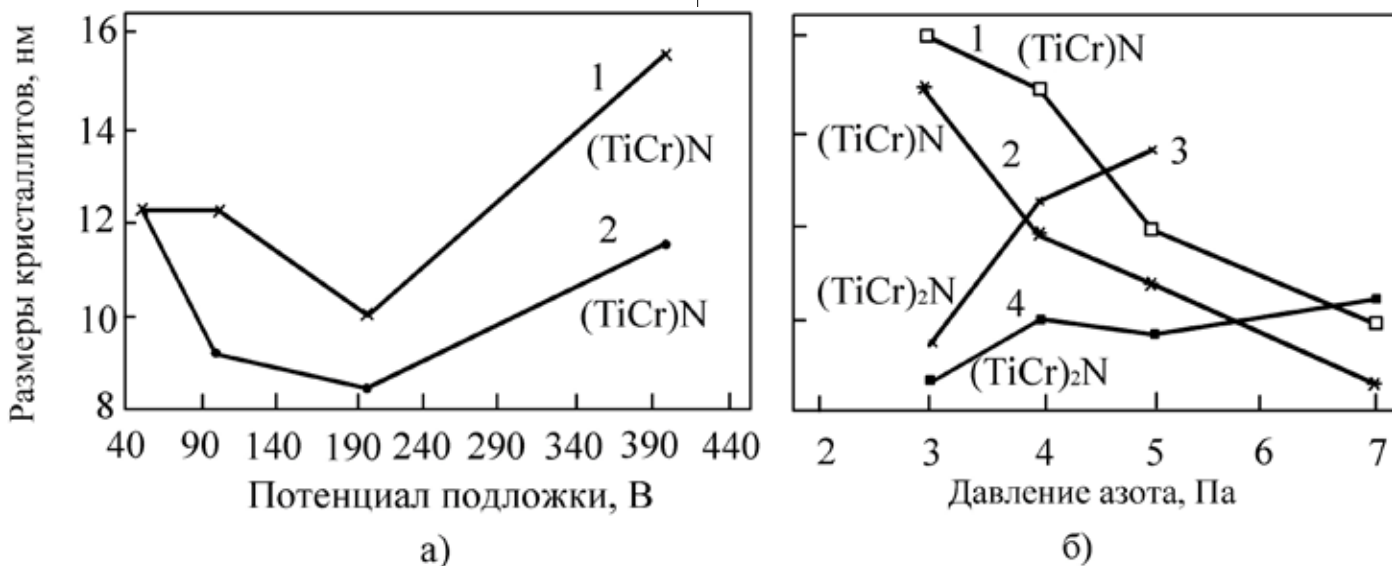


Рис. 5. Зависимости размеров кристаллитов от потенциала подложки (а) и давления азота (б) при осаждении покрытий на подложки из твёрдого сплава (1,3) и быстрорежущей стали (2,4)

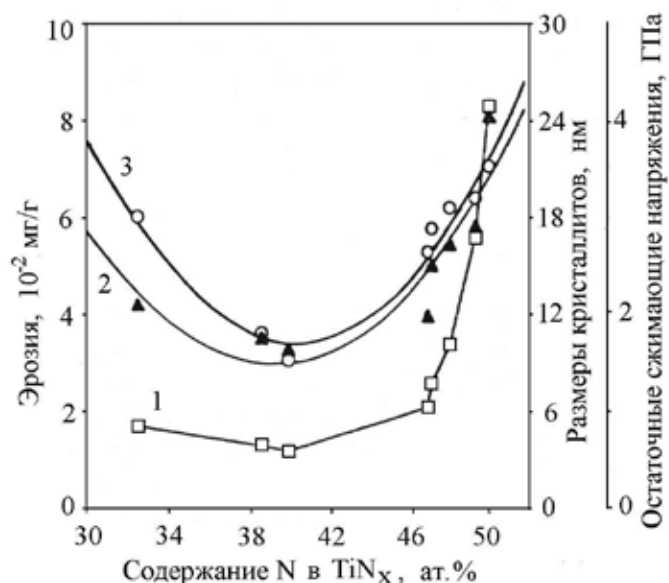


Рис. 6. Изменение эрозионного износа (1), остаточных напряжений (2) и размеров кристаллитов (3) в зависимости от содержания азота в покрытии TiNx

мишени [4].

Другим примером могут служить углеродные покрытия, получаемые прямым ионным осаждением — их твердость также зависит от энергии ионов. При осаждении моноэнергетических ионов C₂H₂⁺ она увеличивается с ростом энергии и при 92 эВ достигает максимального значения 61 ГПа, что составляет 60% твердости природного алмаза.

Данные, имеющиеся в литературе, свидетельствуют о том, что для получения заданной плотности и микротвердости покрытий необходима вполне определенная энергия ионов [4, 5]. Поэтому для точной регулировки параметров покрытия нужны источники моноэнергетических ионов. Изменяя плотность тока и энергию ионов, сопровождающих осаждение покрытия, можно не только регулировать микротвердость и плотность покрытия, но и модифицировать его структуру, стехиометрию, а также в широком диапазоне регулировать остаточные напряжения.

Что касается остаточных напряжений в осаждаемом покрытии, то их величина определяется удельной энергией, транспортируемой быстрыми частицами на поверхность подложки, приходящейся на один осаждаемый атом. В большинстве случаев при нулевой удельной энергии формируются напряжения растяжения. С увеличением энергии сначала напряжения растяжения уменьшаются до нуля, а затем начинается рост напряжений сжатия. Удельная энергия, при которой напряжения равны нулю, зависит от материала покрытия. Порядок ее величины составляет, например, для бора — 10 эВ/атом, а для хрома — 100 эВ/атом.

Примером влияния энергии ионов (определяемой потенциалом подложки) на размеры кристаллитов могут служить зависимости размеров кристаллитов (Ti, Cr) N от потенциала подложки при осаждении этих покрытий электродуговым способом (рис. 5, а). Видно, что мини-

мальные размеры кристаллитов находятся в пределах 8-10 нм при потенциале порядка 200 В (имеется в виду отрицательный потенциал, ускоряющий положительные ионы к подложке). При дальнейшем повышении потенциала размеры кристаллитов несколько увеличиваются за счёт повышения температуры в зоне конденсации. При этом размеры кристаллитов покрытия, осаждённого на подложку из твёрдого сплава, несколько больше, чем на подложку из быстрорежущей стали.

Другим фактором, оказывающим существенное влияние на размеры кристаллитов, является давление азота (рис. 5, б). Видно, что с увеличением давления азота до 7 Па размеры кристаллитов (TiCr) N уменьшаются с 16 до 9 нм, в то время как размеры кристаллитов (TiCr) 2N увеличиваются с 9 до 14 нм. При этом размеры кристаллитов и скорость их формирования на подложках из твёрдого сплава и быстрорежущей стали различны.

Влияние содержания азота на размеры кристаллитов в покрытиях из нитрида титана представлено на рис. 6. Видно, что их минимальные размеры (9 нм) достигаются при нестехиометричном составе TiNx (x = 38-40%). При минимальных размерах кристаллитов покрытие обладает минимальными остаточными напряжениями и максимальным сопротивлением эрозионному износу.

Таким образом, на размеры кристаллитов влияют не только энергия ионов, но и состав покрытия, материал и температура подложки, давление, а также целый ряд других факторов. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо оптимизировать процесс осаждения в зависимости от конкретных условий эксплуатации инструмента с покрытием.

Осаждение многослойных покрытий со слоями нанометрической толщины

Идея увеличения трещиностойкости твердых покрытий за счет создания многослойных композиций была выдвинута более пятнадцати лет назад. Она заключалась в создании многослойных покрытий типа TiN/NbN, TiN/VN, (TiAl) N/CrN и др. с чередующимися слоями металлов или соединений, обладающих различными внутренними напряжениями (модулями упругости) и близкими по величине коэффициентами термического расширения. Толщина отдельных слоёв должна быть настолько малой, чтобы внутри них не являлся источник дислокаций, а дислокации, которые под действием напряжений двигались бы к границе раздела из более мягкого слоя, отталкивались бы силами, создаваемыми упругими напряжениями в более твёрдом слое. Общее количество слоев покрытия выбирается в зависимости от решаемых технологических задач и в ряде случаев может достигать двухсот.

Эксперименты показывают, что микротвёрдость многослойных нанопокровов, содержащих соединения с микротвёрдостью ≥ 20 ГПа, увеличивается приблизительно в 2 раза, т.е. достигает значений

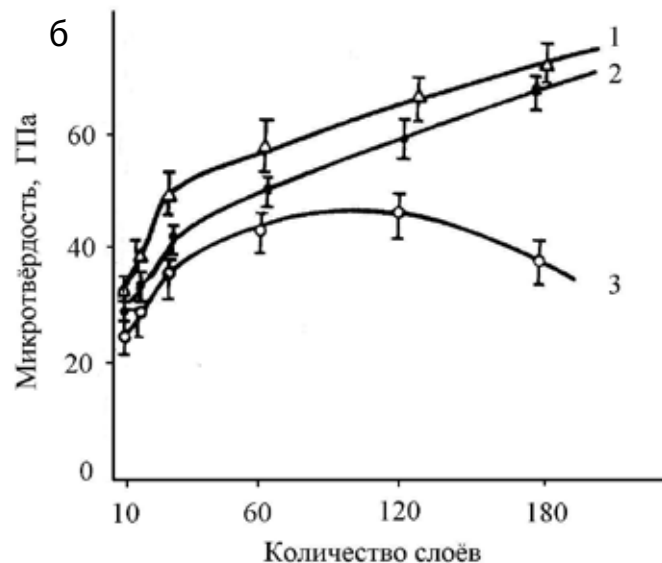
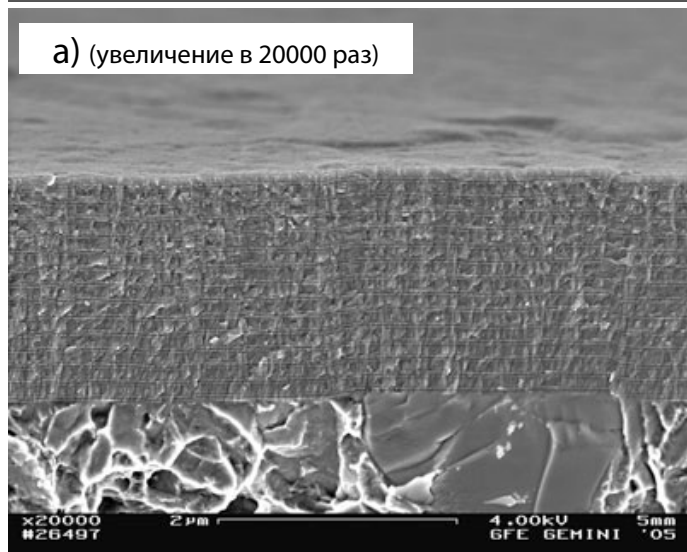


Рис. 7. Структура многослойного нанопокрyтия TiN-AlN (а) и зависимости микротвёрдости многослойных покрyтий TiN-NbN (1), TiN-ZrN (2) и TiN-CrN (3) от толщины их слоёв (при общей толщине плёнки — 2 мкм)

≥ 40 ГПа. Например, максимальная твердость, получаемая для покрытия TiN/NbN с толщиной отдельных слоев 4 нм, составляет 50 ГПа, а для TiN/VN — около 55 ГПа [6].

В качестве примера на рис. 7 представлена структура многослойного нанопокрyтия и приведены сведения о зависимостях микротвёрдости многослойных нанопокрyтий различного состава от количества слоёв, входящих в их состав (общая толщина покрyтий ~2 мкм). Видно, что покрyтия, состоящие из 60 слоёв при толщине каждого из слоев ~33 нм, имеют высокую микротвердость. Это связано с тем, что зёрна такого покрyтия не успевают коагулировать в процессе осаждения. С увеличением количества слоев покрyтия до 180 (т.е. с уменьшением толщины каждого из слоёв до 10 нм) размеры зёрен еще больше уменьшаются и микротвёрдость покрyтий TiN-NbN и TiN-ZrN достигает значений 70 ГПа. Хорошо известно, что микротвердость традиционных однослойных покрyтий на основе этих же соединений в зависимости от режимов их осаждения находится в пределах 20-30 ГПа. В то же время необходимо понимать, что отмеченная выше закономерность не является универсальной и применимой для всех химических соединений. Например, при увеличении количества слоев многослойного покрyтия TiN-CrN свыше 80 (уменьшении их толщины менее 25 нм) его твердость наоборот снижается.

Осаждение многофазных покрyтий

Комбинация двух или более нанокристаллических фаз в составе одного покрyтия обеспечивает сложную конфигурацию межзеренных границ, что приводит к повышению микротвердости. Такие покрyтия состоят из основной твёрдой нанокристаллической фазы, на границах зёрен которой располагается тонкий слой второй нанокристаллической или аморфной фазы,

препятствующий росту зёрен основной фазы. Другими словами, твёрдые зёрна первой фазы отделены друг от друга, покрyты тонкой сетью атомов другой фазы, сегрегированных на их поверхностях [7].

Структурные составляющие таких покрyтий должны удовлетворять целому ряду требований: иметь ограниченную смешиваемость в твердом состоянии, термодинамически обусловленную сегрегацию в ходе синтеза, определенное химическое сродство друг к другу для усиления межфазного взаимодействия на границах нанозерен.

В качестве удачных примеров можно привести покрyтия, синтезированные на основе систем TiN — TiB, (TiSiAl) N, TiN — Cu, ZrN — Cu, AlN — Cu, а также некоторые другие системы — на основе комбинаций металл-нитриды, карбид-бориды и др.

Например, при осаждении покрyтия TiN — Cu добавление меди в количестве 1,5 ат. % Cu обеспечивает формирование покрyтий с размерами зерен 22 нм (рис. 8) и приводит к увеличению микротвёрдости с 22 до 30 ГПа.

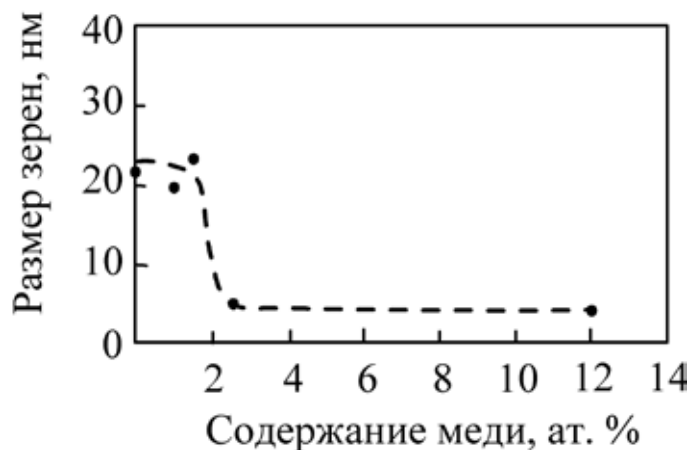


Рис. 8. Зависимость размеров зёрен покрyтия TiN/Cu от содержания меди

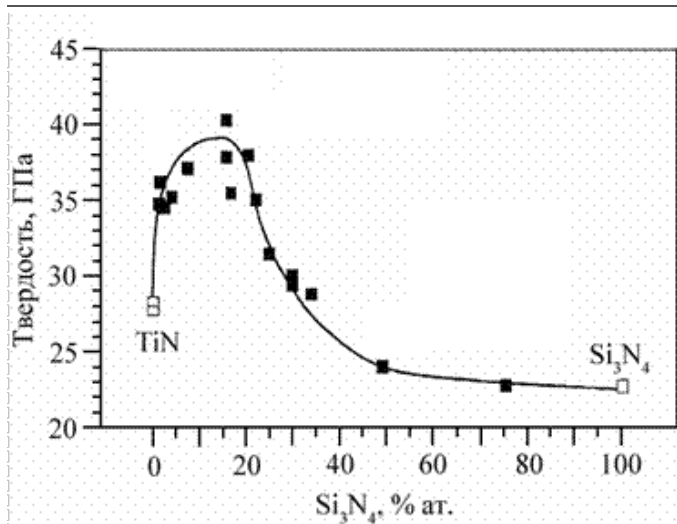


Рис. 9. Влияние концентрации нитрида кремния на твердость системы $\text{TiN}/\text{Si}_3\text{N}_4$

При этом покрытие обладает большей трещиностойкостью, чем чистый TiN . При дальнейшем увеличении содержания меди до ~ 2 ат. % и более, размеры зёрен снижаются примерно до 5 нм, но в то же время уменьшается микротвёрдость покрытия до 10-12 ГПа, а ориентация зёрен TiN и Cu становится хаотичной. При содержании меди около 12 ат. % уровень пластической деформации покрытия составляет 53% (почти как у чистой меди). Таким образом, присутствие атомов меди (~ 2 ат. %) на поверхности растущих зёрен TiN приводит к их измельчению, но в то же время увеличивает трещиностойкость и пластичность покрытий за счёт скольжения по границам зёрен.

Другим примером является покрытие ZrN/Cu , в котором максимальная микротвёрдость 54 ГПа и достаточно высокая трещиностойкость может быть достигнута введением 1,2 ат. % Cu . При этом размеры зёрен покрытия составляют около 35-38 нм. При увеличении содержания меди свыше 6 ат. % физико-механические характеристики покрытия значительно ухудшаются.

Еще одним вариантом формирования многофазных покрытий является случай, когда зерна нанокристаллической фазы внедрены в аморфную матрицу. Целый ряд твердых материалов может быть использован для создания таких композиций. На сегодняшний день одним из наиболее удачных примеров такой композиции является система $\text{TiN}/\text{Si}_3\text{N}_4$.

На рис. 9 приведена зависимость микротвердости многофазного покрытия $\text{TiN}/\text{Si}_3\text{N}_4$ от содержания в нем нитрида кремния. Структура покрытий, полученных без легирования, представляет собой поликристаллический нитрид титана со средним размером столбчатых зёрен несколько сотен нанометров в высоту и несколько десятков нанометров в диаметре. Введение даже небольших количеств нитрида кремния в процессе конденсации покрытия приводит к дополнительному измельчению структуры и резкому росту величины микро-

твердости. При содержании аморфной фазы нитрида кремния в материале покрытия в количестве 15...20 ат. % средний размер нанокристаллов TiN не превышает 7 нм. В то же время при увеличении концентрации аморфной фазы нитрида кремния среднее расстояние между нанозернами TiN становится достаточным для возникновения и развития трещин в аморфной матрице. При этом твердость покрытия с преобладанием аморфной фазы монотонно приближается к твердости нитрида кремния.

Таким образом, в настоящее время существует достаточное количество технологических приемов, обеспечивающих формирование нанопокровтий самого различного химического состава и обладающих повышенными физико-механическими свойствами, необходимыми для современных режущих инструментов. Однако практически все из рассмотренных выше подходов у нас в стране находятся еще на стадии лабораторных испытаний. В самом ближайшем будущем можно ожидать более масштабного производственного внедрения результатов, полученных в лабораториях. Применение нанопокровтий позволит не только повысить работоспособность инструментов из быстрорежущих сталей, твердых сплавов и керамики, но и существенно расширить область их применения. В первую очередь речь идет о тех операциях механической обработки, где возникают нагрузки, зачастую приводящие к разрушению обычных покрытий уже в самом начале работы инструмента — высокоскоростная обработка, точение и фрезерование заготовок из труднообрабатываемых материалов с большими толщинами среза и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента (учебник для студентов втузов) М.: Машиностроение, 2009. — 368 с.:ил.
2. H. Gleiter. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. // Acta mater. 2000, v. 48, pp. 1-29.
3. Панфилов Ю. В. Нанотехнология в инженерии поверхности // Справочник. Инженерный журнал. — 2007. — №8. — с. 14-24.
4. Григорьев С. Н., Метель А. С. Модификация поверхности тлеющим разрядом с электростатическим удержанием электронов. Учебное пособие. — М.: МГТУ «Станкин», «Янус-К», 2007. — 452 С.
5. Андреев А. А., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Технологические особенности получения композиционных наноструктурных покрытий вакуумно-плазменными методами // Технология машиностроения. — №7, 2005. — С. 47-52.
6. C. Ducros, V. Benevent, F. Savchette. Deposition, characterisation and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. // Surface and Coatings Technology. 2003, v. 163-164, pp. 681-688.
7. P. H. Mayrhofer, H. Willmann, C. Mitterer. Recrystallisation and grain growth of nanocomposite Ti-B-N coatings. // Thin Solid Films. 2003, v. 440, pp. 174-179.

Козин В. М., Марьин Б. Н., Марьин С. Б., Волков К. В., Попова Н. А., Грачева О. А., Одинокоев В. И., Евстигнеев А. И., Шпорт В. И.

05.16.05

V.M.Kozin, B.N.Maryin, S.B.Maryin, K.V.Volkov, A.N.Popova, O.A.Gracheva, V.I.Odinokov, A.I.Evstigneev, V.I.Shport

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ ПРИ ЕЕ ЗАМОРАЖИВАНИИ ДЛЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК EXPERIMENTAL STUDIES ON THE POSSIBILITY TO USE FROZEN WATER FOR BLANK DEFORMATION PROCESSES

Козин Виктор Михайлович — д. т. н., профессор, заведующий лабораторией МДТТ, ИМиМ ДВО РАН
Victor M. Kozin — Doctor in Engineering, Professor, Head of the Laboratory of Solid Body Deformation Mechanics at the Metal Science and Metallurgy Institute of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Марьин Сергей Борисович — к. т. н., доцент кафедры МТЛП, КНАГТУ. E-mail: ma-ryinsb@mail.ru
Sergey B. Maryin — PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Волков Константин Владимирович — зам. директора по производству, ОАО «Амурметалл»
Konstantin V. Volkov — Deputy Director for Production, JSC «AmurMetal»

Попова Нина Анатольевна — заведующая лабораторией вычислительного центра ФЭТМТ, КНАГТУ. E-mail: vhfiks@knasty.ru
Nina A. Popova — Head of Computing Centre Laboratory at the Department of Power engineering, transport and marine technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), vhfiks@knasty.ru.

Грачева Ольга Александровна — заведующая лабораторией МТЛП, КНАГТУ
Olga A. Gracheva — Head of Laboratory at the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Марьин Борис Николаевич — д. т. н., профессор кафедры МТЛП, КНАГТУ
Boris N. Maryin — Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Одинокоев Валерий Иванович — д. т. н., профессор, директор ИМиМ ДВО РАН
Valery I. Odinokov — Doctor in Engineering, Director of the Metal Science and Metallurgy Institute of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Евстигнеев Алексей Иванович — д. т. н., профессор, проректор по научной работе КНАГТУ
Alexey I. Evstigneev — Doctor in Engineering, Professor, Provost for Research at the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Шпорт Вячеслав Иванович — д. т. н., губернатор Хабаровского края
Vyacheslav I. Shport — Doctor in Engineering, Governor of Khabarovsk Region

Аннотация: Рассмотрены возможности деформирования трубных и листовых заготовок за счет энергии расширения льда.

Summary: The paper discusses the possibility of using the expansion energy of ice to deform tube and sheet blanks.

Ключевые слова: деформирование заготовок; рабочие тела; энергия расширения льда; замораживание воды; штамповая оснастка.

Keywords: blank deformation; working bodies; ice expanding energy; freezing of water; die tooling.

Важной проблемой в машиностроении является изготовление высокоресурсных, надежных трубопроводов, которые работают в условиях сложного нагружения. Они испытывают действия высоких давлений, пульсирующей нагрузки и гидравлических ударов, поэтому к ним предъявляются высокие требования по механическим свойствам материала, качеству внешней и внутренней

поверхностей, сохранению формы сечения, а также максимальному утонению стенок трубы.

Практика эксплуатации показывает, что наибольшее число разрушений трубопроводов связано с утонением их стенок в местах изгиба и перехода от одного диаметра к другому. Значительно снижают работоспособность трубопроводов такие факторы, как чрезмерная эллипсность и волнистость стенок, т. е. явления, сопровождающие процессы изготовления трубопроводов. Большое влияние на работоспособность трубопроводов оказывает качество зиговки тонкостенных труб, так как малейшие дефекты поверхности становятся концентраторами усталостных напряжений.

Детали из труб применяются во всех гидрогазовых системах летательных аппаратов, находят широкое применение в нефтяной, газовой, автомобильной промышленности и медицинской технике. Поэтому интенсификация технологических процессов формообразования деталей из тонкостенных трубных заготовок за счет увеличения степени деформации металла, достигаемой за одну операцию, совмещения операций, резкого сокращения сроков подготовки производства, трудозатрат и металлоемкости оснащения приобретает большое значение для всех формообразующих технологических процессов.

Перспективы использования и промышленного внедрения новых технологий связаны с применением современных труднодеформируемых материалов, титановых сплавов, а также с мобильностью, высокопроизводительностью, высокой культурой производства и с применением новых наполнителей труб.

Наполнители труб применяются для предотвращения потери устойчивости стенки трубы (гофрообразования) и отклонения от округлости (овальности) при ее гибке. Давление наполнителя, находящегося внутри трубы, должно уравнивать внутреннее напряжение в металле трубы, возникающее при гибке. В зависимости от марки материала, диаметра, толщины стенок и конфигурации труб при гибке в качестве наполнителя могут использоваться жидкостные, легкоплавкие и сыпучие материалы.

Жидкостные наполнители используются только для труб из сталей и алюминиевых сплавов диаметром до 27 мм [1]. К жидкостным наполнителям относится эмульсия, получаемая при смешивании эмульсола с водой. Эмульсолы в зависимости от концентрации компонентов могут быть разных марок (ГОСТ 1975-75).

Применяются эмульсии на основе эмульсолов марок Э — 1 (А), Э — 2 (Б), Э — 3 (В) по ГОСТ 1975-75 или масла АМГ — 10 по ГОСТ 6794-75. В связи с высокой стоимостью масла АМГ — 10 оно используется только при ремонте, при небольших партиях деталей, но не в серийном производстве.

В работе рассмотрены две задачи: возможность создания наполнителя, состоящего из воды и демпфирующих элементов, при замораживании которого его объемное расширение не приводило бы к формоизменению трубы до начала ее гибки, и возможность использования энергии расширения льда для формоизменения заготовок. С этой целью были проведены две серии экспериментов.

Для первой серии были использованы заготовки труб с техническими характеристиками:

- марка металла: Д16;
- внутренний диаметр 42 мм;
- наружный диаметр 45 мм;
- толщина стенки 1,5 мм;
- длина заготовки 420 мм.

Заготовка заполнялась наполнителями разных типов и затем заключалась в бандаж в подводном положении. Между бандажом и концами трубы устанавливались прокладки для устранения возможной течи наполнителя из-за негерметичности сборки. Конструкция экспериментальной установки показана на рис. 1 в разобранном, а на рис. 2 — в собранном виде. Экспериментальная установка помещалась в морозильную камеру с различной отрицательной температурой на 24 часа. Бандаж представлял собой две стальные пластины, соединенные между собой шпильками. Была проведена следующая серия экспериментов.

Серия экспериментов № 1

В опытах использовалась трубная заготовка длиной 220 мм, торцы которой глушились деревянными пробками (см. рис. 2). В качестве наполнителя использовалась вода. Температура изменялась в диапазоне -3.. -12°С. Никаких изменений с трубной заготовкой не происходило. Это можно объяснить тем, что расширение льда компенсировалось сжатием пробок и не подействовало на саму заготовку.

Серия экспериментов № 2

Длина заготовки составляла 420 мм, ее торцы трубы глушились стальными пластинами с прокладками из линолеума. В качестве наполнителя использовалась вода. Шаг промера диаметров составлял 50 мм. Результаты опытов представлены в таблице 1 и на рис. 3 и 4.

Таблица 1

№ диаметра	D ₀ , мм	Время охлаждения, час.	Температура, °С	Dx, мм
1	45	22:25	-15	45,2
2	45		-15	45,1
3	45		-15	45,1
4	45	4:00	-15	45,7
5*	45		-15	50,1; 57,7; 55,1; 52,2
6	45		-15	48,2
7	45	6:00	-27	45,4
8	45		-27	45,4
9	45		-27	45,4

* - в районе 5-го диаметра произошел разрыв заготовки длиной около 50 мм.

Серия экспериментов № 3

Длина трубы равнялась 420 мм, торцы также глушились стальными пластинами с прокладками из линолеума.

**Козин В. М., Марьин Б. Н., Марьин С. Б., Волков К. В., Попова Н. А., Грачева О. А., Одинокоев В. И.,
 Евстигнеев А. И., Шпорт В. И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ
 ПРИ ЕЕ ЗАМОРАЖИВАНИИ ДЛЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК**

ма. В качестве наполнителя использовались вода и древесные опилки 50%-ной концентрации. При заморозке заготовки в вышеописанном режиме ее деформаций не произошло.

Серия экспериментов № 4

Труба длиной 420мм, торцы которой глушились прокладками из линолеума. В качестве наполнителя использовалась вода и целлюлоза. Целлюлоза покрывала внутреннюю поверхность трубы слоем толщиной 0,6мм. Шаг промера диаметра равен 50мм. Результаты опыта представлены в таблице 2.

Между 4 и 5 промерами диаметров произошел разрыв (см. рис. 5 и рис. 6) длиной около 45мм, лёд выдавливался из торцов трубы. В месте разрыва диаметры эллипса составляли: 47,3; 55,5; 50; 50. В целом деформации заготовки оказались меньше, чем в эксперименте №2.

Таблица 2

№ диаметра	D ₀ , мм	D _x , мм
1	45	45
2	45	45,3
3	45	45,3
4	45	46,3
5	45	49,1
6	45	45,3
7	45	45,3
8	45	45

Серия экспериментов № 5

Использовалась труба длиной 420мм, торцы которой глушились стальными пластинами с прокладками из линолеума. В качестве наполнителя также использовались вода и слои бумаги толщиной 1,2мм, которыми покрывалась внутренняя поверхность трубы толщиной 1,2мм. Результаты опыта представлены в таблице 3.

Таблица 3

№ диаметра	D ₀ , мм.	D _x , мм.
1	45	45
2	45	45,3
3	45	45,4
4	45	46,3
5	45	49,1
6	45	45,6
7	45	45,2
8	45	45

Серия экспериментов № 6

Серия экспериментов проводилась с наполнителем в виде воды и органических включений в виде древесных опилок различной концентрации по отношению к внутреннему объему заготовки. Результаты экспери-

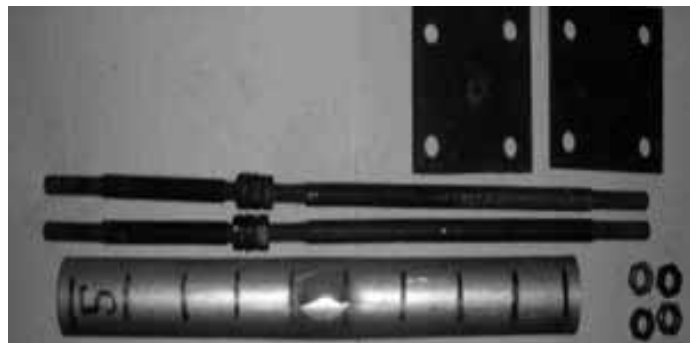


Рис. 1. Экспериментальная установка в разобранном виде (серии экспериментов № 1-6)



Рис. 2. Экспериментальная установка в собранном виде (серии экспериментов № 1-6)



Рис. 3. Деформации заготовки с использованием наполнителя в виде воды



Рис. 4. Характер разрушения заготовки

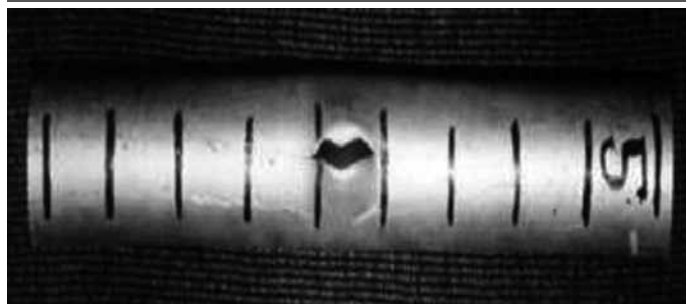


Рис. 5. Разрушение заготовки при проведении серии экспериментов №4

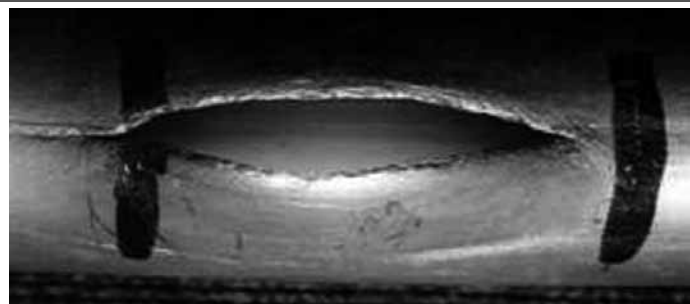


Рис. 6. Вид разрушения в области локализации деформаций

ментов представлены в таблице 4.

Таблица 4

№ опыта	Дата начала опыта	Дата завершения опыта	t, °C	d ₀ , мм	d _x , мм	Примечание
1	15.04.09 20-00	16.04.09 12-00	-19 -20	45	45	Опилек в наполнителе 50% от объема трубы. Деформации заготовки отсутствовали.
2	18.04.09 20-00	19.04.09 22-00	-19 -20	45	45	Концентрация опилок 40%. Деформации заготовки отсутствовали.
3	28.04.09 20-00	29.04.09 20-00	-19 -20	45	45	Концентрация опилок 40%. Деформации заготовки отсутствовали.
4	5.05.09 19-00	6.05.09 20-00	-19 -20	45	45	Концентрация опилок 40%. Деформации заготовки отсутствовали.
5	10.05.09 21-00	11.05.09 20-00	-19 -20	45	45	Концентрация опилок 40%. В середине трубы произошло равномерное вздутие. В этом месте диаметр заготовки увеличился на 0,7 мм.

Результаты данной серии экспериментов позволяют сделать вывод, что в качестве наполнителя при гибке труб можно использовать воду с органическими включениями определенной концентрации, что позволит исключить формоизменение заготовок до начала их гибки при замораживании такого наполнителя.

Серия экспериментов №7

В следующей серии экспериментов исследовалась возможность использования в качестве наполнителя в виде замораживаемого водного раствора поваренной соли (NaCl). В опытах использовались заготовки с техническими характеристиками:

— марка металла: Д16;

- внутренний диаметр 40 мм;
- наружный диаметр 42 мм;
- толщина стенки 2 мм;
- длина заготовки 480 мм.

Их результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5

№ опыта	дата начала опыта	дата завершения опыта	t, °C	d ₀ , мм	d _x , мм	Примечание
1	1.04.08 19:00	2.04.08 8:00	-14 -16	42	42	На 1 л воды приходилось 1000 г соли. Деформации заготовки отсутствовали. Лед не образовался.
2	5.04.08 19:00	6.04.08 8:00	-14 -16	42	42	На 1 л воды приходилось 500 гр соли. Деформации заготовки отсутствовали. Структура льда — рыхлая.
3	12.04.08 19:00	13.04.08 8:00	-14 -16	42	42	На 1 л воды приходилось 400 гр соли. Деформации заготовки отсутствовали. Структура льда — рыхлая.
4	14.04.08 19:00	15.04.08 8:00	-14 -16	42	42	На 1 л воды приходилось 250 гр соли. Деформации заготовки отсутствовали. Структура льда — рыхлая.
5	20.04.08 19:00	21.04.08 8:00	-14 -16	42	42	На 1 л воды приходилось 100 гр соли. Деформации заготовки отсутствовали. Агрегатное состояние наполнителя — твердое.

Козин В. М., Марьин Б. Н., Марьин С. Б., Волков К. В., Попова Н. А., Грачева О. А., Одинокоев В. И., Евстигнеев А. И., Шпорт В. И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ ПРИ ЕЕ ЗАМОРАЖИВАНИИ ДЛЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК

6	24.04.08 19:00	25.04.08 8:00	-14 -16	42	42	На 1 л воды приходилось 80гр соли. Деформации заготовки отсутствовали. Агрегатное состояние наполнителя- твердое. Деформации заготовки отсутствовали.
7	6.05.08 19:00	7.04.08 8:00	-14 -16	42	42	На 1 л воды приходилось 50гр соли. Деформации заготовки отсутствовали. Агрегатное состояние наполнителя- твердое. Наполнитель был выдавлен из-под уплотнений в процессе замораживания

Выполненные эксперименты показали, что исследованный наполнитель также можно использовать при гибке труб.

В работе также рассмотрена возможность использования для зиговки трубных заготовок природную энергию расширения льда при его охлаждении до определенной температуры, т.е. использовать лед в качестве рабочего тела. Например, вместо полиуретанового наполнителя можно использовать обычную воду при ее замораживании, т.к. при понижении температуры до -10 ... -20 °С в зависимости от солености лед максимально расширяется (см. табл. 6 и рис. 7). Таким образом, дармовую энергию расширения льда при его охлаждении можно использовать для деформирования заготовок, не пользуясь традиционными технологиями и приспособлениями, что позволит значительно снизить се-

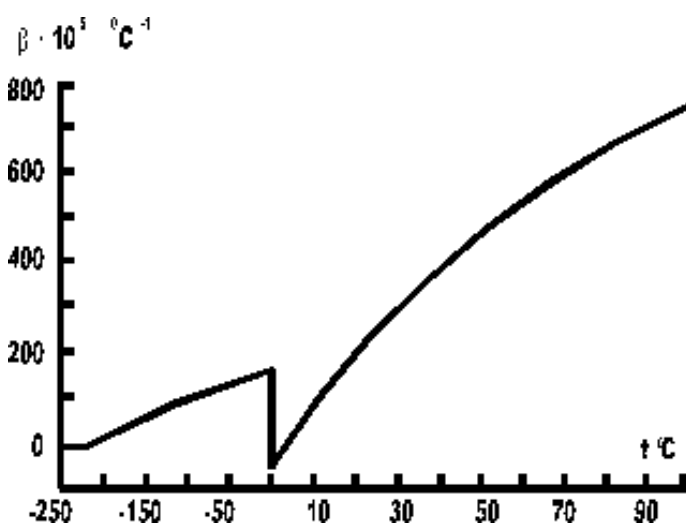


Рис. 7. Температурная зависимость коэффициента β технического расширения льда и жидкой воды (при атмосферном давлении)

бестоимость продукции.

Серия экспериментов № 8

Для проведения эксперимента использовались заготовки труб (рис. 8) с техническими характеристиками:

- марка металла: Д16;
- внутренний диаметр 25мм;
- наружный диаметр 28мм;
- толщина стенки 1,5мм;
- длина заготовки 100мм.
- параметры матрицы (см. рис. 9):
- ширина матрицы 82мм;
- длина матрицы 94мм;
- толщина матрицы 34мм;
- диаметр ручейка матрицы 36,75мм.

Температура замерзания морской воды t в зависимости от хлорности Cl_p и солености ξ_p

Cl_p %0	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	15,00	20,00
ξ_p %0	0,00	5,42	10,84	16,26	21,68	27,10	36,13
$t, ^\circ C$	-0,014	-0,298	-0,584	-0,878	-1,172	-1,781	-2,098

Хлорность Cl_p и соленость ξ_p рассола в зависимости от температуры t

$t, ^\circ C$	0,0	-2,0	-8,0	-15,0	-20,0	-23,0
Cl_p %0	0,00	20,41	70,60	107,88	129,11	143,51
ξ_p %0	0,00	36,68	124,31	177,34	211,43	232,48

Основные свойства морского льда как функция его хлорности, солености и температуры

$t, ^\circ C$	$\frac{Cl_{p \min}}{\xi_{p \min}} \%$							
	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	15,00
	0,00	3,38	6,76	10,14	13,52	16,90	20,23	25,35
Коэффициент объемного расширения морского льда ($10^{-3} / ^\circ C$)								
-0,2	916,73							
-2,0	917,00	4,31	-8,56	-12,36	-18,83	-23,78	-30,59	-37,91
-8,0	917,92	0,00	-0,22	-0,51	-0,72	-0,92	-1,14	-1,47
-15,0	918,97	0,14	0,06	0,05	0,00	-0,09	-0,23	-0,39
-23,0	920,19	1,08	1,63	2,17	2,79	3,39	4,29	5,66

После помещения заготовки в матрицу (рис. 9) последняя зажималась при помощи специального бандаж. Для концентрации деформаций заготовки в области ручья матрицы на концы заготовки одевались шайбы (см. рис. 10).

Собранная конструкция погружалась в воду, после чего в подводном положении торцы заготовки заглушались бандажом с полиэтиленовыми прокладками (см. рис. 11) с целью устранения возможной утечки наполнителя из-за недостаточной герметичности сборки конструкции.

Экспериментальная установка помещалась в морозильную камеру с температурой -19 ... -20°С на различ-

ные периоды времени.

Серия экспериментов №9

В качестве наполнителя использовалась водопроводная вода. Результаты опытов приведены в таблице 6.

Таблица 6

№ опыта	Дата начала опыта	Дата завершения опыта	t, °C	d ₀	d _x	Примечание
1	29.03.08 21.50	31.03.08 9.40	-19 -20	28	Не определен	С торца заготовки образовался продольный разрыв (см. рис. 12). Для следующего опыта использовались шайбы (см. рис. 10)
2	14.04.08 22.40	15.04.08 15.10	-19 -20	28	28	Никаких изменений с заготовкой не произошло (см. рис. 13)
3	21.04.08 21.00	23.04.08 20.30	-19 -20	28	31.6	Равномерное увеличение диаметра на 3,6 мм без повреждений (см. рис. 14)
4	24.04.08 21.20	26.04.08 15.15	-19 -20	28	31.25	Равномерное увеличение диаметра на 3,25 мм без повреждений
5	26.04.08 22.00	28.04.08 10.40	-19 -20	31.25	33.8	Заготовка повторно замораживалась. На заготовке возник продольный разрыв на месте зига (см. рис. 15)
6	5.03.08 19.00	6.03.08 21.00	-19 -20	28	28	Никаких изменений на заготовке
7	6.03.08 22.00	8.03.08 15.00	-19 -20	28	30.5	Неравномерное увеличение диаметра на 2,5 мм
8	13.03.08 21.00	15.03.08 18.00	-19 -20	30.5	34	Продольный разрыв на месте зига (см. рис. 16)

Серия экспериментов №10

В качестве наполнителя использовалась как чистая вода, так и вода с демпфирующими добавками. В серии опытов №6 добавкой служила целлюлоза в виде древесных опилок, а в серии опытов №7 — битый лед. Результаты экспериментов представлены в таблице 7.

Таблица 7

№ опыта	Дата начала опыта	Дата завершения опыта	t, °C	d ₀ , мм	d _x , мм	Примечание
6.1	30.03.08 23.00	1.04.08 18.00	-19 -20	28	31	Образовался равномерный небольшой зиг, увеличение в диаметре на 3мм



Рис. 8. Заготовки использованные в серии экспериментов №8

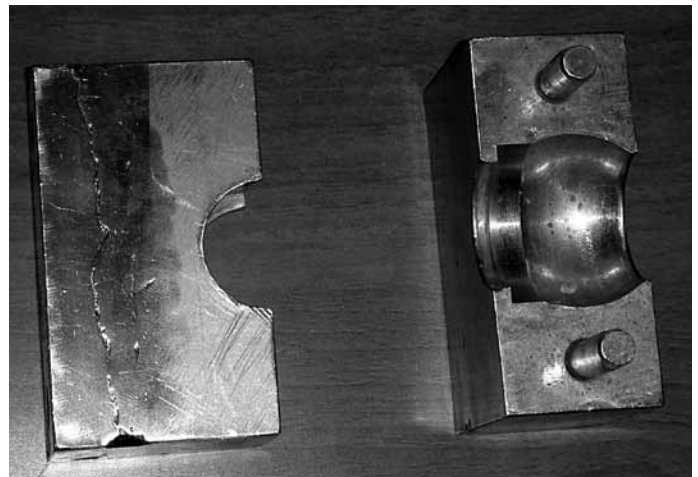


Рис. 9. Матрица в разобранном виде

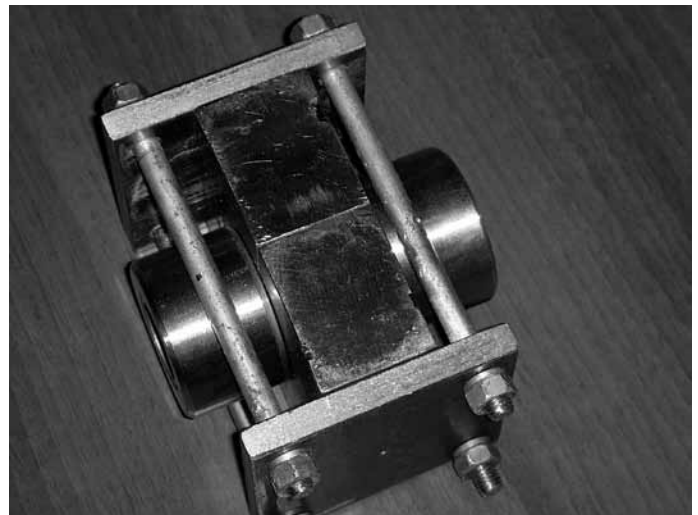


Рис. 10. Установка на концы заготовки торцевых шайб

Козин В. М., Марьин Б. Н., Марьин С. Б., Волков К. В., Попова Н. А., Грачева О. А., Одинокоев В. И., Евстигнеев А. И., Шпорт В. И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ ПРИ ЕЕ ЗАМОРАЖИВАНИИ ДЛЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК

6.2	1.04.08 20.00	3.04.08 21.00	-19 -20	31	31	Добавлен слой газеты размера 245x100 мм. На заготовке не наблюдалось никаких изменений
6.3	10.04.08 19.00	12.04.08 21.00	-19 -20	31	34	Добавлен слой газеты 145x100 мм. Разрыв стенки трубы, гораздо меньше, чем без использования газеты (см. рис. 17)
7.1	17.04.08 20.00	19.04.08 20.00	-19 -20	28	31.8	Равномерный зиг, увеличение в диаметре на 3,8 мм
7.2	19.04.08 21.30	21.04.08 22.00	-19 -20	31.8	34.5	Наполнителем служил битый лед с водой. На заготовке также произошел продольный (см. рис. 18) разрыв, но гораздо меньший по размерам (см. рис. 18)

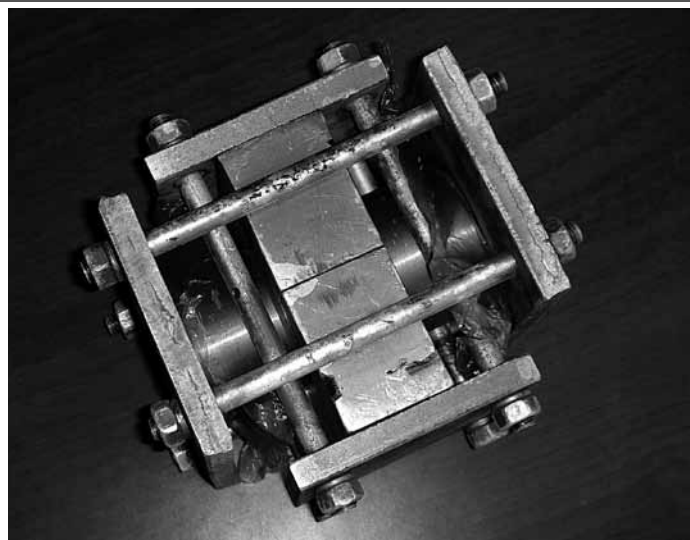


Рис. 11. Собранная конструкция для экспериментальных исследований

Выполненные эксперименты по исследованию возможностей использования льда в качестве рабочего тела при зиговке трубных заготовок показали только возможность такого нетрадиционного применения льда. Результаты этой серии опытов говорят о необходимости дальнейших, более глубоких исследований в этом направлении. Для разработки реальной технологии следует изучить влияние температурных и временных режимов, химического состава льда, наличия и концентрации демпфирующих добавок, цикличности (неоднократности) нагружения заготовок и др. на закономерности их деформирования.

В работе также были выполнены эксперименты по исследованию возможностей использования энергии расширения льда при его охлаждении для формирования листовых заготовок.

Эта технология также относится к энерго- и ресурсосберегающим, т.к. для ее осуществления не требуются больших затрат электроэнергии, дорогостоящего оборудования и сложной оснастки, поскольку для выполнения технологического процесса может быть использована дармовая (природная) энергия расширения льда за счет использования естественных низких температур. С помощью этой технологии относительно просто можно изготавливать детали самых разнообразных форм и размеров. Такой метод обработки металлов давлением наиболее успешно может применяться в регионах с холодным климатом.

В работе также предлагается технология деформирования листовых заготовок, основанная на свойстве льда увеличивать свой объем при охлаждении после заморзания воды.

Для реализации этого направления ниже приведены схемы разработанных штампов, которые можно использовать при выполнении различных технологических операций.



Рис. 12. Деформация заготовки при отсутствии шайб



Рис. 13. Вид заготовки после установки шайб



Рис. 14. Деформация заготовки без повреждений



Рис. 15. Разрыв заготовки в опыте № 5



Рис. 16. Разрыв заготовки в опыте № 8

Вытяжка листовой заготовки

На рис. 19 показан штамп, который состоит из крышки штампа 1 с рабочей полостью и основания 2. В основании имеется полость для установки сменной матрицы 3. В крышке штампа также установлен штуцер 5 с клапаном, через который в рабочую полость поступает рабочая среда (вода 9). Для удаления воздуха из рабочей полости предусмотрен управляемый клапан 10. С целью герметизации рабочей полости на торцевой части крышки выполнена кольцевая проточка с уложенным в неё резиновым кольцом 6. Крышка штампа также обеспечивает прижим края заготовки, что препятствует образованию гофра.

Принцип действия:

В основание 2 устанавливается матрица 3. Поверхность матрицы смазывается. Сверху помещается листовая заготовка 4. Затем на матрице 3 крепится крышка штампа 1 с заранее установленным объёмом рабочей полости. В рабочую полость через штуцер 5 под давлением подаётся рабочая среда. Воздух из рабочей полости удаляется через управляемый клапан 10. Собранный и наполненный водой штамп помещается в морозильную камеру или в холодную среду. При фазовом переходе воды в твёрдое состояние (лёд 8) объём твёрдой фазы увеличивается, за счёт чего происходит деформация листовой заготовки в деталь 7.

Отбортовка отверстий в листовой заготовке

На рис. 20 изображен штамп, который состоит из крышки штампа 4 с рабочей полостью и основания 5. В основании имеется полость для установки сменной матрицы 6. В крышке штампа также установлен штуцер 7 с клапаном, через который в рабочую полость поступает рабочая среда (вода 3). Для удаления воздуха из рабочей полости установлен управляемый клапан 8. Для герметизации рабочей полости на торцевой части крышки предусмотрена кольцевая проточка с уложенным в неё резиновым кольцом 9. Крышка штампа также обеспечивает прижим края заготовки, что препятствует образованию гофров.

Принцип действия:

Листовая заготовка 1 помещается в штамп с крышкой 4 и основанием 5. В предварительно просеченное отверстие устанавливается стальной шарик 2. Затем рабочая полость штампа заполняется рабочей средой (водой). Рабочая среда охлаждается и образующийся при этом лёд 10 продавлиывает стальной шарик через отверстие в заготовке, производя отбортовку.

Раздача тонкостенной трубной заготовки.

Штамп для раздачи тонкостенных трубных заготовок состоит из цилиндрического корпуса 1 с крышками 5 и 7, разъёмной матрицы 2 (см. рис. 21).

Технология реализации решения заключается в следующем:

В цилиндрический корпус штампа 1 устанавливается разъёмная матрица 2 с трубной заготовкой 4. Трубная



Рис. 17. Разрыв заготовки в опыте № 6



Рис. 18. Разрыв заготовки в опыте № 7.2

заготовка заполняется водой 3. Затем штамп закрывается крышками 5 и 7 (см. рис. 21). Собранный штамп помещается в морозильную камеру. При замерзании объём воды начнёт увеличиваться и образующийся лёд 6 деформирует трубную заготовку в готовое изделие 8.

Для исследования возможностей рассмотренной технологии, т.е. использования энергии расширения льда при его охлаждении с целью формоизменения листовых заготовок, была изготовлена технологическая оснастка, показанная на рис. 22, которую можно использовать при изготовлении деталей различных форм и размеров.

Работоспособность нового подхода продемонстрирована на рис. 23, где представлен результат деформирования листовой заготовки с помощью предложенной технологии.

Кроме разработанных конструкций штампов для деформирования заготовок с помощью льда ниже приве-

дены способы для их осуществления, разработанные и защищенные патентами РФ на изобретения авторами статьи.

1. СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГНУТЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК. Патент RU № 2308341. Оpubл. 20.10.2007. Бюл. № 29.

Изобретение относится к области обработки металлов давлением и может быть использовано при изготовлении тонкостенных гнутых трубопроводов. Заготовку соосно располагают в трубе диаметром больше диаметра заготовки, зазор между стенками заготовки и трубы и заготовку заполняют водой и после этого заготовку и трубу с наполнителями замораживают.

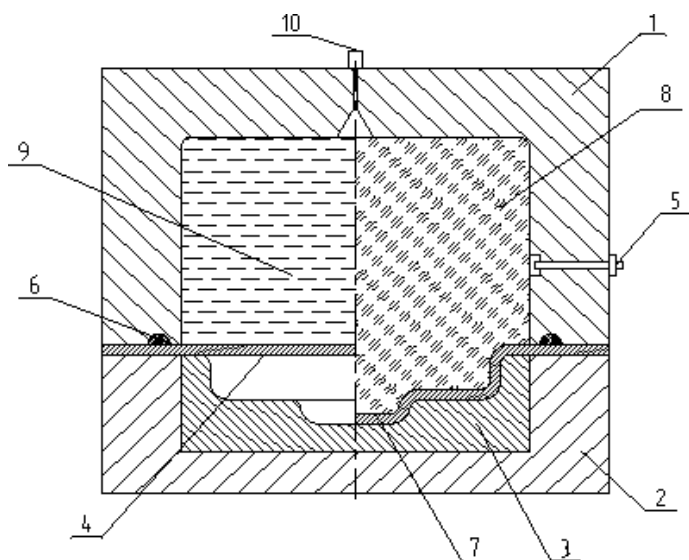


Рис. 19. Штамп для деформирования льдом листовой заготовки

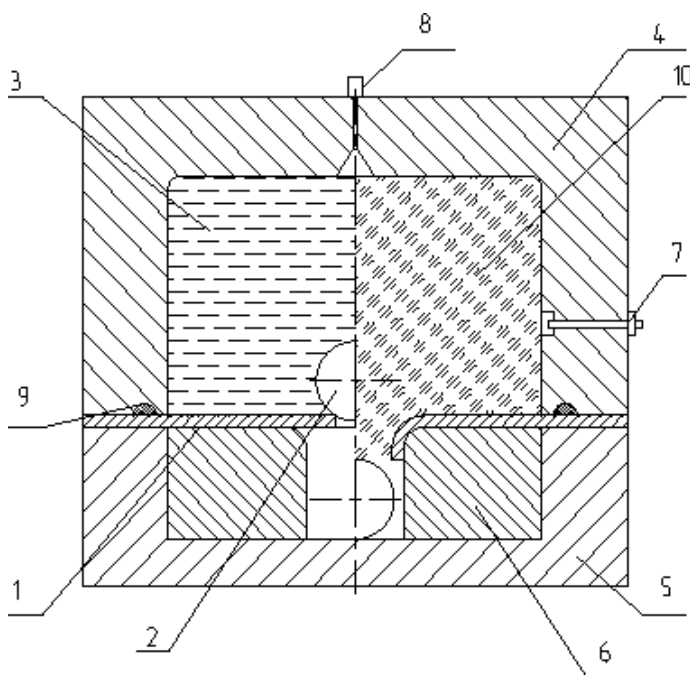


Рис. 20. Штамп для отбортовки отверстий в листовой заготовке

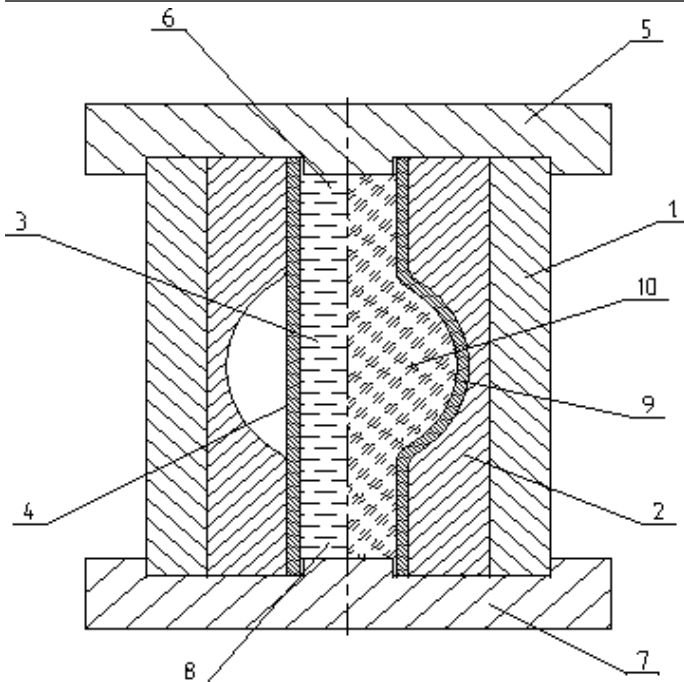


Рис. 21. Штмп для раздачи тонкостенной трубной заготовки

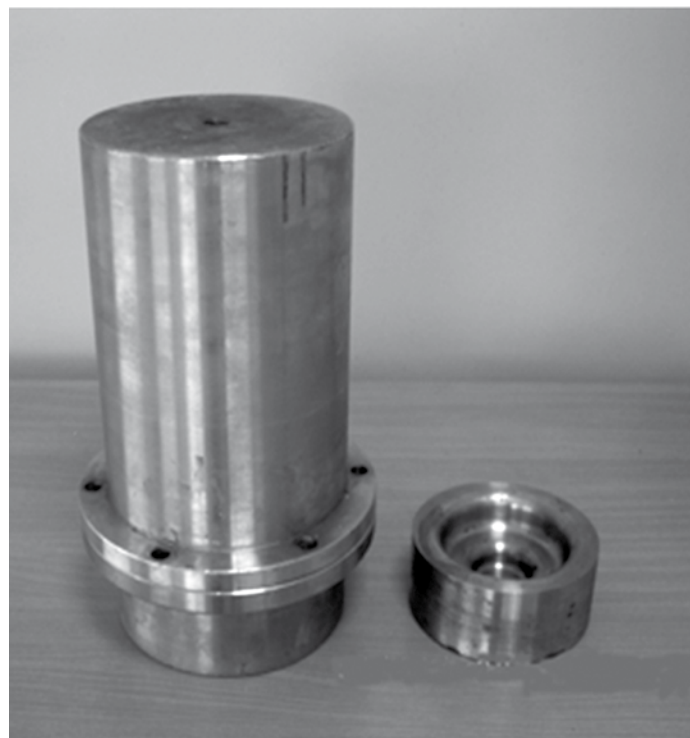


Рис. 22. Технологическая оснастка для деформирования листовых заготовок льдом

Осуществляют совместную гибку трубы и заготовки с их наполнителями. При этом трубу выполняют из материала и конструктивно из условия обеспечения ее жесткости в радиальном направлении и податливости в осевом направлении, достаточных для предотвращения гофрообразований и овальности при заданной температуре заморозки. Повышаются качество и эффективность.

2. СПОСОБ ГИБКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ. Патент RU №2308342. Оpubл. 20.10.2007. Бюл. №29.

Изобретение относится к области обработки металлов давлением и может быть использовано при изготовлении тонкостенных гнутых трубопроводов. Предварительно в наполнитель, содержащий воду, вносят древесные опилки в пропорции к воде, обеспечивающей увеличение объема наполнителя вследствие его замораживания до необходимой температуры и достижения им необходимой прочности на сжатие без формоизменения трубы до начала ее гибки. Затем замораживают заготовку с наполнителем. Гибку осуществляют в трубогибном устройстве. Повышаются качество и эффективность.

3. СПОСОБ КАЛИБРОВКИ И ЗИГОВКИ КОНЦОВ ТРУБ РАЗДАЧЕЙ.

Заявка на изобретение RU №2006112165. Оpubл. 10.11.2007. Бюл. №31.

Способ калибровки и зиговки концов труб раздачей с помощью жесткой матрицы и пуансона, выполненного из деформируемого материала, отличающийся тем, что в качестве материала используют воду, которой заполняют трубу, а затем ее замораживают до температуры, при которой объемное расширение образующегося при этом льда вызовет в стенках трубы в местах калибровки и зиговки напряжения выше предела текучести материала трубы.

4. СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГНУТЫХ ТРУБНЫХ

ЗАГОТОВОК. Патент RU №2324560. Оpubл. 20.05.2008. Бюл. №31.

Изобретение относится к области обработки металлов давлением, в частности к трубогибному производству. Трубную заготовку заполняют жидкостным наполнителем, состоящим из воды и смешанного с ней эмульсола, и подвергают гибке в трубогибных устройствах. После гибки трубную заготовку с наполнителем заключают в разъемную жесткую матрицу, геометрические параметры ручья которой соответствуют окончательной форме заготовки. Затем их охлаждают до отрицательной температуры, при которой объемное расширение образовавшегося в наполнителе льда вызовет в стенках заготовки сжимающие напряжения выше предела текучести материала заготовки. Далее заготовку отжигают для снятия остаточных напряжений. Повышается эффективность.

5. СПОСОБ ГИБКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ С НАПОЛНИТЕЛЕМ. Патент RU №2337779. Оpubл. 10.11.2008. Бюл. №31.

Изобретение относится к обработке металлов давлением, в частности к трубогибному производству, и может быть использовано в различных отраслях промышленности при изготовлении гнутых трубопроводов. Трубу с наполнителем, содержащим воду, замораживают и деформируют трубогибным устройством. В наполнитель вводят растворимую в воде соль, концентрацию которой выбирают из условия обеспечения после заморозки наполнителя его физико-механическими параметрами необходимых прочностных характеристик наполнителя. При этом температуру заморозки наполнителя выбирают из условия исключения формоизменения тонкостенной трубы при обеспечении равенства нулю коэффици-

**Козин В. М., Марьин Б. Н., Марьин С. Б., Волков К. В., Попова Н. А., Грачева О. А., Одинокоев В. И.,
Евстигнеев А. И., Шпорт В. И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ
ПРИ ЕЕ ЗАМОРАЖИВАНИИ ДЛЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК**

ента объемного расширения наполнителя в зависимости от концентрации соли. Повышается эффективность.

6. СПОСОБ ГИБКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ.

Патент RU №2322320. Оpubл. 20.04.2008. Бюл. №11.

Изобретение относится к области обработки металлов давлением и может быть использовано при изготовлении тонкостенных гнутых трубопроводов. Перед гибкой в трубе размещают шланг из эластичного материала с наполнителем. Наполнитель содержит воду и кристаллообразующие компоненты, в качестве которых используют растворимые в воде соли. Используют шланг, наружный диаметр которого меньше внутреннего диаметра трубы. Шланг устанавливают с зазором внутри трубы и заполняют его наполнителем. Зазор между стенками шланга и трубы, температуру охлаждения наполнителя и концентрацию соли выбирают из условия обеспечения плотного соприкосновения поверхностей шланга и трубы без формоизменения трубы до начала ее гибки при увеличении объема наполнителя вследствие его замораживания, толщину стенки шланга и теплопроводные свойства его материала выбирают из условия обеспечения теплоизоляции между наполнителем и трубой, исключающей таяние льда наполнителя вследствие повышения температуры при ее гибке, и повреждения внутренней поверхности трубы вследствие разрушения льда наполнителя. Повышаются качество и эффективность гибки.

7. СПОСОБ ГИБКИ ТРУБ С НАПОЛНИТЕЛЕМ. Патент RU №2339477. Оpubл. 27.11.2008. Бюл. №33.

Способ гибки труб с наполнителем, включающий вертикальную установку трубы с заглушенной пробкой ее нижнего торца, заполнение ее через верхний торец наполнителем, одним из компонентов которого является вода, замораживание его и гибку трубогибочным устройством, отличающийся тем, что используют тонкостенный шланг в виде ячеистой конструкции, который после заполнения трубы водой погружают в нее, при этом упомянутый шланг выполняют из легкодеформируемого материала, внешний диаметр которого выбирают из условия обеспечения плотного, но свободного его захода в трубу, а длину — равной длине трубы с установленными внутри него на расстоянии друг от друга проникаемыми для воды и воздуха поперечными диафрагмами, выполненными из легкодеформируемого материала, расстояние между которыми и их толщину выбирают в зависимости от относительного радиусагиба трубы.

8. СПОСОБ ГИБКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ. Патент RU №2349406. Оpubл. 20.03.2009. Бюл. №8.

Изобретение относится к обработке металлов давлением, в частности к трубогибному производству, и может быть использовано в различных отраслях промышленности при изготовлении гнутых трубопроводов. Тонкостенную трубу заполняют наполнителем, в качестве которого используют поролон, пропитанный водой. Пористость и температуру заморозки поролона выбирают из условия обеспечения увеличения его объема после его заморозки и достижения максимальной его прочности на сжатие при отсутствии формоизменения трубы до начала ее гибки. Затем осуществляют заморозку и деформирование трубы трубогибочным устройством.



Рис. 23. Опытный образец, изготовленный по разработанной технологии

Повышается качество гибки.

Выполненная работа показала целесообразность проведения новых экспериментально-теоретических исследований в разработке энерго- и ресурсосберегающих технологий в области машиностроения при формоизменении заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марьин, Б.Н. Газовые системы летательных аппаратов/Б.Н. Марьин. — Владивосток: Дальнаука, 2001. — 447 с.
2. Гляциологический словарь/под ред. В.М. Котлякова. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 528 с.
3. Способ изготовления гнутых трубных заготовок. Патент РФ №2308341 С1/Козин В.М., Одинокоев В.И., Тимашев С.А., опубл. 20.10.2007 Бюл. №29.
4. Способ гибки тонкостенных труб. Патент РФ №2308342 С1/Козин В.М., Одинокоев В.И., Марьин Б.Н., опубл. 20.10.2007 Бюл. №29.
5. Способ калибровки и зиговки концов труб раздечей. Заявка на изобретение RU 2006112165 А/Козин В.М., Одинокоев В.И., Тимашев С.А., опубл. 10.11.2007 Бюл. №31.
6. Способ изготовления гнутых трубных заготовок. Патент РФ №2324560 С2/Козин В.М., Одинокоев В.И., Тимашев С.А., опубл. 20.05.2008 Бюл. №31.
7. Способ гибки тонкостенных труб с наполнителем. Патент РФ №2337779 С2/Козин В.М., Одинокоев В.И., Марьин Б.Н. и др., опубл. 10.11.2008 Бюл. №31.
8. Способ гибки тонкостенных труб. Патент РФ №2322320 С2/Козин В.М., Одинокоев В.И., Марьин Б.Н., опубл. 20.04.2008 Бюл. №11.
9. Способ гибки труб с наполнителем. Патент РФ №2339477 С2/Козин В.М., Одинокоев В.И., Марьин Б.Н. и др., опубл. 27.11.2008 Бюл. №33.
10. Способ гибки тонкостенных труб. Патент РФ №2349406 С2/Козин В.М., Верещагин В.Ю., Грисяк А.А., опубл. 20.03.2009 Бюл. №8.

Муравьев В. И., Ким В. А., Дмитриев Э. А., Фролов А. В., Соколов Д. А.
V.I.Muraviev, V.A.Kim, E.A.Dmitriev, A.V.Frolov, D.A.Sokolov

05.16.01

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ON USING THE METHOD OF ACOUSTIC EMISSION FOR ESTIMATION OF STRUCTURAL CHANGES OCCURRING DURING THE PROCESS OF HEAT TREATMENT OF CONSTRUCTION MATERIALS

Муравьев Василий Илларионович — д. т. н., проф., профессор кафедры «Технология сварочного производства» ГОУВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» («КНАГТУ»). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Vassily I. Muravyev — Doctor in Engineering, Professor of the Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: ktsp@knastu.ru.

Ким Владимир Алексеевич — д. т. н., проф., зав. кафедрой «Материаловедение и техно-логия новых материалов» ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Vladimir A. Kim — Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: kmtnm@knastu.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич — к. т. н., доц., директор Института компьютерного

проектирования машиностроительного технологического оборудования ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: msf@knastu.ru.

Eduard A. Dmitriev — PhD in Engineering, Associate Professor, Director of the Institute for Computer-aided Design of Mechanical Engineering Technologies and Equipment/machines, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: msf@knastu.ru.

Соколов Дмитрий Александрович — аспирант ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: ktsp@knastu.ru.

Dmitry A. Sokolov — PhD Candidate. E-mail: ktsp@knastu.ru.

Фролов Алексей Валерьевич — к. т. н., доцент кафедры «Промышленная электроника» ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: ktsp@knastu.ru.

Alexey V. Frolov — PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Industrial Electronics,, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: ktsp@knastu.ru.

Аннотация: Представлены результаты исследования влияния аустенитного превращения в стали 30ХГСА на параметры акустической эмиссии, сопровождающей процесс нагрева материала под закалку. Определены параметры акустической эмиссии, представляющие наибольшую информацию об аустенитном фазовом превращении.

Summary: The paper presents the results of research on the impact of the 30XGSA steel austenite transformation upon the acoustic emission parameters during hardening heat of material. Acoustic emission parameters are determined, that provide the most extensive data on the austenite phase transformation.

Ключевые слова: Акустическая эмиссия, аустенитное превращение, термическая обработка, 30ХГСА.

Keywords: acoustic emission, austenite transformation, heat treatment, 30XGSA.

Введение

Как известно, в основе классической теории термической обработки сталей лежит определение положения критических точек образования и распада аустенита. Положение этих точек определяется набором таких факторов, как химический состав стали, скорость нагрева или охлаждения и др. Традиционные режимы термической обработки сталей используют усреднённые или взятые «с запасом» данные о положении критических точек при «классическом» наборе таких параметров, как скорость нагрева, охлаждения, а также температур нагрева и изотермических выдержек. Данный подход отличается хорошей практической применимостью, широко используется и обеспечи-

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

вают удовлетворительные результаты. Но указанный подход является серьёзным препятствием на пути повышения эффективности технологий термической обработки сталей и сплавов. Так, например, известно [1], что изменения химического состава материала одной марки, наблюдаемого в разных плавках (или даже в пределах одной плавки), не противоречащих ГОСТ, могут изменять положение критических точек Ac_1 , Ac_3 , Ar_1 , Ar_3 , Mn и $M_{\text{фк}}$ до 10 % (а иногда и более). В связи с чем нагрев таких материалов под закалку по «классической» технологии (до взятой «с запасом» завышенной температуры и с обеспечением завышенной выдержки) фактически приводит к укрупнению аустенитного зерна, а иногда даже и к пережогу, что не позволяет получить комплекс потенциально возможных эксплуатационных характеристик изделия. То же самое относится и к режимам охлаждения. Кроме химического состава на положение критических точек оказывает влияние скорость нагрева и охлаждения, причём увеличение скорости нагрева даже относительно «простых» сталей (ст. 20, 45, У8) от 0,1 до 1000 К/с увеличивает температуры точек Ac_1 и Ac_3 до 150 °С [2]. То есть использование «классических» данных о температурах прямого аустенитного превращения для перспективных методов индукционного нагрева и иных методов, связанных с высокоскоростным нагревом, может привести к недогреву заготовок. Всё вышеизложенное относится также и к температурам нагрева под закалку.

Более того, в настоящее время усилия ряда исследователей направлены на разработку технологий термической обработки, использующих эффекты фазовых превращений и предпревращений (сверхпластичность титановых сплавов [3], изотермическая закалка в области бейнитного предпревращения режущего инструмента из быстрорежущих сталей [4] и др.), позволяющих в значительной степени комплексно улучшить эксплуатационные характеристики (прочность, твёрдость, вязкость разрушения, ресурс) готовых изделий. Но эффекты предпревращений проявляются тем больше, чем больше приближается температура изделия к критическим точкам материала. Поэтому успех таких технологий в значительной степени определяется точностью определения критических точек для используемого режима термической обработки.

Для определения критических точек фазовых превращений применяются dilatометрический, структурный, магнитометрический и другие методы. Но указанные методы обладают рядом недостатков. Так, магнитометрический способ не может применяться для температур выше точки Кюри и характеризуется низкой точностью при температурах, близких к точке Кюри. Структурный метод характеризуется высокой трудоёмкостью и не позволяет исследовать кинетику процессов фазовых превращений. Dilatометрический метод не позволяет исследовать процессы фазовых превращений при высоких скоростях нагрева и охлаждения и т.д. В связи с чем заслуживает внимания метод исследования, основанный на анализе сигналов акустической эмиссии (АЭ), сопровождающих процессы фазовых переходов

[5], позволяющий исследовать кинетику указанных процессов в реальном времени, по всему объёму образца с высокой чувствительностью.

Таким образом, точное и оперативное определение критических точек фазовых превращений в сталях каждой плавки для каждого режима термической обработки является ключевой задачей на пути повышения эффективности традиционных технологий и разработки перспективных режимов термической обработки сплавов, а метод АЭ может служить перспективным инструментом решения обозначенной проблемы. Поэтому в связи с высоким научно-практическим интересом авторами начаты исследования влияния фазовых превращений во время термической обработки сталей на параметры сигналов АЭ.

Методика эксперимента

Исследования проводились на образцах из стали 30ХГСА со следующим химическим составом: С = 0,32 %; Si = 1,1 %; Mn = 0,95 %; Ni = 0,08 %; Cr = 0,95 %. Значения критических точек (в соответствии с [6]): $Ac_1 = 760$ °С; $Ac_3 = 830$ °С; $Ar_1 = 670$ °С; $Ar_3 = 705$ °С; $Mn = 352$ °С.

Критические точки Ac_1 и Ac_3 определялись с помощью dilatометра NETZSCH DIL402PC. Исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром 7 мм и длиной 20 мм. Критические точки определялись для скорости нагрева 10 К/мин.

Исследования АЭ во время фазовых превращений проводились на прямоугольных образцах размерами 2 x 15 x 500 мм. Нагрев образцов производился в печи SNOL-6,7/1300, предварительно разогретой до температуры нагрева под закалку 920 °С, а также до более высоких температур (110 °С, 1200 °С) — для увеличения скорости нагрева. Образцы загружались в нагретую печь через асбестовые уплотнители на глубину 200 мм. Ширина асбестовых уплотнителей — 40 мм. Охлаждение образцов производилось в технической воде (спокойной) с температурой 18 °С.

Для исследования АЭ на холодном конце образцов закреплялся широкополосный преобразователь акустической эмиссии GT-301 (Global test) с полосой пропускания 50...500 кГц. Для улучшения акустического контакта поверхность образцов под датчиком смазывалась техническим вазелином. Сигнал с датчика АЭ усиливался усилителем с коэффициентом усиления $K_{\text{д}} = 500$ и входным сопротивлением $R = 100$ кОм; фильтровался фильтр высоких частот с граничной частотой $f_{\text{д}} = 10$ 20 кГц и единичным коэффициентом усиления в полосе пропускания; преобразовывался 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации $f_{\text{д}} = 10$ МГц и записывался на персональный компьютер. Обработка информации проводилась после завершения эксперимента. В ходе обработки АЭ информации рассчитывались следующие параметры каждого сигнала акустической эмиссии:

- время регистрации (от начала эксперимента), t , с;
- амплитуда $U_{\text{м}}$, В;
- длительность τ , с;

— энергия

$$E_i = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{K_u^2} \cdot \int_0^i U^2(t) dt = \frac{1}{R \cdot K_u^2} \cdot \sum_{k=1}^{i \cdot f_d} U_k^2 \cdot \frac{1}{f_d}, \text{ Дж};$$

— спектральная плотность АЭ сигналов $F(f)$ (с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье);

— относительная спектральная плотность АЭ сигналов

$$F'(f) = \frac{F(f)}{\sum_{i=0}^{\frac{n}{2}} F\left(\frac{i}{N_o \cdot f_d}\right)} \cdot 100\%$$

(где N_o — количество отсчётов в АЭ импульсе).

Кроме того, определялись следующие параметры АЭ:

— суммарная энергия — сумма энергий сигналов, зарегистрированных от начала эксперимента

$$E_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n E_i \text{ (где } n \text{ — количество АЭ сигналов, зарегистрированных за время } t \text{ от начала эксперимента), Дж};$$

— суммарный счёт — сумма АЭ сигналов, зарегистрированных от начала эксперимента, посчитанная нарастающим итогом $N_{\Sigma}(t) = n$;

— активность АЭ — скорость излучения АЭ сигналов

$$N'(t) = \frac{dN_{\Sigma}(t)}{dt}, \text{ с}^{-1};$$

— мощность АЭ — интенсивность излучения АЭ

$$P(t) = \frac{dE_{\Sigma}(t)}{dt}, \text{ Вт.}$$

Для измерения температуры образца на его горячем конце зачеканивался горячий спай термопары типа «К» (CrNi — NiAl). Сигнал с термопары усиливался дифференциальным усилителем постоянного тока с коэффициентом усиления 25, преобразовывался 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем и записывался на персональный компьютер. Запись значений температуры синхронизировалась с записью АЭ сигналов.

Для исключения акустических помех от окалина во время нагрева с образцов после охлаждения окалина удалялась.

Процессы фазовых переходов в зоне асбестовых уплотнителей (температура в которой изменяется от 60 °С до 920 °С) не учитывались по следующим причинам. Объём указанной области составляет не более 20 % от объёма загруженной в печь части образца. Так как аустенитное превращение происходит в интервале температур 760...830 °С, то для фазовых переходов необходим нагрев до температуры не менее 760 °С. Учитывая это и экспоненциальный характер распределения температуры по длине рассматриваемой зоны, реально фазовые превращения могут происходить на расстоянии не более 2 мм от внутренней поверхности печи (что соответствует объёму не более 1 % по сравнению с объёмом загруженной в печь части образца). Приближённо считая, что процессы фазовых превращений про-

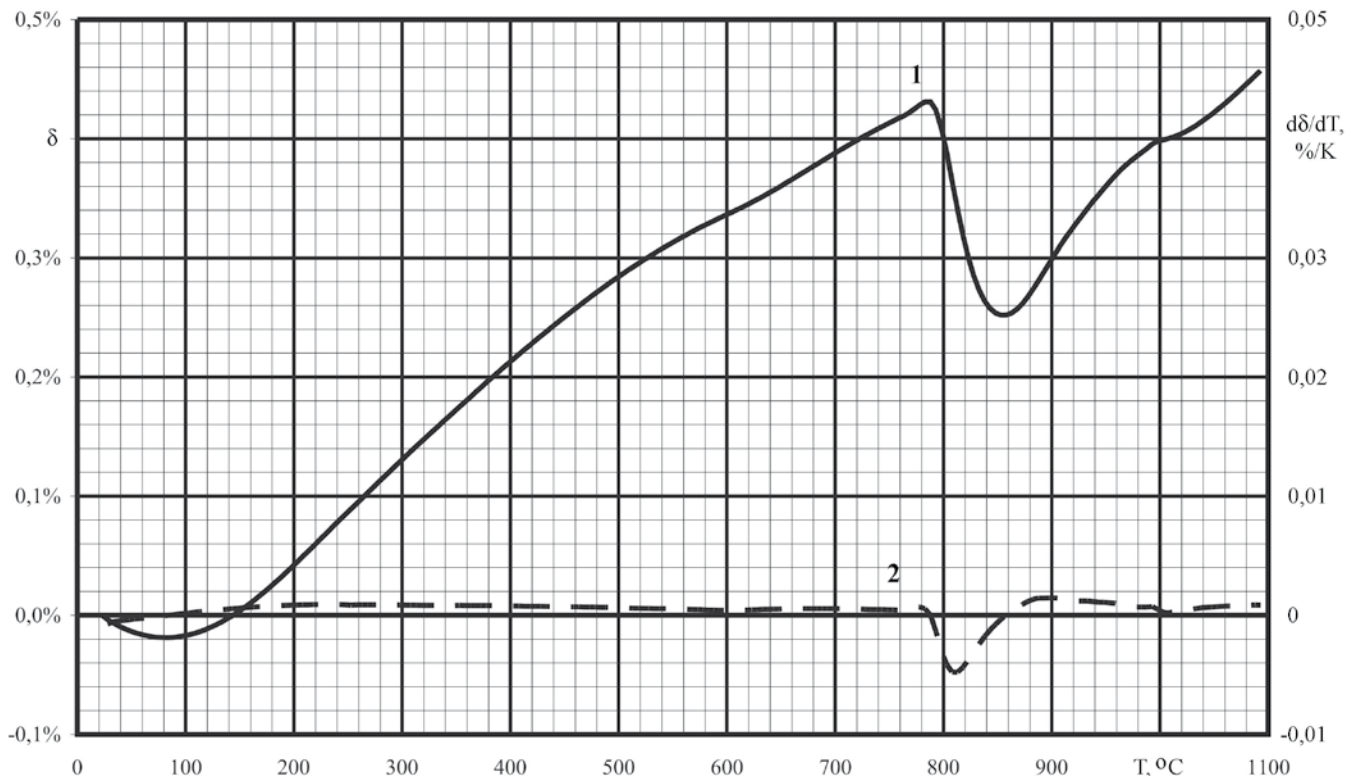


Рис. 1. Диаграммы относительного удлинения (1) и первой производной относительного удлинения по температуре (2) отожжённого образца из стали 30XГСА во время его нагрева со скоростью 0,17 К/с



Рис. 2. Диаграмма нагрева образцов из стали 30ХГСА

текают по объёму материала равномерно, акустическая эмиссия от фазовых превращений в переходной области образца также составляет не более 1% от «полезной» АЭ и поэтому в расчётах не учитывается. Кроме того, процессы фазовых переходов в указанной области при нагреве приводят лишь к малозначительному смещению во времени (в сторону запаздывания) момента окончания АЭ, а на качественные характеристики АЭ влияния не оказывают.

В работе исследовались следующие режимы термической обработки:

- нагрев отожжённого образца с 20 °С до 920 °С со средней скоростью порядка 6 К/с и выдержкой при температуре 920 °С в течение 3 мин.;
- закалка в воде с 920 °С;
- нагрев закалённого образца с 20 до 650 ... 880°С со средней скоростью порядка 50 К/с;
- повторная закалка в воде.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Дилатометрические кривые, полученные при нагреве образцов из стали 30ХГСА, представлены на рисунке 1.

Из дилатометрических кривых видно, что интервал аустенитного превращения располагается в температурном интервале 786 ... 857 °С.

Диаграмма нагрева образцов во время исследования акустической эмиссии, представлена на рисунке 2.

Из диаграммы нагрева видно, что в области темпе-

ратур аустенитного превращения скорость нагрева изменяется от 3,7 К/с до 1,6 К/с и в среднем составляет порядка 2 К/с. Учитывая результаты [2], получаем, что при исследуемых скоростях нагрева температуры точек Ас1 и Ас3 увеличиваются не более чем на 10 °С относительно дилатометрических данных, то есть примерно равны: Ас1 = 796 °С, Ас3 = 867 °С.

На рисунках 3-7 представлены традиционно используемые параметры АЭ.

Как видно из представленных диаграмм, интервал аустенитного превращения практически не проявляется на диаграммах «классических» параметров АЭ. На диаграммах АЭ энергии и мощности АЭ (рисунки 3, 5) вблизи точки Ас1 (при температуре порядка 890 °С) наблюдается генерация АЭ сигналов с несколько повышенной энергией и мощностью, а вблизи точки Ас3 (при температуре порядка 850°С) наблюдается излучение акустической эмиссии с минимальной мощностью. Но АЭ сигналы с аналогичными характеристиками регистрируются не только во время аустенитного превращения, но и в другие моменты времени, что не позволяет использовать их для определения критических точек прямого аустенитного превращения.

В процессе поиска наиболее информативных параметров акустической эмиссии, дающих возможность исследования фазовых превращений, авторами было выдвинуто предположение о том, что спектральная характеристика АЭ сигналов должна зависеть от раз-

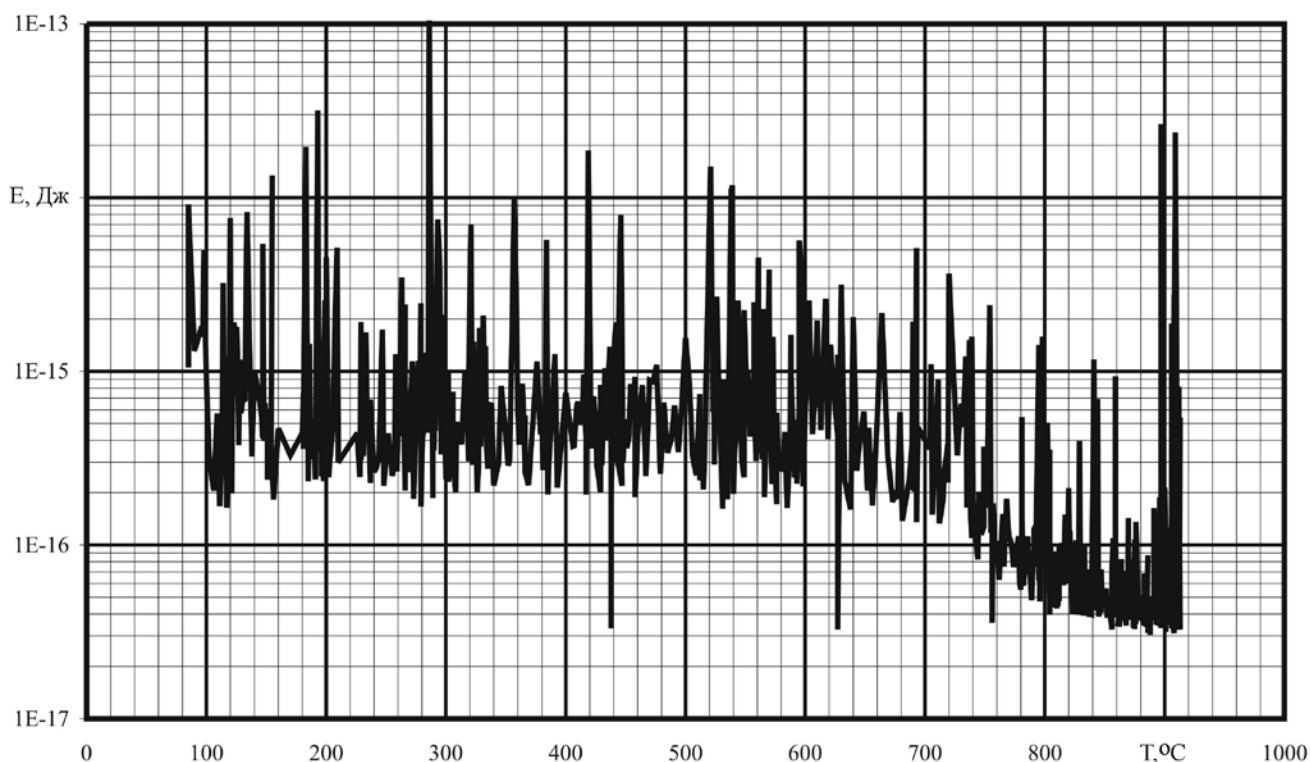


Рис. 3. Диаграмма энергии АЭ сигналов во время нагрева образцов

меров, объёмов, массы и подвижности источников АЭ: на микроуровне — от размеров, химического и структурного составов зёрен и структуры соединений между зёрнами (карбидов и др.), а на наноуровне — от типа кристаллической решётки. То есть увеличение массы, размеров и подвижности АЭ источников должно приводить к снижению частоты генерируемого АЭ сигнала.

Для проверки описанной гипотезы в рамках данной работы был произведён анализ относительной спектральной плотности АЭ сигналов во время нагрева образца из стали 30ХГСА. Выбор относительной спектральной плотности в качестве анализируемого параметра вместо абсолютной спектральной плотности связан с тем, что энергия излучаемых АЭ сигналов отличается на три порядка (см. рисунок 3), что затрудняет совместный анализ АЭ сигналов с большой и малой энергиями. Результаты спектрального анализа АЭ сигналов представлены на рисунке 8. Из рисунка 8 видно, что у первых 460 АЭ импульсов локальные максимумы спектральной плотности располагаются вблизи частот 100 кГц и 470 кГц, а глобальный максимум — вблизи частоты 230 кГц. У АЭ импульсов после 500-го сигнала спектр смещён в более низкочастотную область — в спектре практически отсутствуют гармоники с частотами более 330 кГц, а основная энергия сигнала распределена в диапазоне частот 50 ... 250 кГц с локальным максимумом вблизи частоты 200 кГц и глобальным максимумом вблизи частоты 100 кГц. АЭ сигналы №461-499 имеют «переходный» спектр.

Важно, что АЭ сигнал №500 был зарегистрирован

при температуре 800 °С (см. рисунок 6), то есть практически совпадает с точкой Ас1, соответствующей переходу О. Ц. К. кристаллической решётки в Г. Ц. К. решётку. Но на диаграмме относительной спектральной плотности процесс растворения карбидов не идентифицируется и точка Ас³ не определяется. Обнаруженный эффект очевидно вызван аустенитным превращением, а АЭ сигналы с «переходным» спектром (регистрируемые при температурах 760 ... 800 °С вызваны началом аустенитного превращения в локальных микрообъёмах с повышенной температурой и концентрацией легирующих элементов, соответствующей более низким значениям Ас1. Относительно постоянные спектры АЭ сигналов до аустенитного превращения и после дают основание предполагать о том, что спектральная характеристика АЭ сигналов в значительной степени определяется типом кристаллической решётки.

Интересно, что на обнаруженный эффект скорость нагрева не влияет — исследованы скорости нагрева в диапазоне от 6 до 50 К/с. Необходимо отметить, что спектр сигналов, излучаемых во время нагрева закалённого образца, отличается от спектра сигналов, излучаемых при нагреве отожжённого образца, но изменение спектра сигналов при переходе через точку Ас1 в обоих случаях аналогично. Таким образом, метод АЭ может быть использован для определения точки начала аустенитного превращения при нагреве.

Но описанный анализ ранее перечисленных параметров АЭ сигналов при исследовании процесса закалки пока не позволяет детерминировать мартенситное

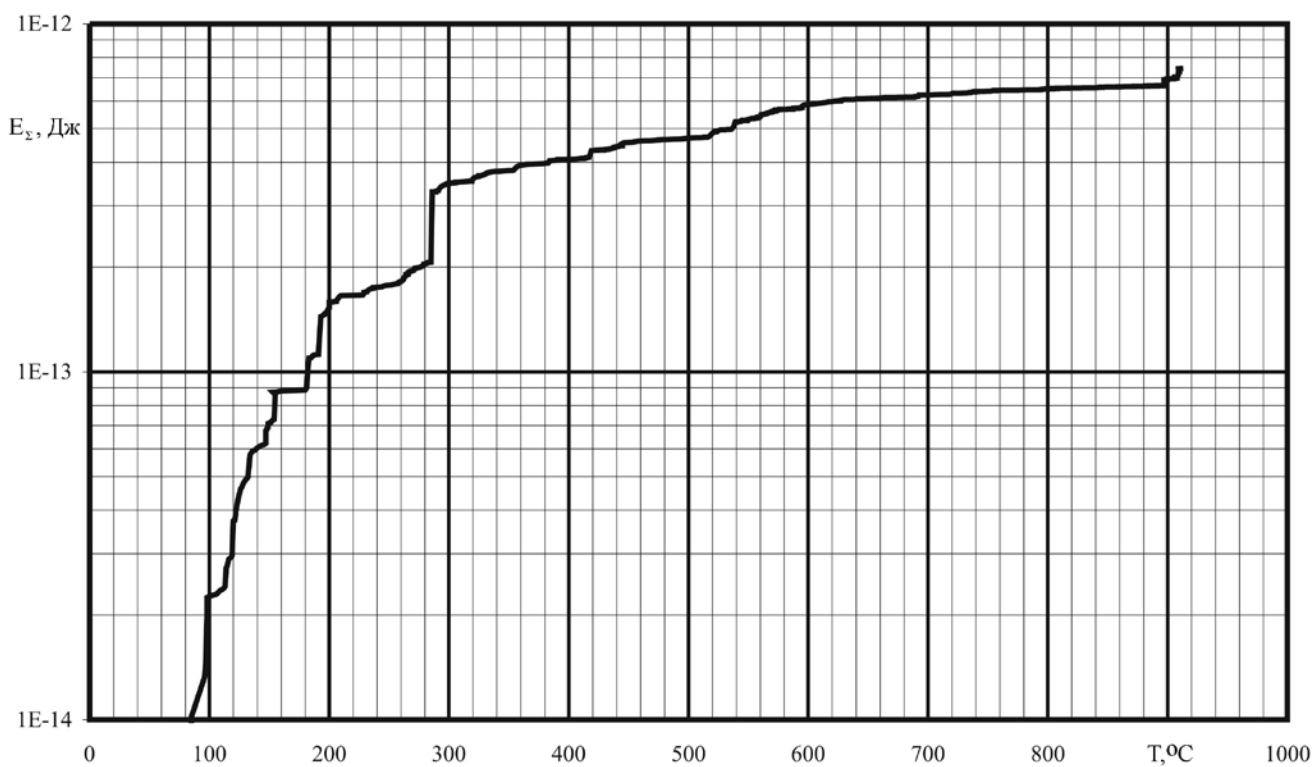


Рис. 4. Диаграмма суммарной энергии АЭ

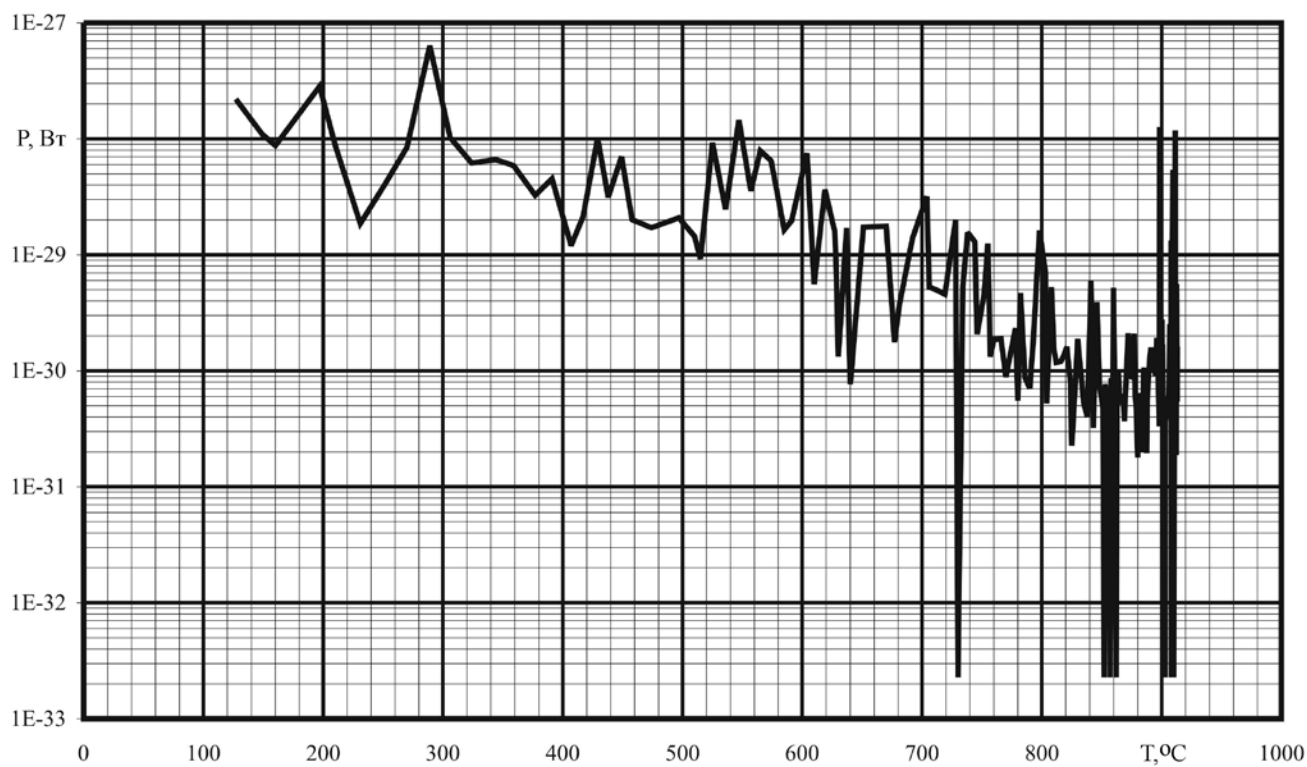


Рис. 5. Диаграмма мощности АЭ

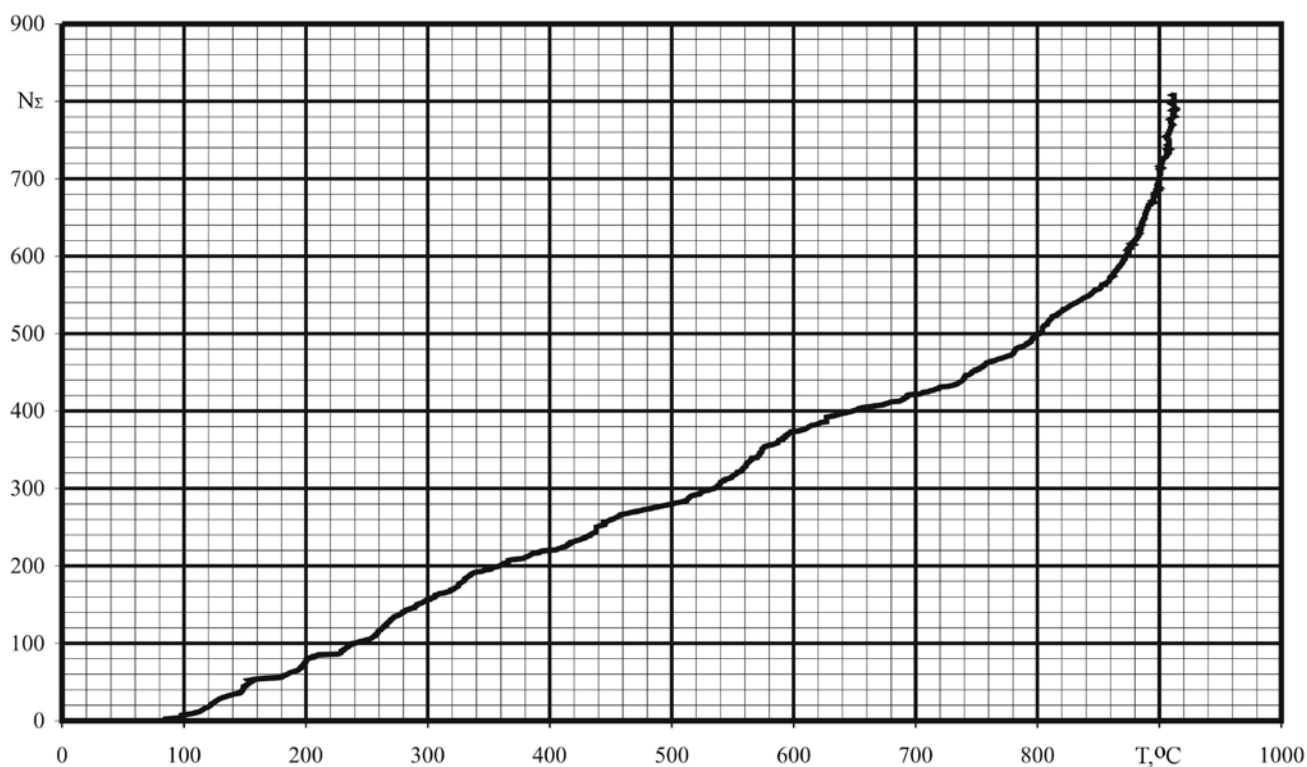


Рис. 6. Диаграмма суммарного счёта АЭ

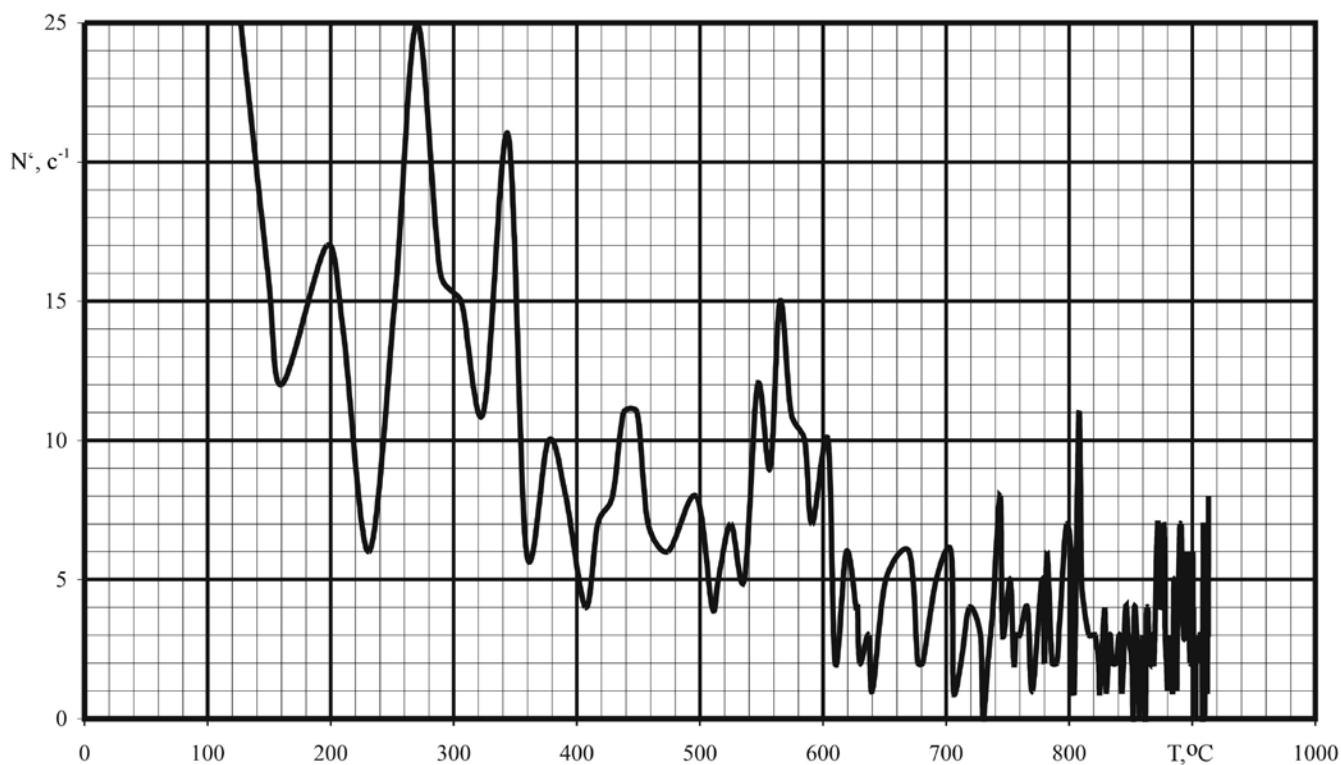


Рис. 7. Диаграмма активности АЭ

Муравьев В. И., Ким В. А., Дмитриев Э. А., Фролов А. В., Соколов Д. А.
О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

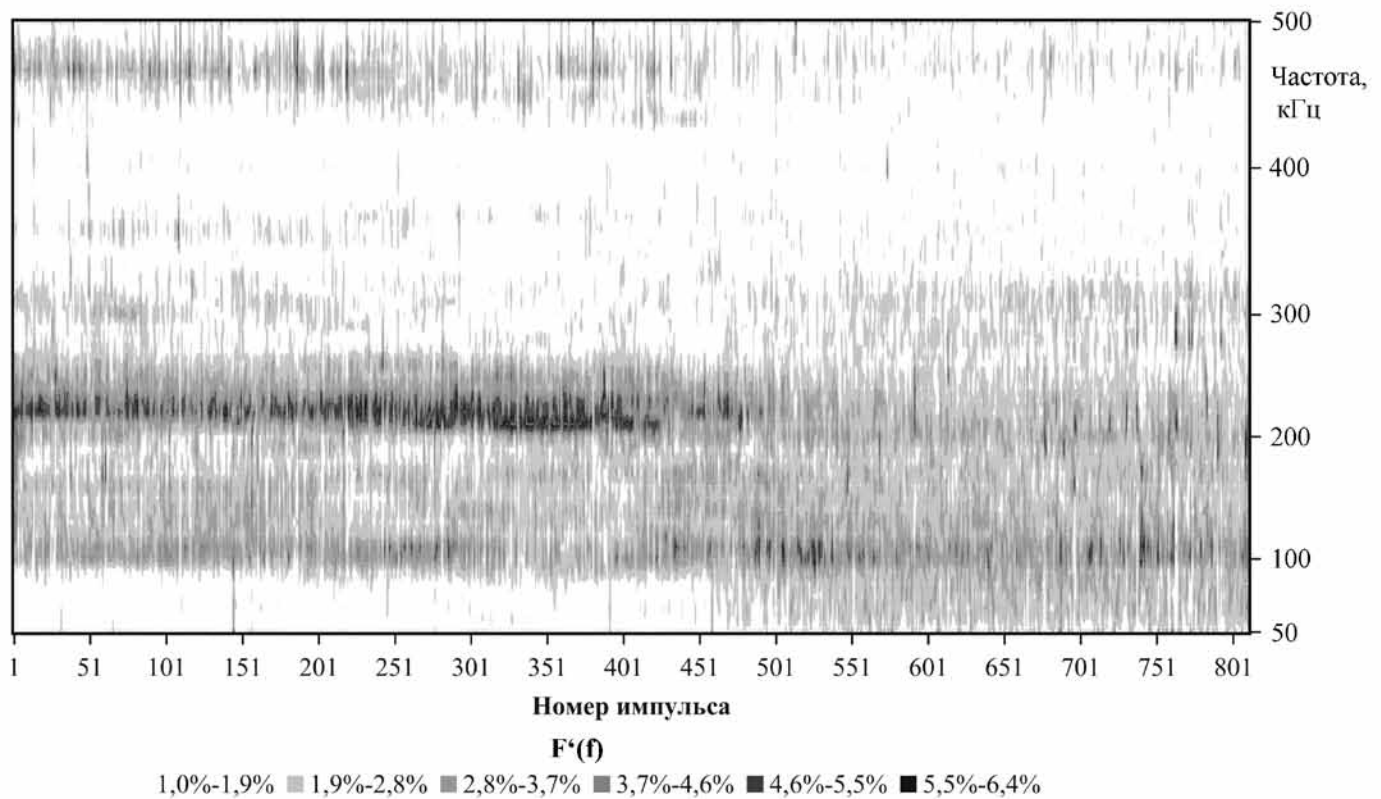


Рис. 8. Диаграмма относительной спектральной плотности АЭ импульсов

превращение в связи с интерференцией АЭ сигналов от фазовых превращений с сигналами от термических напряжений, а также в связи с трудностями определения реальных температур по сечению образца (которые при закалке сильно различаются) и нуждается в более тщательной проработке.

Основные выводы:

— решение проблемы оперативного определения критических точек фазовых превращений в сталях является одним из ключевых моментов в решении задачи повышения эффективности применяемых технологий термической обработки сплавов и разработки новых режимов термической обработки;

— метод АЭ представляет широкие возможности для исследования фазовых превращений в сталях и сплавах;

— информация, получаемая при анализе традиционных параметров АЭ сигналов, не позволяет идентифицировать фазовые превращения в исследованной стали 30ХГСА;

— спектральный анализ АЭ сигналов представляет более исчерпывающую информацию и позволяет однозначно детерминировать АЭ сигналы, излучаемые перлитной, мартенситной и аустенитной структурами во время нагрева, то есть фактически позволяет определять температуру точки Ас1;

— изменение кристаллической решётки при аустенитном превращении вызывает смещение спектра АЭ сигналов в низкочастотную область и его «размытие» в более широком частотном диапазоне;

— обнаруженные зависимости нуждаются в проверке на других типах конструкционных материалов и тщательном теоретическом обосновании;

— представляет интерес более детальное изучение процесса закалки АЭ методом (с целью разработки методики определения критических точек мартенситного превращения), а также процессов бейнитного, сорбидного и трооститного превращений и процессов, происходящих при отпуске сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А. А., Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлаждённого аустенита./А. А. Попов, Л. Е. Попова. — М.: МАШГИЗ, 1961. — 430 с.
2. Зимин Н. В. О влиянии температуры, скорости нагрева и исходного состояния структуры углеродистых сталей на процессы образования в них аустенита. // Металлообработка, № 1, 2006. — с 42-46.
3. Муравьев В. И. Обеспечение надёжности конструкций из титановых сплавов/В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, Б. И. Долотов и др. — М.: Эком, 2009. — 752 с.
4. Муравьев В. И. Изотермическая закалка как инструмент нанотормирования дефектной структуры стали Р18 для улучшения эксплуатационных характеристик режущего инструмента./В. И. Муравьев, А. В. Фролов, А. М. Злыгостев и др. // Металлообработка, № 2, 2009. — с. 50-57.
5. Семашко Н. А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении./Н. А. Семашко, В. И. Шпорт, Б. Н. Марьян. — М.: Машиностроение, 2002. — 240 с.
6. Марочник сталей и сплавов/под ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.

Муравьев В.И., Клешина О.Н., Кузнецов А.А., Матвеев Д.В.
V.I.Muravyev, O.N.Kleshnina, A.A.Kuznetsov, D.V.Matveenko

05.16.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ УПРАВЛЕНИЕМ ТЕРМИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ СВАРКИ

ON POSSIBILITY TO IMPROVE THE STRENGTH AND DURABILITY OF TITANIUM- MADE STRUCTURES BY CONTROLLING THE THERMAL CYCLE OF WELDING

Муравьев Василий Илларионович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: ktsp@knastu.ru.

Vassily I. Muravyev — Doctor in Engineering, Professor, Chief Researcher for Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Клешина Оксана Николаевна — аспирант ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: ktsp@knastu.ru.
Oksana N. Kleshnina — PhD Candidate, Chief Researcher for Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Кузнецов Александр Анатольевич — аспирант ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: ktsp@knastu.ru.

Alexander A. Kuznetsov — PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Матвеев Дмитрий Викторович — кандидат технических наук, начальник БТК цеха ОАО «КНААПО». E-mail: ktsp@knastu.ru.

Dmitry V. Matveenko — PhD in Engineering, Head of Quality Control for JSC «КНААПО» E-mail: ktsp@knastu.ru.

Аннотация: Исследовано влияние термического цикла сварки (ТЦС) на структуру и свойства сварных соединений из титанового сплава BT20. Показано, что удаление капиллярно-конденсированной влаги с поверхности сварных заготовок и дегазация сварочной ванны параметрами ТЦС приводят к исключению пористости и существенному снижению механических свойств сварных соединений. Использование методов раскрытия заготовок, исключающих капиллярную конденсацию влаги (например, ГЛР, полировка и т. д.) на свариваемых кромках, позволяет варьировать режимами ТЦС и получать свойства сварного соединения на уровне свойств основного металла.

Summary: The paper deals with the issue of impact by the thermal cycle of welding (TCW) upon the structure and properties of welded Titanium alloy BT20 joints. It is demonstrated that removal of capillary condensed moisture from welding blank surfaces and degasifying of weld puddle by WTC parameters causes the elimination of porosity and leads to a significant deterioration of welding joints' mechanical properties. Employment of blank shaping methods that exclude capillary moisture condensation on welded edges (for instance, gas-laser shaping, polishing, etc.) allows to vary WTC conditions and obtain welding joint properties equivalent to parent metal properties.

Ключевые слова: титановые конструкции, порообразование, термический цикл сварки, капиллярно-конденсированная влага, прочностные свойства, структура.

Keywords: titanium structures, pore formation, welding thermal cycle, capillary condensed moisture, strength properties, structure.

Общеизвестно, что при сварке плавлением титановых сплавов могут появляться поры. Отрицательное воздействие пор максимально при работе конструкций в условиях циклического нагружения. Снижение усталостных характеристик связано не только с действием пор как геометрических концентраторов напряжения, но в основном с уменьшением запаса пластичности металла вблизи границ пор из-за увеличения в нём в несколько раз концентрации водорода.

На практике при изготовлении сварных конструкций в технических требованиях закладывается снижение предела прочности сварного шва на 10% от предела прочности основного материала. При производстве данное снижение оказывается еще больше — 11-15%. При исправлении дефектов, полученных при сварке (поры, подрезы, вольфрамовые включения и др.) подваркой, происходит дальнейшее снижение предела прочности металла сварного шва.

Из всего многообразия исследований причин пороо-

Поступила в редакцию 12.02.2010

Таблица 1

Эффективность современных методов улучшения плотности и свойств металла шва конструкций из титановых сплавов

Операция	Методы	Число пор, приходящихся на 100 мм сварного шва	Предел прочности, МПа	Угол загиба, град	Факторы, определяющие свойства	Виды дефектов и методы их устранения	Возможные направления улучшения свойств
Раскрой и последующая обработка заготовок и присадочной проволоки	Резка на ножницах гильотинного типа	31-71	710-960	27-62	— Количество адсорбированной и капиллярно-конденсированной влаги, загрязнения на поверхности заготовок. — Время пребывания в расплавленном состоянии. — Скорость β — α -превращения. — Время пребывания в β -фазе. Это приводит к изменению: — величины зерна; — формы и величины внутризеренной структуры.	1. Поры. Удаление пор выборкой, подварка и термообработка. 2. Понижение свойств металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) на 10%. Увеличение запаса прочности при создании конструкции.	1. Разработка и исследование эффективных методов контроля качества подготовки поверхности заготовок и присадочной проволоки. 2. Разработка и исследование ТЦС, обеспечивающих: — эффективную дегазацию расплавленного металла и повышение его плотности; — формирование тонкопластинчатой внутризеренной структуры металла шва и ЗТВ, повышение механических свойств.
	Фрезерование	6-12	960-1080	48-64			
	Шабрение	5-22	980-1090	39-53			
	Полирование	1-3	980-1090	42-67			
	Газолазерный раскрой	0	1100-1150	38-43			
Термический цикл сварки	Рифление	50-57	950-1060	44-61			
	Переплав металла шва	18-107	880-1020	52-64			
	Сварка W-образным вольфрамовым электродом	0-13	910-1100	30-34			
	Сварка под флюсом	0-60	750-1050	56-68			

Таблица 2

Традиционные режимы автоматической сварки неплавящимся электродом непрерывной дугой стыковых соединений без разделки кромок

Толщина материала, мм	Сварочный ток, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки ВТ1-00, мм	Скорость сварки, см/с	Установочная длина дуги, мм	Напряжение дуги, В	Расход аргона, л/мин	
							для защиты сварочной ванны	для защиты обратной стороны шва
1,2	80-100	3	1,6	0,556-0,694	1-1,5	8-9	5-7	2-4
2,0	115-140	3	1,6	0,417-0,556	1-1,5	9-10	7-9	3-5
2,5	160-190	3	1,6	0,339-0,222	1-1,5	8-9	9	7
3,0	225-260	3	1,6	0,208-0,233	1,0-1,5	9-10	8-10	3-5

образования при сварке плавлением титановых сплавов наиболее достоверной является концепция о решающей роли в образовании пор при сварке газообразующих веществ, адсорбированных на кромках деталей, высказанная в 1969 г. В.В. Редчицем совместно с Г.Д. Никифоровым, которая признана многими исследователями и постоянно подтверждается.

Как показывает аналитическая оценка результатов исследований [1-4] (см. табл. 1), проблемы исключения пористости и доведения свойств металла шва до свойств основного металла не решены.

Увеличение времени существования сварочной ванны за счет ТЦС и применение флюсов приводят к исключению пористости, но при этом ухудшаются свойства металла шва и наоборот. Наиболее приемлемое направление исследований указано в табл. 1.

Методика проведения исследований:

Исследование проводили на листовых заготовках из сплава ВТ20 толщинами от 1,2 до 6 мм различных плавок каждого типоразмера. Использовались традиционные режимы автоматической аргонодуговой свар-

ки неплавящимся электродом стыковых соединений без разделки кромок заготовок (см. табл. 2).

Аналитическая оценка результатов входного и технологического контроля сварных заготовок проводилась за пятилетний период, кроме того оценивались свойства сварных заготовок по специально разработанным режимам сварки.

По техническим условиям (ТУ) поставка листов из сплава ВТ20 осуществляется после отжига при температуре 700-800 °С. Механические свойства в пределах: $\delta \geq 12\%$; $\varphi \geq 30^\circ$. Химический состав по ОСТ 190013-81 (%): Al = 5,5-7,0; Mo = 0,5-2,0; V = 0,8-2,5; Zr = 1,5-2,5. Примеси (не более) (%): C < 0,1; Fe < 0,25; Si < 0,15; O₂ < 0,15; N₂ < 0,05; H₂ < 0,015. Для сварных соединений допускается снижение прочности на 10% от требуемых по ТУ для основного металла.

Исследование макро- и микроструктуры и их фразографию проводили на растровом электронном микроскопе JSM-5600 фирмы «JEOL» (Япония) с волновым микрозондом.

Испытания механических свойств на растяжение

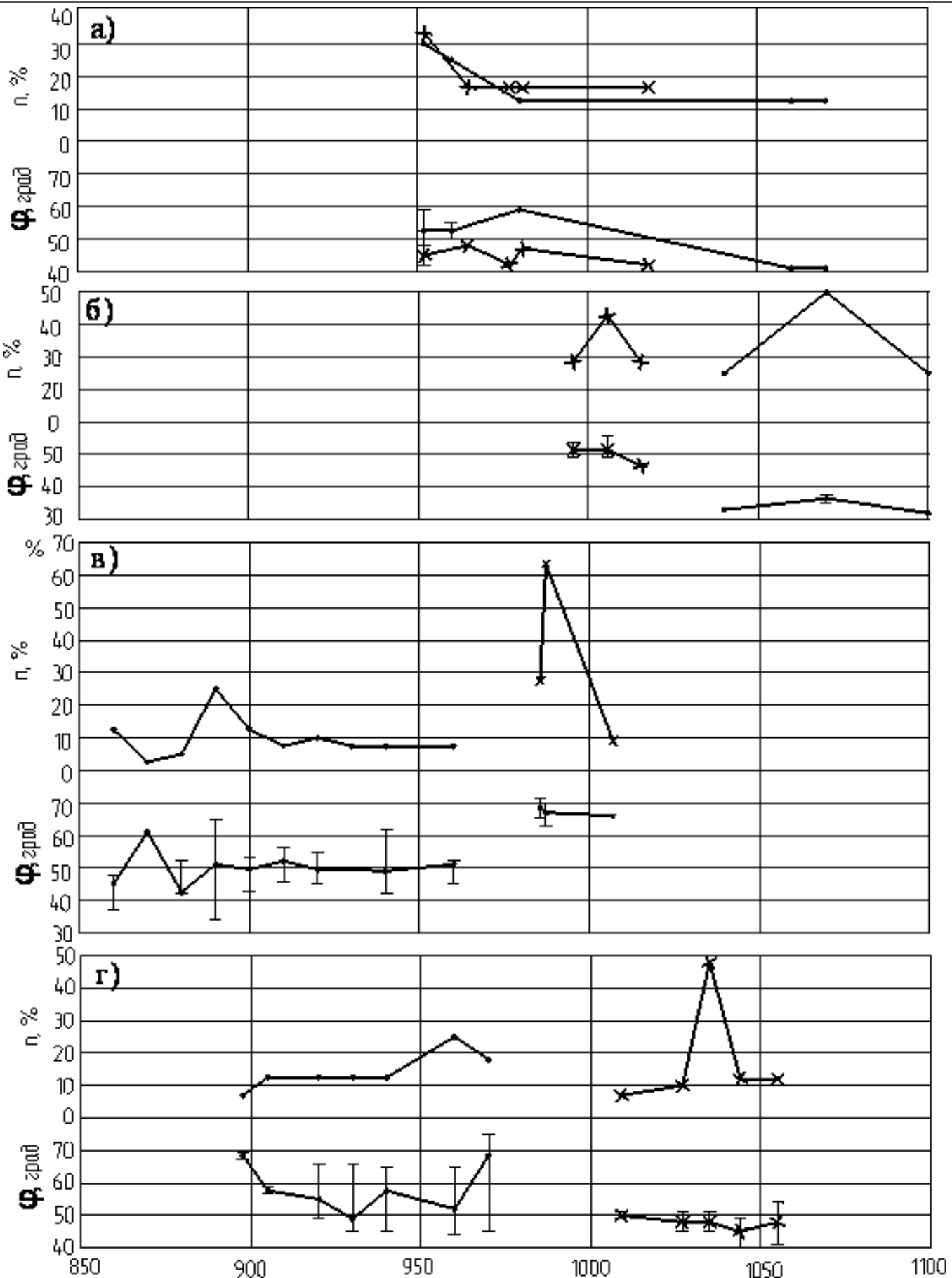


Рис. 1. Изменение механических свойств (σ_b , φ) основного металла (-x-x-x) и сварного шва (-••-) образцов из сплава ВТ20, количества пор (п) на 100мм в зависимости от толщины листа δ , мм: а — 1,2; б — 2; в — 2,5; г — 3.

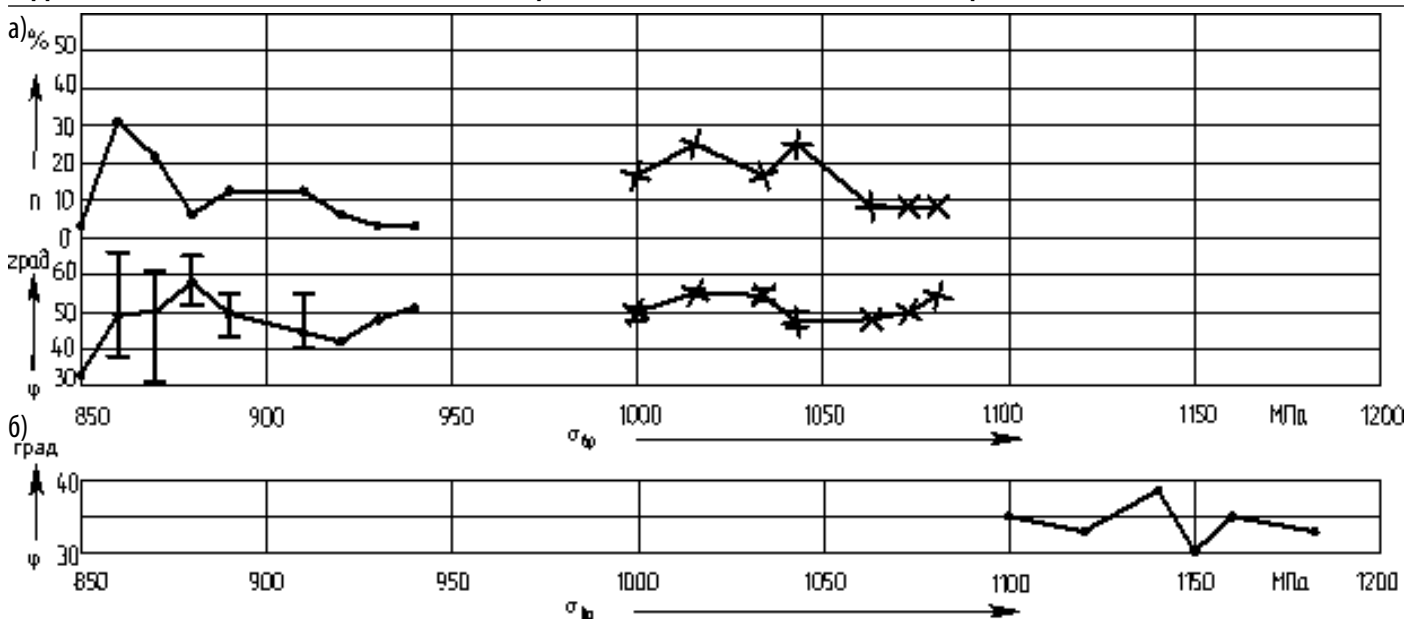


Рис. 2. Изменение механических свойств основного металла (-x-x-x) и сварного шва (-•-•-) образцов из листа $\delta = 2,5$ мм сплава VT20 в зависимости от режима ТЦС: а — традиционный режим сварки; б — «жесткий» режим сварки

проводили на универсальной испытательной машине ZD 10/10 «FRITZ» при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84), испытания твердости по ГОСТ 9012-59 (ИСО 6506-81, ИСО 410-82), испытания механических сварных соединений по ГОСТ 6996-66. Химический состав поверхности титановых заготовок определяли на мобильном оптико-эмиссионном анализаторе «ARK-met» фирмы «PPM-System». Содержание кислорода и азота анализировали методом импульсного нагрева испытуемого образца в токе инертного газа на приборе «ONH-2000» фирмы ELTRA. Содержание водорода определяли спектральным мето-

дом с применением низковольтного импульсного разряда (метод трех эталонов) на спектрографе ИСП-51 в соответствии с ОСТ 90034-81.

Для сравнительного анализа были построены зависимости (рисунок 1, 2) механических свойств (угол загиба от временного сопротивления разрыву) основного металла со свойствами сварных соединений от толщины, химического состава, режима сварки.

Результаты исследований и их обсуждение

Как видно из данных рисунка 1, для толщины 1,2 мм предел прочности сварного соединения не только укладывается в рамки разброса предела прочности основного металла $\sigma_{\text{в}} = 960-1020$ МПа, но и для 24% сварных соединений его величина увеличилась на 7-8% по сравнению с прочностью основного металла. Для толщины листа 2,0 мм механические свойства сварного соединения у 100% выше по сравнению со свойствами основного металла более чем на 7-11%.

Существенное различие изменения механических свойств сварных соединений по сравнению со свой-

Таблица 3

Сравнительная оценка времени всплытия газовых пузырьков в зависимости от ТЦС

Температура расплава для заготовок, °С	Длина сварочной ванны, мм	Время пребывания металла в сварочной ванне в жидком состоянии, с	Время всплытия газовых пузырьков, с
1668	6,61	0,465	0,38
1768	6,23	0,56	0,45
1868	5,9	0,84	0,78
1968	5,59	1,18	1,10
2068	5,32	1,34	1,26
2168	5,07	1,5	1,38
2268	4,85	1,71	1,59

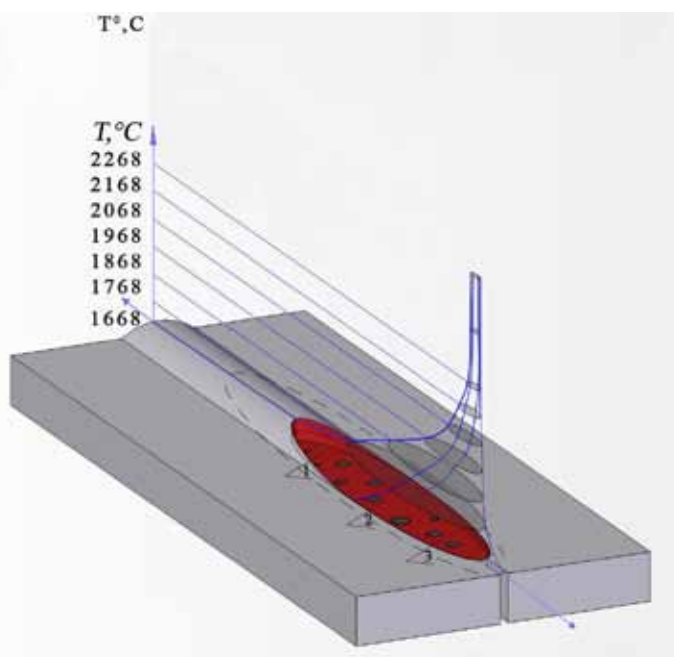


Рис. 3. Влияние ТЦС на распределение температурного поля по объему расплавленной ванны и ЗТВ

Таблица 4

Изменение геометрических параметров сварного шва сплава ВТ20 в зависимости от режима ТЦС (сварка ААрДЭС заготовок 500J100J2,5 мм)

Режимы сварки ААрДЭС							Геометрические размеры сварного шва, мм				
Вид сварки	№	I _{св.} , А	V, м/ч	U, В	Расход аргона, л/мин	* Время существования жидкой ванны τ _{ср.} , с	Геометрические размеры сварного шва, мм				
							h _y	S _y	S _{общ.}	h _n	S _n
Непрерывная	1	90	15	10	7,3-7,5	$\frac{0,98-2,97}{2,08}$	0,35	8	16	0,08	4
	2	90	20	10	4,5-7,5	$\frac{0,21-1,99}{1,31}$	0,05	7	22	0,1	22
	3	100	25	10	4,5-9	$\frac{0,46-1,71}{1,18}$	0,45	14	24	0,15	18
Импульсная	4	90	15	10	4,5-9	$\frac{0,98-2,97}{2,08}$	0,25	10	18	0,3	5
	5	150	15	10	4,5-9	$\frac{2,73-8,18}{5,72}$	0,4	12	20	0,25	16
	6	165	15	10	4,5-9	$\frac{3,3-9,99}{6,96}$	0,25	12	20	0,35	16



*- расчеты производились в диапазоне температур от 1668 до 2270 °С

ствами основного металла наблюдается у заготовок толщиной 2,5 мм и 3 мм. Для 100% сварных соединений значения предела прочности ($\sigma_b=860-960$ МПа) значительно ниже предела прочности основного ($\sigma_b=980-1100$ МПа). Кроме того, для толщины 2,5 мм около 44% сварных соединений, а для толщины 3 мм — 7% (рис. 1, в) имеют снижение предела прочности ниже допустимого для ответственных конструкций.

Как видно из данных рис. 2, существенное влияние на изменение механических свойств сварных соединений оказывает режим сварки. Так, при традиционных режимах предел прочности сварного соединения не укладывается в рамки разброса предела прочности основного металла $\sigma_b = 1070-1115$ МПа. Сварка на фор-

сированных режимах, т.е. с максимально возможной скоростью приводит к резкому увеличению временного сопротивления разрыву для сварного соединения, превышение составляет более 15%, при этом происходит снижение угла загиба с 50 до 30%.

Известно [5] улучшение свойств титановых сплавов после быстрого охлаждения из β -области и последующего отпуска, особенно литого металла. Этот факт положительного влияния на структуру и свойства титановых сплавов объясняется получением при выплавке мелкозернистой структуры слитка и изменением толщины и ориентировки α -пластин в процессе охлаждения. Из проведенных исследований следует, что механические свойства сварных соединений из псевдо- α -

Таблица 5

Изменение скорости охлаждения в интервалах T_{пн} в зависимости от ТЦС сплава ВТ20

Толщина свариваемого металла, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, мм/с	Длина сварочной ванны, мм	Время пребывания металла в сварочной ванне в жидком состоянии, с	Скорость охлаждения, °С/с, при температуре 960 °С
1,2	80	8	5,56	7,3	1,9	738,0
			2,78		3,9	396,0
	100	9	6,94	10,2	2,3	654,5
			4,17		3,5	393,0
1,5	90	9	5,56	9,2	2,4	582,5
			2,78		5,0	291,0
1,5	110	10	6,94	12,5	2,6	535,5
			4,17		4,5	321,5
2,0	115	9	4,17	11,7	4,2	341,5
	140	10	5,56	15,9	4,3	337,0
2,5	260	9	2,08	26,6	19,0	75,0
	240	8	2,33	21,5	14,0	102,5
3,0	260	9	2,08	26,6	19,0	75,0

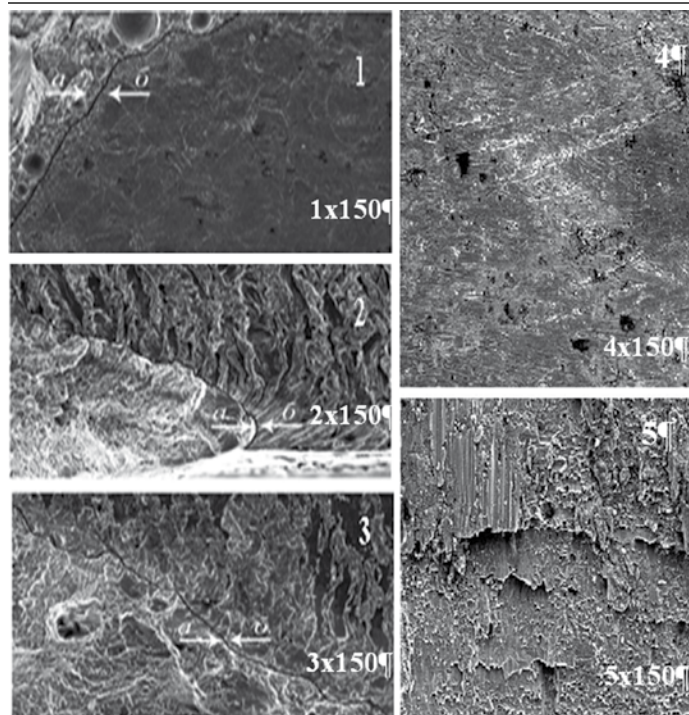


Рис. 4. Фрактограмма изломов образцов по зонам формирования соединения:

Зоны (а → ← б) сплавления с диффузионной сваркой: 1 — фрезерованные кромки перед сваркой — на всем протяжении зоны сплавления поры; 2 — кромки после ГЛР перед сваркой — пор нет; 3 — кромки одна после ГЛР + другая после раскроя на ножницах гильотинного типа — пор нет; зоны (б) диффузионной сварки: 1 — по всей поверхности замкнутые пустоты, 2 — регулярное чередование каналов и диффузионной сварки их кромок — замкнутых пустот нет; 3 — регулярное чередование вмятин и ответной заготовки после ГЛР — пустот нет; исходная поверхность заготовок перед сваркой: 4 — фрезерованных, 5 — после раскроя на ножницах гильотинного типа

титановых сплавов зависят преимущественно от процессов превращения в титановых сплавах при охлаждении из расплавленного состояния.

Расчеты распределения температурного поля (см. рис. 3) по объему расплавленной ванны и ЗТВ показывают, что перед фронтом расплавленной ванны располагается узкая, в несколько микрон, полоска металла с температурой, близкой к температуре плавления.

В изломе (см. рис. 4) этой зоны четко обнаруживается диффузионное соединение с наличием замкнутых пустот, которые при расплавлении металла приводят к образованию пор из-за испарения влаги и увеличения давления в заготовках с наличием капиллярно-конденсированной влаги в поверхностном слое стыкуемых кромок. Перед зоной диффузионного соединения наблюдается зона контактирования или автономной очистки от поверхностно-конденсированной влаги. Время и температура теплового поля в этой зоне не позволяют очистить её от капиллярно-конденсированной

Таблица 6

Изменение механических свойств сплава ВТ20 в зависимости от состояния рабочей поверхности, ТЦС, режимов отжига и упрочнения

№	Состояние образцов	σ_b , МПа	Угол загиба, град	Число циклов (N) до разрушения
1	ГЛР в среде азота (N)	1040	52	11470
2	ГЛР в среде аргона (Ar)	1045	58	16572
3	Фрезерование (Ф)	1065	48	26600
4	ГЛР (N) + Отжиг, 650 °С, 1 ч, воздух + опескоструивание (O, Воз, П)	1085	35	2263540
5	ГЛР + (N) + Отжиг, 650° С, 1 ч, вакуум (O, Вак)	1055	38	65462
6	ГЛР (Ar) + (O, Воз, П)	1070	45	1215234
7	ГЛР (Ar) + (O, Вак)	1060	52	75210
8	(Ф) + (O, Воз)	1075	44	112253
9	(Ф) + (O, Воз, П)	1060	40	2575647
10	(Ф) + (O, Вак)	1050	44	81966
11	ГЛР (N) + Сварка (С)	1070	57	41280
12	ГЛР (N) + (С) + (O, Воз, П)	1100	50	>1300110
13	ГЛР (Ar) + (С)	1065	48	55414
14	ГЛР (Ar) + (С) + (O, Воз, П)	1080	46	>1111647
15	(Ф) + (С)	1040	50	39285
16	(Ф) + (С) + (O, Воз, П)	1075	43	>1081070

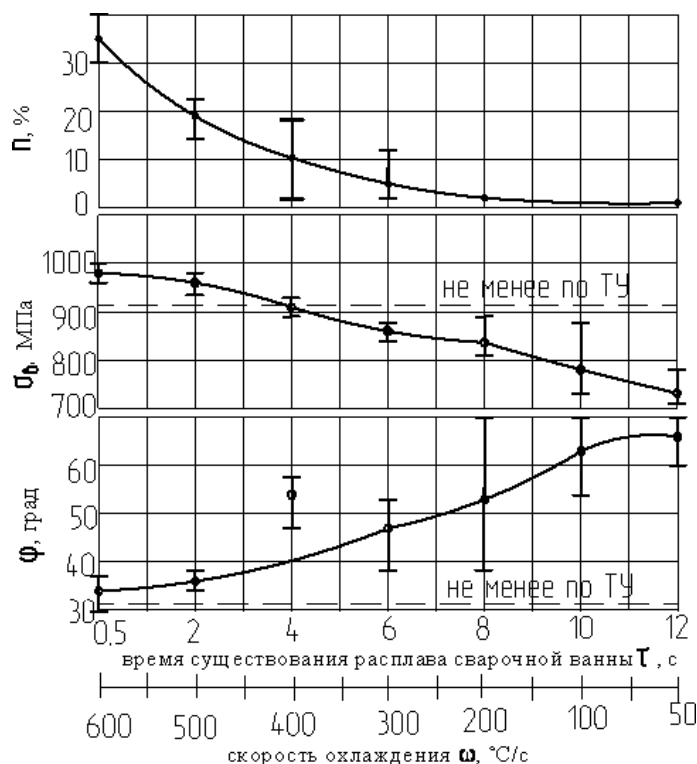


Рис. 5. Изменение механических свойств сварных (σ_b , ϕ) образцов из титанового сплава ВТ20 и количества пор (n) на 100мм сварного шва в зависимости от времени существования расплава сварочной ванны (τ) и скорости охлаждения (ω) в интервале полиморфного β - α превращения

Таблица 7

Изменение химического состава и механических свойств металла шва сплава ВТ20 в зависимости от ТЦС

№	Режим ТЦС		Содержание в процентах							Механические свойства	
	Скорость сварки $V_{св}$, см/с	Скорость охлаждения ω	Al	Mo	V	Zr	H ₂	O ₂	N ₂	σ_B , МПа	Угол загиба, град
1	0,095	127,0	4,11	0,18	0,64	0,93	0,0022	0,063	0,006	720	67
2	0,138	185,0	4,55	0,38	0,79	1,06	0,0028	0,069	0,008	830	56
3	0,208	430,0	4,81	0,48	0,78	1,10	0,0036	0,077	0,009	930	50
4	0,556	558,9	6,23	0,58	1,25	1,79	0,0023	0,064	0,009	1050	44
5	0,417	550,9	6,51	0,69	1,19	1,58	0,0011	0,072	0,010	1065	41
6	Основной металл		6,45	0,60	1,29	1,87	0,0012	0,067	0,003	1050	45

влаги.

Расчетами установлено, что температурное поле, достаточное для удаления капиллярно-конденсированной влаги с поверхности заготовок, находится в диффузионной зоне соединения, где происходит полное смятие выступов шероховатости микронадрывов и образование замкнутых полостей, заполненных влагой.

Регулярное чередование выступов на поверхности титановых заготовок, образованных газолазерным раскроем (ГЛР), и их высокая твердость, практически сохраняющаяся до температуры плавления, позволяют полностью удалить капиллярно-конденсированную влагу с поверхности ответной заготовки, полученную раскроем на ножницах гильотинного типа, и получить металл шва высокой плотности без пор. В последнем случае поры образуются при использовании некачественной присадочной проволоки.

Сравнительная оценка распределения температурного поля по объему расплавленной ванны, времени её существования и времени всплытия газовых пузырьков (см. табл. 3) показывает, что для полного удаления газовых пузырьков в зависимости от определенных условий (места ввода присадочной проволоки в ванну, рубки заготовок на ножницах гильотинного типа и др.) требуется довольно значительное время существования ванны в расплавленном состоянии. Последнее приводит к существенному изменению геометрических размеров металла шва (см. табл. 4).

Расчеты скорости охлаждения в интервале температуры полиморфного превращения показали их существенную зависимость от термического цикла сварки, т.е. от времени существования расплавленной ванны, чем оно дольше, тем медленнее скорость охлаждения (см. табл. 5).

Скорость охлаждения в интервале T_{np} определяет свойства металла шва титановой конструкции, что подтверждается экспериментальными исследованиями (см. рис. 5).

Большинство технологических операций изготов-

ления титановых конструкций приводит к накоплению остаточных растягивающих напряжений, что снижает показатели сопротивления усталости (см. табл. 6). Вакуумный отжиг полностью снимает внутренние напряжения, и практически сопротивление усталости увеличивается на 10-12% по сравнению с исходным состоянием. Отжиг в воздушной среде приводит к некоторому увеличению сжимающих напряжений и к увеличению сопротивления усталости по сравнению с вакуумным отжигом. Опескоструивание после отжига в воздушной среде создает значительные сжимающие остаточные напряжения, что приводит к увеличению сопротивления усталости более чем на два порядка по сравнению с исходным состоянием.

При циклическом нагружении при постоянном уровне переменного напряжения ($\sigma_m = (0,70\sigma_{bp} + 0,49\sigma_{br})/2 = 654$ МПа) в материале протекают вначале процессы накопления необратимой повреждаемости (см. рис. 6), и при достижении некоторого критического уровня плотности дефектов происходит возникновение начальной поверхностной трещины или зоны очага разрушения.

Экспериментальными исследованиями была установлена удовлетворительная сходимость с ранее высказанными положениями М.Х. Шоршорова и В.И. Добаткина улучшения свойств металла шва после увеличения скорости охлаждения из β -области и последующего отжига. Улучшение свойств металла шва объясняется получением мелкозернистой структуры и изменением толщины и ориентировки α -пластин в процессе охлаждения (см. рис. 7).

Газолазерный раскрой титановых заготовок позволяет полностью исключить порообразование в металле шва, а уменьшение времени существования расплавленной ванны и увеличение скорости и охлаждения приводят к улучшению структуры и свойств металла шва, близких к свойствам основного металла.

Уменьшение скорости охлаждения за счет увеличения времени существования расплавленной ванны может привести к снижению прочности металла шва бо-

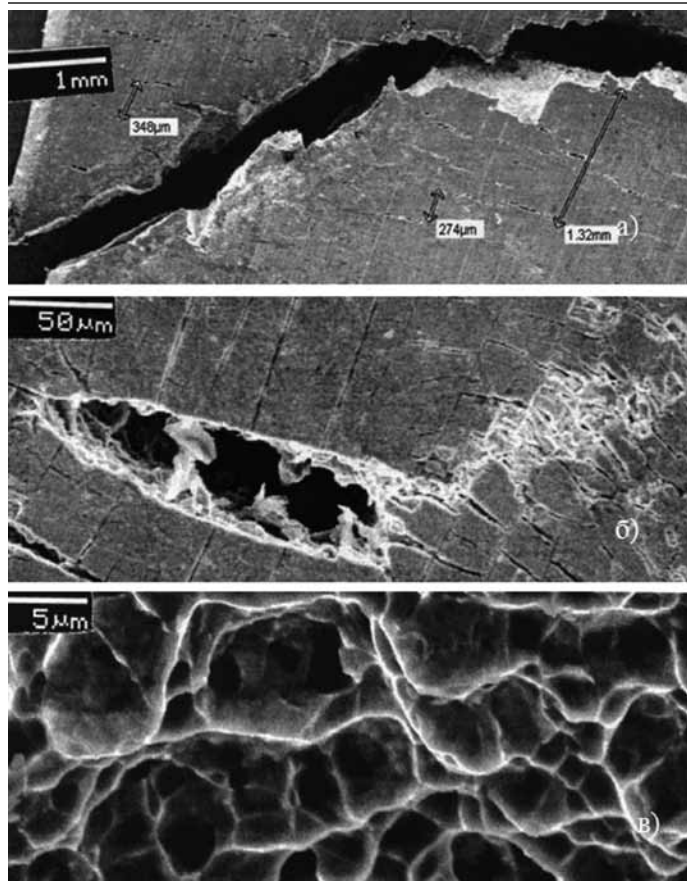


Рис. 6. Вид поверхности образца после усталостных испытаний (а, б) с участками накопления необратимой повреждаемости оксидной пленки и образованием микротрещин и поверхности излома (в) с характерным для усталостного разрушения ямочным рельефом

лее чем на 10-25% по сравнению с основным металлом из-за укрупнения зерна и изменения химического состава (см. табл. 7 п. 1-3).

Выводы

1. Сравнительными исследованиями механических свойств основного металла и металла шва листовых заготовок различных толщин и плавок по результатам входного и технологического контроля конкретных деталей ЛА за пятилетний период установлено, что для толщин 1,2 мм и 2,0 мм вне зависимости от химического состава металла шва и основного металла они практически не различаются. Однако для толщин 2,5 мм и 3,0 мм независимо от химического состава свойства металла шва ниже свойств основного металла и в некоторых случаях более чем на 10-15%. Изменение режимов ТЦС на форсированные для этих толщин привело к увеличению временного сопротивления разрыву металла шва по сравнению с основным металлом более чем на 15% и незначительному уменьшению угла загиба. Из проведенных исследований следует, что механические свойства металла шва титановых сплавов определяются процессами ТЦС.

2. Установлено, что температурное поле, достаточное для удаления капиллярно-конденсированной влаги с поверхности заготовок, находится в диффузионной зоне

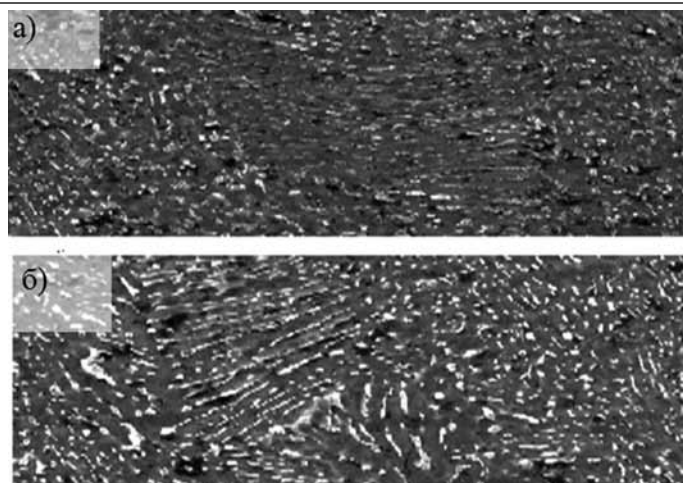


Рис. 7. Микроструктура металла шва титанового сплава BT20: а — время существования ванны $t=1,05$ с, скорость охлаждения $w=150,5$ °C/с; б — время существования ванны $t=0,23$ с; скорость охлаждения $w=596$ °C/с

соединения, где происходит полное смятие выступов шероховатости микронадрывов и образование замкнутых полостей, заполненных влагой. Регулярное чередование выступов на поверхности титановых заготовок, образованных ГЛР, и их высокая твердость, практически сохраняющаяся до температуры плавления, позволяют полностью удалить капиллярно-конденсированную влагу с поверхности ответной заготовки, полученную раскроем на ножницах гильотинного типа, и получить металл шва высокой плотности без пор. В последнем случае поры образуются в случае использования некачественной присадочной проволоки.

3. Исследование механических свойств при статических, повторно-статических и виброиспытаниях титановых конструкций показали, что конструкции, изготовленные при применении оптимальных режимов ТЦС и термообработки, не уступают конструкциям, изготовленным по традиционной технологии из цельного металла.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Редчиц, В. В., Фролов, В. А., Казаков, В. А., Лукин, В. И. Пористость при сварке цветных металлов. М.: Издательский центр «Технология машиностроения». 2002. — 448 с.
- 2 Муравьев, В. И., Фузулаков, Р. А., Мельничук, А. Ф. Исследование влияния газа-зернового раскроя на формирование рельефа, структуры и химического состава поверхности реза титановых заготовок // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. №2. — С. 22-25.
- 3 Лозеев, Г. Е. Способ уменьшения пористости в сварных швах // *Сварочное производство*. —1975. №8. —С. 31-33.
- 4 Долотов, Б. И., Муравьев, В. И., Марьин, Б. Н. и др. О возможности получения плотных швов на титановых сплавах // *Сварочное производство*. —1996, № 12. —С. 6-8.
- 5 Шоршоров, М. Х., Мещяряков, В. Н. Фазовые превращения и изменения свойств сплавов титана при сварке. Атлас. М.: «Наука». 1973. — 160 с.

А. Н. Козлита, В. А. Устинов

05.16.07

A. N. Kozlita, V. A. Ustinov

УТИЛИЗАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОКСОВАНИЯ

WASTE PROCESSING OF HYDRO- CARBON MATERIALS BY COKING

Козлита Александр Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского на Амуре государственного технического университета. E-mail: Kozlita@knastu.ru.

Alexandre N. Kozlita — PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Kozlita@knastu.ru.

Устинов Владимир Александрович — доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского на Амуре государственного технического университета. E-mail: kngg@knastu.ru.

Vladimir A. Ustinov — Associate Professor at the Department of Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kngg@knastu.ru.

Аннотация: Дана сравнительная оценка эффективности способов утилизации нефтесодержащих отходов. Использован метод эксергетического анализа. Предложен способ утилизации материалов, образующихся при ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов.

Summary

The paper presents a comparative analysis of the efficiency of oily-waste processing methods. The exergic analysis method is used. A method is proposed for the disposal of materials generated during liquidation of oil/oil product spillages.

Ключевые слова: утилизация нефтеотходов, эксергетический анализ, энергоёмкость, экология, коксование.

Keywords: oil waste processing/disposal, exergic analysis, energy intensity, environment.

В масштабной задаче утилизации углеводородных материалов (пластмассы бытовых отходов, нефтешламы, отработанные масла и отходы строительных технологий) особое место занимает отдельная ее часть — переработка многокомпонентных смесей (МС), образующихся при ликвидации аварийных ситуаций (АС) при добыче, транспортировке и переработке нефти и нефтепродуктов. В состав этих смесей входят нефть и ее продукты, минеральные материалы грунтов, полимеры сорбентов, органические материалы, элементы спецодежды и средств индивидуальной защиты, тела и материалы случайного происхождения. Аварийные ситуации могут возникать в удаленных и труднодоступных местах, поэтому проблема транспортировки таких смесей до мест утилизации является весьма непростой. Общей тенденцией при ликвидации АС является мобильность всего оборудования и средств, используемых в технологическом процессе. Очевидна целесообразность создания средств утилизации МС такого типа. Наиболее распространенным способом утилизации МС является сжигание в печах-инсинераторах, работа которых основана на поддержании достаточной температуры в зонах горения и дожигания, подаче воздуха большими коэффициентами избытка и вторичном и разбавления продуктов горения до безопасных концентраций. Сжигание, даже при всех мерах снижения вредного воздействия на окружающую среду, экологически не безупречно, но это вынужденное техническое решение, т. к. остро стоит вопрос энергоёмкости процесса в полевых условиях. Радикальным решением проблемы утилизации углеводородных материалов (УВГ) мог бы стать процесс, энергетически самодостаточный и меньше воздействующий на окружающую среду. В качестве такового предлагается процесс направленного коксования. Историческим и технологическим его предшественником является процесс «перегонки до кокса» [5,399]. Процесс включает непрерывный нагрев сырья первоначально до температуры кипения фракций, а затем — коксования. Принимающая система разделяет (конденсирует) жидкие продукты и подает газовую фазу на сжигание или хранение. Особенностью предлагаемого варианта процесса является нагрев сырьевой емкости от центра аппарата греющим элементом. Первоначальной целью такого процесса являлась возможность переработки МС на месте с получением удобных для транспортировки и дальнейшего использования продуктов: твердый и компактный кокс, жидкие фракции умеренной вязкости (а при низких температурах это имеет немалое значение) и газов, пригодных и «удобных» для сжигания на месте. Такое сжигание позволяет получать тепло на технологические и экологические нужды с меньшим вредным воздействием на окружающую среду. Критери-

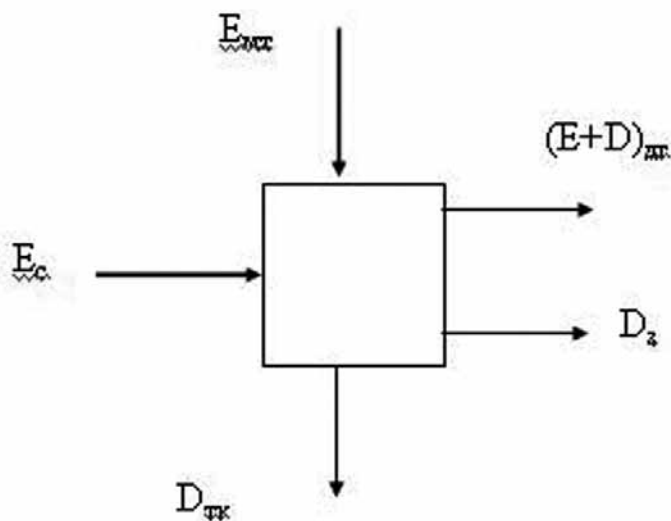


Рис. 1. Схема эксергетических потоков печи

ев эффективности утилизации МС можно выделить два: 1) энергоемкость процесса (в конечном итоге она определяет стоимость), 2) состав и количество выбросов в окружающую среду. Энергоемкость. Принято считать, что сжигание умеренно загрязненных МС энергетически избыточно, а термодеструктивная переработка — это энергопотребляющий процесс. Рассмотрим вопрос с точки зрения эксергетического анализа. Под эксергией (понятие введено Рантом в 1953 г.) понимаем ту часть энергии, которая может быть полностью преобразована в другие виды энергии (работу) в данных условиях. Другая часть энергии, которая не может совершать работу, «теряющаяся» в окружающей среде, была названа анергией. Эксергетический анализ обладает несколькими особенностями:

1. Уравнения эксергетического баланса могут быть составлены для отдельного элемента (аппарат, машина), системы (установка) или комплекса (предприятие).
2. За точку отсчета берутся параметры окружающей среды.
3. Эксергетический баланс позволяет анализировать новые, еще физически не созданные технические системы. [2,119]. Это становится возможным благодаря тому, что КПД основных технологических процессов и способов передачи энергии достаточно хорошо изучены. Если система имеет на выходе эксергию больше, чем на входе, то ее КПД больше 100%, есть повод для поиска ошибки в принципиальной схеме или расчетах. Для сравнительного анализа печи-утилизатора и установки термодеструктивной переработки (ТДП) ограничим каждую из них контрольной поверхностью и укажем эксергетические потоки. Схема потоков печи показана на рис. 1.

Печь. На входе имеем: E_c — химическая эксергия топлива (МС); E_b — эксергия воздуха, подаваемо-

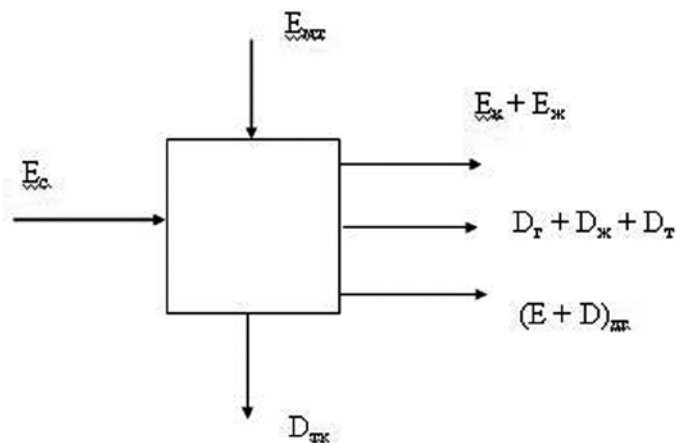


Рис. 2. Схема эксергетических потоков при термодеструктивной переработке

го на горение. Поскольку за точку отсчета берутся параметры окружающей среды, эксергия воздуха как такового практически равна нулю, эксергией потока можно пренебречь за его малостью. Фактически здесь подводится эксергия моторного топлива, которое расходуется на выработку электроэнергии, а затем на работу электродвигателя воздухоподачи. На выходе имеем $D_{тк}$ — анергия тепловых потерь с корпуса в окружающую среду; $(E + D)_{др}$ — эксергия и анергия дымовых газов; $D_з$ — анергия золы.

Установка коксования. На входе имеем ту же химическую эксергию сырья (МС) и эксергию моторного топлива, расходуемого для получения электроэнергии, а затем тепла на разогрев сырья и подачу воздуха на сжигание только газовых фракций. На выходе анергия тепловых потерь с корпуса, E_k, E_j — химическая эксергия кокса и жидких фракций; $D_{тжг}$ — анергия тепловых потерь с коксом, жидкими и газовыми (при конденсации и разделении); $(E + D)_{др}$ — эксергия и анергия дымовых газов от сжигания только газовых фракций. Воспользуемся той формой эксергетического анализа, которая называется безразмерной, т.е. используем характеристику эксергетического КПД для машин и аппаратов:

$$\eta = 1 - \Sigma D / \Sigma E_{вх}$$

Примем, что химическая эксергия топлива в первом случае и сырья во втором равны. Сравним подводимую энергию моторного топлива. Установка типа «Факел» имеет установленную мощность электродвигателя воздухоподачи 2,2 кВт. Разовая загрузка составляет 50-70 дм³. Если принять полную загрузку нефтью со средней теплоемкостью порядка 2 кДж/кг К (тепло фазовых переходов не учитываем, т.к. не определена начальная температура процесса) и длительность цикла 2 часа, то окажется, что затраченной энергии достаточно для нагрева сырья примерно на 100 °С.

Затраты на сжигание (или нагрев) могут быть оценены по следующим цифрам. На сжигание 1 кг жидкого топлива расходуется от 10 до 15 м³ воздуха. По данным В. Лисиенко [3,549], затраты на получение 1000 м³ сжатого воздуха составляют 45 кг условного топлива, воздушное дутье при 300 °С — 91,5 кг у. т. Для сравнения — перегонка нефти (на 1 кг) требует 0.136 кг у. т. Следует учесть, что сжигание многофазных систем (печь) ведется при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1.4-1.9$. Кроме того, из экологических соображений требуется разбавление продуктов сгорания. Газовое топливо (а только оно будет сжигаться при ТДП) требует $\alpha = 1.05-1.1$ плюс несоизмеримо меньшее количество сжигаемого вещества. Результаты сжигания углеводородов в открытом тигле [6,178] показывают, что имеет место большой химический недожог: для бензина — 12,7 %, для керосина — 17,7 %, для бензола — 18,5 %. Это условия горения в печи. Кроме того, при горении со свободной поверхности интенсивность излучения факела определяет прогрев нижележащих слоев топлива. Но при подаче избыточного количества воздуха сверху «светимость» факела становится меньше, уменьшается прогрев нижних слоев до таких пределов, что это создает (при температурах порядка -30 °С) проблемы с устойчивостью горения [5]. При разогреве сырья для коксования (от центра емкости), при наличии жидкой фазы в контакте с нагревателем параметры теплоотдачи будут достаточно высоки. Даже «перегретые» продукты неизбежно отдадут тепло окружающему объему сырья. Внешний нагрев необходим до момента образования устойчивого факела горящих газов, в дальнейшем его функция будет только регулирующая. Система может разогревать сама себя, опыт примитивных «самоваров» в этом смысле показателен. Отсутствие разделения жидких фракций позволяет вести нагрев на форсированных режимах, что обеспечит производительность процесса. Непрерывный прогрев сырья, без этапов охлаждения (от начальной точки процесса до конечной — порядка 500 °С), обеспечивает энергетическую эффективность. Потери тепла в окружающую среду. При сжигании МС температуры внешней поверхности стенки печи-утилизатора (стальная стенка, 2 мм) изменяются от 400 (труба) до 800 °С — зона горения [1, 236]. При сопоставимых размерах установок максимальная температура ТДП не превысит 500°, а значит, потери тепла будут меньше. Кроме того, на этапе разогрева от центра будет иметь место наиболее рациональный характер распределения температур — большие в центре и меньшие на периферии. Целесообразной становится тепловая изоляция. Таким образом, потери тепла в окружающую среду с корпуса при ТДП несоизмеримо меньше, чем при сжигании. Потери тепла с золой (при равных ее количествах) тоже будут меньше, т.к. меньше температура процесса. Унос тепла с жидкой и газовой фа-

зами уже учтен в параметрах перегонки (0,136 кг у. т.). Возвращаясь к эксергетическому КПД, можно заключить, что при равенстве эксергии на входе у коксования составляющая анергии будет несоизмеримо меньше, чем при прямом сжигании. ТДП позволяет большую часть энергии МС перевести в наиболее удобно хранимую форму — форму химической энергии жидких и твердых материалов. Особо следует сказать о полимерах, которые могут присутствовать в МС. Обобщающая работа С. Мадорского [4, 110] дает основание полагать, что при температурах порядка 450 °С происходит их термическое разложение (до 98% летучих) с составом от метана до гептана, что принципиально не изменит картину процесса. Умеренные включения бумаги, тканей и т.д. скажутся, пожалуй, только на качестве кокса. Экологический критерий может быть оценен по количеству и составу продуктов одного и другого процессов на выходе. При сжигании имеем двуокись и окись углерода, сажу (недожог), сернистые газы и двуокись азота плюс зола. При коксовании примерно тот же состав газов, но с принципиально меньшим недожогом (горит только газ в горелке), меньше сернистых (их содержание в коксе выше, чем в жидкой и газовой фазах). Важно и то, что количество газообразных выбросов несоизмеримо меньше. Кокс, компактно и удобно транспортируемый, должен быть направлен туда, где есть оборудование, условия и опыт его сжигания — ТЭЦ, котельные и т.д. Минеральные примеси локализуются в нижней части коксового массива и при необходимости могут быть удалены механическим способом либо «разбавлены» (при подготовке к сжиганию) основным топливом — углем. Жидкие фракции могут быть транспортированы в емкостях для жидких нефтепродуктов и без дополнительной переработки использованы в общем объеме переработчика нефти. Подводя итог, можно заключить, что и энергетически, и экологически процесс коксования МС, образующихся при ликвидации разливов нефтепродуктов, выгоднее, чем их сжигание.

ЛИТЕРАТУРА

- Блинков С.С. Экспериментальное исследование теплового режима печи. // Научно-техническое творчество студентов и аспирантов. Часть 1. Материалы докладов 39-й научно — технической конференции аспирантов и студентов. Комсомольск-на Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2009г. — С. 236.
- Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения. — М.: Энергия. — 1983. — 468с.
- Лисиенко В. Г и др. Хрестоматия энергосбережения: Справ. Изд.: в 2 Кн. Под. ред. В.Г. Лисиенко. — М.: Теплоэнергетик, 2003. — 680.
- С. Мадорский Термическое разложение органических полимеров. — М.: Мир. — 1967. — 346.
- Наметкин С. С Собрание трудов. Кн. 3. — М.: Издательство АН СССР. — 1955. — 800с.
- Хзмалян Д. М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. — М: Энергия. — 1976. — 488с.

ВЛИЯНИЕ МАТРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ T800, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МОКРОЙ НАМОТКИ RESIN MATRIX FOR TEST-PIECES MADE OF COMPOSITE CARBON MATERIALS T800 BY WET WINDING

Цуй Сюй — магистр технических наук, доцент, замдекана факультета аэрокосмической техники Шэньянского авиационного технического института (Китай). E-mail: cuixug@163.com.

Xui Sui — Master of Engineering, Associate Professor, Vice-head of the Aero-space Department at the Sheng-Yang Technical Aviation Institute, China. E-mail: cuixug@163.com.

Гао Юй — доцент Шэньянского авиационного технического института (Китай)

Gao Yui — Associate Professor, Sheng-Yang Technical Aviation Institute, China.

Гусева Роза Ивановна — профессор кафедры «Технология самолетостроения», зам. декана самолетостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: r_guseva@knastu.ru

Ms. R. I. Gusseva — Professor of the Department of Aircraft Building Technology, Vice-dead of the Department of Aircraft Engineering at Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: r_guseva@knastu.ru

Чжан Линюни — профессор Китай, Шэньянский авиационный технический институт

Xian Linyuni — Professor, Sheng-Yang Technical Aviation Institute, China.

Аннотация: Исследуются особенности углеродных волокон (УВ) T800 и цилиндрических образцов, полученных мокрой намоткой, выбраны матричные материалы для углеродных волокон T800 для получения композиционных угольных материалов (КМУ), определены механические свойства, влагостойкость и теплостойкость КМУ на основе углеродных волокон T800. Полученные результаты позволяют заключить, что вязкость и срок хранения полимерных матриц соответствуют технологическим требованиям, КМУ T800 имеет хорошие адгезионные свойства, интерфейса сцепления матриц и волокон хорошая, сдвиговая прочность составляет 101 МПа, прочность на растяжение вдоль волокон более 2500 МПа; после выдержки в дистиллированной воде в течение 150 часов при температуре 95°C гигроскопичность КМУ T800 составила менее 1%, механические свойства, прочность на от-дир высоки, кроме того, отмечены отличные влагостойкость и теплостойкость.

Summary: Based on the properties of T800 carbon fibers and cylindrical test-pieces manufactured by wet winding, a type of resin matrix is developed to fit the wet winding in the use of T800 carbon fibers for the production of composite carbon materials. The mechanical behavior and resistance to damp and heat are tested for the composite materials manufactured by T800 carbon fibers and resin matrix. It is concluded that the viscosity and storage life of the polymeric matrixes are satisfactory and meet the wet winding process requirements. The T800 composite material has good adhesive mechanism and adhesion interphase, interlaminar stress as high as 101Mpa and tensile strength parallel to grain more than 2500Mpa. After 150 hours immersed in distilled water at 95°C, water absorbency is less than 1 % and mechanical behavior and resistance to damp and heat remain well.

Ключевые слова: углеродные волокна T800, метод мокрой намотки, связующие, пластификатор, цилиндрические образцы, механические характеристики.

Keywords: T800 Carbon fiber, composite material, wet winding, adhesives, plasticizing agent, cylinder items mechanical behavior, cylindrical test-pieces, epoxy-amine systems.

Композиционные материалы на основе углеродных волокон (УВ) имеют ряд преимуществ по механическим характеристикам, модулям упругости, значениям малой плотности, постоянствам размеров и широко применяются в авиакосмической и других отраслях промышленности [1, 2].

С разработкой новых перспективных КМУ следует особо отметить высокопрочностные и высокомодульные углеродные волокна T800.

Но углеродные волокна T800 имеют диаметры 6-7 микрон, обладают малым адгезионным сцеплением с полимерной матрицей вследствие природной полировки волокон, поэтому простые полимерные матрицы не дают возможность обеспечить высокую адгезионную прочность углеродных волокон T800 (например, КМУ T800 имеет меньшую прочность, чем КМУ T700), что ограничивает возможности формирования КМУ T800 методом мокрой намотки [3; 4].

В предыдущих исследованиях по полимерным матрицам для КМУ T800 показано, что применение ароматических полиаминов в качестве отвердителя обеспечивает требуемую прочность КМУ, но значительно снижает влагостойкость и теплостойкость [5; 6].

Чтобы обеспечить применение КМУ T800 в различных

средах, необходимо исследовать новые полимерные матрицы с отличными характеристиками по технологичности, по сцеплению с углеродным волокном, по механическим свойствам, влагостойкости и теплостойкости.

В работе анализируется влияние молекулярной структуры выбранных полимерных матриц на характеристики КМУ Т800 на цилиндрических образцах, полученных методом мокрой намотки и последующим отверждением связующего.

Проведение экспериментов

Используемые компоненты

Эпоксидное связующее TDE-85 (0,85% эпоксидной смолы); CYD-128 (51% эпоксидной смолы); отвердитель MeTHPA; пластификатор в различных пропорциях; углеродные волокна — Торейка Т800Н (12К), Т700, Т300.

Формование образцов

Смешать связующее и отвердитель в соотношении 10:1. Обработать углеродные волокна Т800 в азотной кислоте для придания шероховатости поверхности волокнам. Пропитать углеродные волокна связующим, уложить, разгладить волокна, дать предварительное натяжение волокнам для ориентации, провести отверждение образцов по режимам: 1) температура отверждения 80 °С, время отверждения — 2 час; 2) температура отверждения 120 °С, время отверждения — 2 час; 3) температура отверждения 150 °С, время отверждения — 5 час. Полученные КМУ — однонаправленные, содержание углеродных волокон — 60%.

Изготовление цилиндрического образца: компаунд связующего залить в пропиточный бак; при постоянной температуре 35 °С и натяжении 20 N провести намотку на намоточном станке с ЧПУ (компания MAW2o-LSI-6, Mikrosam) и отформовать цилиндрический образец. Готовые образцы отсортировать по типам применяемых связующих.

Определение гигроскопичности

Подсушить однонаправленный КМУ с размером 45×6×2 mm в ва-кууме, взвесить образцы сухие W_i (осреднение веса проводить по пяти образцам), уложить образцы в дистиллированную воду при температуре 95 °С, через определенное время t слить воду, встряхнуть от воды, взвесить мокрые образцы W_t (осреднение веса по пяти образцам). Рассчитать гигроскопичность материала M_t через следующую формулу:

$$M_t = \frac{W_t - W_i}{W_i} \times 100\%$$

Анализ и измерение

Измерить вязкость связующего вращательным вязкозиметром NDJ-8s.

На универсальной измерительной машине INSTRON-1185 измерить прочность образцов из КМУ на растяжение по государственному стандарту GB2568-1995; измерить изгибную прочность и прочность на межслоевой сдвиг по государственному стандарту GB3356-82 и JC/T773-1996; измерить прочностные характеристики NOL — кольца КМУ по государственному стандарту GB/T1458-1988; измерить теплостойкость горячим анализатором движения (Rheometric Sci-entific компания-DMTA V) при частоте 1 Hz и скорости нагрева 10 °С/мин.

Анализ полученных результатов

Конструкционные свойства полимерных матриц

В качестве полимерных матриц выбраны классические эпоксидные связующие TDE-85 и CYD-128, отвердитель- MeTHPA.

В таблице 1 представлены исследованные механические свойства полимерных матриц (прочность на растяжение, слоевой сдвиг (ILSS) односторонних КМУ Т800), и сравнение ILSS КМУ Т800 с КМУ Т300 и Т700.

Из таблицы 1 видно, что различные полимерные матрицы мало влияют на сдвиговую прочность (ILSS) КМУ Т300 и Т700, а больше влияют на сдвиговую прочность (ILSS) КМУ Т800. Сдвиговая прочность ILSS КМУ Т800/CYD-128 самая низкая, свойство интерфазы самое плохое.

После применения TDE-85 свойство интерфазы КМУ Т800 резко увеличивается.

Таблица 1

Механические свойства полимерных матриц и КМУ

Соотношение объемов матриц TDE-85/CYD-128	Прочность на растяжение полимерных матриц, МПа	Элонгация разрушения полимерных матриц, %	Модуль упругости при растяжении полимерных матриц, МПа	КМУ — ILSS/MPa		
				T300	T700	T800
0/100	59	2,3	1970	78	75	67
40/60	64	2,8	2413	80	74	88
60/40	71	3,9	2602	81	73	92
80/20	61	2,8	2014	77	69	77
100/0	65	2,7	2810	82	77	81

Также наблюдается, что ассоциативное применение двух связующих обеспечивает взаимосвязь между жесткостью и вязкостью, поэтому дальше необходимо исследовать механические свойства полимерных матриц и их влияние на КМУ при разных отношениях двух связующих.

При 60-процентном объеме TDE-85 и 40-процентном объеме CYD-128 значение сдвиговой прочности (ILSS) однонаправленного КМУ Т800 самое высокое, равное 92 МПа; дальнейшее увеличение доли связующего TDE-85 приводит к уменьшению ILSS.

С увеличением доли связующего TDE-85 (при ответственном увеличении количества отвердителя) уменьшается прочность полимерных матриц и соответственно КМУ. Но при этом можно добиться других лучших свойств связующего.

Влияние модифицирования на увеличение вязкости полимерных матриц

Углеродное моноволокно Т800 имеет маленький унифилярный диаметр и полированную поверхность. Чтобы быстрее пропитать углеродные волокна Т800 полимерными матрицами во время формования КМУ, требуется малая вязкость полимерных матриц.

Кроме того, необходимо, чтобы у полимерной матрицы была нужная вязкость, чтобы избежать раннего разрушения полимерных матриц при нагружении КМУ Т800. Элонгация разрушения полимерных матриц с отвердителем MeTHPA составляет менее 4%, форма разрушения — хрупкий разрыв, поэтому необходимо увеличить пластичность матриц, что приведет к увеличению и прочности КМУ.

Уменьшение вязкости матриц можно добиться применением малоклейкого жидкого пластификатора, такой процесс одновременно увеличивает пластичность матриц.

ВЛИЯНИЕ МАТРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ T800, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МОКРОЙ НАМОТКИ

По результатам эксперимента представлена таблица 2, из которой видно, что пластификатор влияет на матрицы и материал КМУ T800 в целом. Эксперименты показали, что когда пластификатор составляет 10 долей в связующем, механические свойства матрицы и КМУ T800 повышаются, прочность на растяжение цилиндрического образца составляет 2513 МПа. При дальнейшем увеличении доли пластификатора прочность при растяжении и модуль упругости полимерных матриц уменьшаются, что ведет к уменьшению свойств и КМУ T800. Результаты эксперимента показывают, что значение (доля) пластификатора должно лежать в таких пределах, чтобы обеспечить элонгацию разрушения полимерных матриц в пределах 4-5%.

Таблица 2

Влияние пластификатора на матрицу и КМУ T800

Пла-сти-фика-тор; Phr	Вяз-кость при ка-меральной темпе-ратуре, Pa·s	Проч-ность при рас-тяжении, МПа	Моду-ль упру-гости при рас-тяже-нии, Па	Элон-гация раз-рушения поли-мерных матриц, %	ILSS, МПа	Проч-ность на рас-тяже-ние ци-линдра, МПа
0	0,538	68	2631	3,8	92	2328
10	0,454	82	2525	4,7	101	2513
20	0,395	79	1912	6,1	93	2466

Вязкость и жизнестойкость полимерных матриц

При формовании полимерных композиционных изделий из КМ, подготовленных к формованию методом мокрой намотки, требуются малая вязкость и достаточное время жизнеспособности полимерных матриц, также необходимо обеспечить стабильность вязкости полимерных матриц во время процесса формования. Если жизнеспособность полимерных матриц (связующего) будет короткой, то происходит резкое увеличение вязкости полимерных матриц, что приводит к плохой пропитке углеродных волокон, что в конечном итоге влияет на качество КМУ.

Анализ влагостойкости и теплостойкости для КМУ T800

В работе проведены опыты на влагостойкость и теплостойкость для разных матриц КМУ T800, а также проведено сравнение с матрицей TDE-85 КМУ T800 в дистиллированной воде при 95 °C. На рис. 1 представлен график зависимости гигроскопичности от времени t для двух КМУ: после выдерживания в воде в течение 150 часов гигроскопичность КМУ со сливной матрицей равна 0,92%, что значительно меньше гигроскопичности КМУ с матрицей TDE-85.

После выдержки в воде матрица пластифицирует, прочность матрицы уменьшается, что ведет к уменьшению ILSS и прочности на изгиб.

В табл. 3 показано, что после 150 часов выдержки КМУ в дистиллированной воде при температуре 95 °C сохранение прочности при изгибе КМУ со смешанной матрицей составляет 71%, сдвиговой прочностью ILSS — 82% и модуля упругости — 89%. Эти экспериментальные результаты говорят об отличной влагостойкости и теплостойкости полимерных матриц.

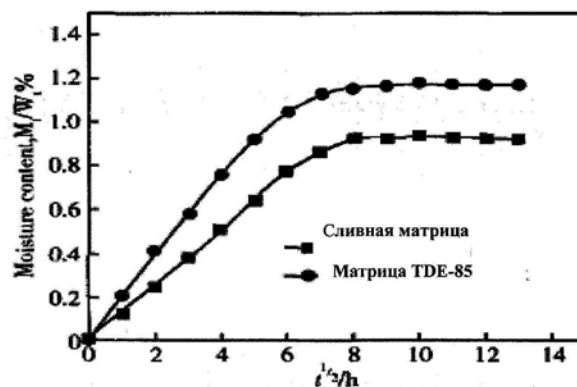


Рис. 1. График гигроскопичности двух КМ в дистиллированной воде при температуре 95 °C

Таблица 3

Механические свойства КМУ T800 после 150 ч. выдержки в воде

Условия проведения испытания	Прочность при изгибе; МПа	Модуль упру-гости при изгибе; GPa	Сдвиговая прочность ILSS; МПа
До погружения в воду	1562	159	102
После погружения в воду	1100	141	83
Сохранение свойств; %	72	88	82

Вывод

1. Материалы матриц оказывают существенное влияние на межслоевую сдвиговую прочность КМУ T800;
2. Некоторые пластификаторы могут увеличивать свойства интерфазы КМУ T800 со смешанными полимерными матрицами, доводить значения сдвиговой прочности ILSS до 101 МПа, прочности на растяжение цилиндрического образца до 2513 МПа.
3. Такая матрица имеет низкую вязкость и большую жизнеспособность при комнатной температуре.
4. После 150 часов выдержки в воде при температуре 95 °C гигроскопичность КМУ T800 мала и сохранение механических свойств высокая.
5. После 150 часов выдержки в воде при температуре 95 °C КМУ T800 имеет отличные характеристики влагостойкости и теплостойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусева Р. И. Вопросы технологии переработки полимерных композитов в изделия: Учеб. пособие. — Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный техн. университет, 1998. — 115с.
2. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении/Научные редакторы А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. — М.: Готика, 2003. — 516 с.
3. Large tow carbon fiber benefits sporting goods [J]. Reinforced plastics, 1999, (3).—3 p.
4. Zeng Jinfang, Qiao shengru, Qiu Zheming, et al. Effect of fiber surface treatment on shear properties of carbon composites [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2002.—5p
5. Guo Huiling, Zhong Weihong, Zhang Zuoguang, et al. Characterization and analysis on several carbon fibers [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001.—8 p.
6. Chen Xiangbao. Development of advanced polymer composites [J]. Journal of Aeronautical Material, 2000. — 4p.
7. Ramosa J A, Paganib N, Riccardib C Cet al. Cure kinetics and shrinkage model for epoxy-amine systems [J]. polymer, 2005.—10 p.

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

FLEET AND SHIPBUILDING

Чижиумов С. Д.
S. D. Chizhiumov

05.08.06

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СУДНА НА ВОЛНЕНИИ MATHEMATICAL MODEL OF SHIP DYNAMICS IN A SEAWAY



Чижиумов Сергей Демидович — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Кораблестроение» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск

на Амуре). E-mail: chizhium@rambler.ru.

Sergey D. Chizhiumov — PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Shipbuilding Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: chizhium@rambler.ru

Аннотация: Представляются математическая модель и численный алгоритм анализа динамики судна в условиях волнения. Движение волн моделируется заданием движения волнопродуктора. Численное интегрирование уравнений движения выполняется методом Рунге-Кутты. Потенциальные поля скоростей и ускорений жидкости в каждый момент времени определяются с помощью метода граничных элементов с дискретизацией всех границ (смоченной поверхности судна, свободной поверхности воды и поверхности волнопродуктора). Применяется процедура итерационного уточнения потенциала ускорений, позволяющая корректно учесть закон сохранения гидродинамического равновесия.

Summary: The paper presents a mathematical model and numerical algorithm for analysis of a ship dynamics in a seaway. Storm waves are simulated by setting of wavemaker motion. Numerical integration of motion equations is executed by a Runge-Kutta method. The potential fields of water velocity and acceleration at each moment are determined using the boundary element method and with sampling of all boundaries (wetted surface of a ship, free surface of water and surface of a wavemaker). The iterative procedure of acceleration potential correlation is applied for correct accounting of the conservation law of hydrodynamic equilibrium.

Ключевые слова: Метод граничных элементов, волны, судно, динамика, потенциал ускорений.

Keywords: boundary element method, waves, ship, dynamics, acceleration potential.

Введение

Проблема определения параметров движения судна на штормовой волне — одна из наиболее трудных и одновременно актуальных проблем, связанных с безопасностью судна.

В последние десятилетия были значительно развиты компьютерные технологии анализа морского волнения и качки судов на волнении, получившие обобщённое название «численный волновой бассейн» — Numerical Wave Tank [7]. Однако по настоящее время существуют проблемы внедрения этих технологий в практику проектирования и эксплуатации морской техники, связанные с вычислительными затратами и достоверностью результатов расчётов.

В работах [3; 4; 5; 6] была предложена численная методика анализа качки судна на основе метода граничных элементов, в которой введение допущения о неизменности формы волновой поверхности от присутствия судна позволило существенно сократить вычислительные затраты. В данной работе описывается методика, свободная от этого допущения, позволяющая получить более достоверные результаты. В ней применяется процедура итерационного уточнения потенциала ускорений [7], позволяющая корректно учесть закон сохранения гидродинамического равновесия.

Общие уравнения динамики судна

Введём две декартовы системы координат [2]: 1) неподвижную $Oxyz$; 2) подвижную, связанную с судном $G\xi\eta\zeta$. Плоскость Oxy неподвижной системы совпадает с невозмущённой поверхностью моря, ось Z направлена вниз. Начало координат корабельной системы G находится в центре тяжести судна, а оси направлены: ξ — в нос; η — на правый борт; ζ — на днище судна. Для удобства представления векторов с применением матриц их иногда записывают в различных формах. Примеры записи координат и их компонентов x, y, z и ξ, η, ζ :

$$x = x(x, y, z) = x(x_1, x^2, x^3) = \{x\};$$
$$\eta = \eta(\xi, \eta, \zeta) = x(\eta_1, \eta^2, \eta^3) = \{\eta\}.$$

Системы координат связаны между собой следующей зависимостью

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_g + \mathbf{x}_\theta = \mathbf{x}_g + \mathbf{L}\boldsymbol{\eta}$$

или $\{x\} = \{x_g\} + [L]\{\eta\}$, (1)

где

$$x_g = \begin{Bmatrix} x_{g1} \\ x_{g2} \\ x_{g3} \end{Bmatrix}; \quad L = [L] = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix};$$

$l_{ij} = \cos(x_i, \eta_j)$ — направляющие косинусы. Вектор x_g определяет центр тяжести G, а вектор x_g — текущую точку судна P относительно центра тяжести в общей системе координат.

Для составления уравнений движения введём также систему обобщённых координат, в качестве которых примем линейные и угловые перемещения (см. рис. 1):

$$q = q(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) = q(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \phi, \psi, \chi). \quad (2)$$

Корабельная система координат движется вместе с судном с поступательной $v_g = v_g(v_{g1}, v_{g2}, v_{g3})$ и угловой $w = w(w_1, w_2, w_3)$ скоростью.

При наличии корабельной системы координат, совершающей произвольное движение (то есть неинерциальной системы), дифференцирование по времени в неподвижной системе отсчёта должно выполняться в соответствии с правилом [2; 7]:

$$d/dt = d'/dt + w \times,$$

где d' означает дифференцирование в подвижной системе координат при фиксированном положении осей в пространстве.

Используя это правило, получим векторы скорости и ускорения произвольной точки P в виде:

$$v = dx/dt = \dot{x} = \dot{x}_g + \dot{x}_\theta = v_g + d'x_\theta/dt + \omega \times x_\theta, \quad (3)$$

$$a = \ddot{x} = \ddot{x}_g + \ddot{x}_\theta = a_g + d'^2x_\theta/dt^2 + \omega \times d'x_\theta/dt + \dot{\omega} \times x_\theta + \omega \times d'x_\theta/dt + \omega \times (\omega \times x_\theta), \quad (4)$$

где a_g — поступательное ускорение, $\dot{\omega} \times x_\theta$ — танген-

циальное ускорение (здесь учтено, что $\dot{\omega} = d'\omega/dt$); $\omega \times (\omega \times x_\theta)$ — центробежное ускорение, d'^2x_θ/dt^2 — ускорение точки P в подвижной системе координат; $2\omega \times d'x_\theta/dt$ — кориолисово ускорение.

Уравнения поступательного и вращательного движений судна с учётом перехода от корабельной системы координат:

$$m a_g = m d'v_g/dt + \omega \times m v_g = d'Q/dt + \omega \times Q = F,$$

$$I \dot{\omega} = I d'\omega/dt + \omega \times I \omega = d'H/dt + \omega \times H = M, \quad (5)$$

где m, I — тензоры инерции и моментов инерции судна:

$$m = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}; \quad I = \begin{bmatrix} I_{\xi\xi} & I_{\xi\eta} & I_{\xi\zeta} \\ I_{\eta\xi} & I_{\eta\eta} & I_{\eta\zeta} \\ I_{\zeta\xi} & I_{\zeta\eta} & I_{\zeta\zeta} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Q — количество движения, H — момент количества движения, F — внешняя сила, действующая на судно, M — момент внешних сил; m — масса судна, I_{ij} — моменты инерции судна. В проекциях на оси корабельной системы координат получим:

$$m a_{\xi\xi} = m(\dot{v}_{\xi\xi} + v_{\xi\zeta} \omega_\eta - v_{\xi\eta} \omega_\zeta) = F_\xi,$$

$$m a_{\xi\eta} = m(\dot{v}_{\xi\eta} + v_{\xi\xi} \omega_\zeta - v_{\xi\zeta} \omega_\xi) = F_\eta,$$

$$m a_{\xi\zeta} = m(\dot{v}_{\xi\zeta} + v_{\xi\eta} \omega_\xi - v_{\xi\xi} \omega_\eta) = F_\zeta,$$

$$I_{\xi\xi} \dot{\omega}_\xi + (I_{\xi\xi} - I_{\xi\eta}) \omega_\xi \omega_\eta + I_{\xi\eta} (\dot{\omega}_\eta - \omega_\xi \omega_\xi) + I_{\xi\zeta} (\dot{\omega}_\zeta + \omega_\xi \omega_\zeta) + I_{\xi\zeta} (\omega_\xi^2 - \omega_\eta^2) = M_\xi,$$

$$I_{\eta\xi} \dot{\omega}_\xi + (I_{\xi\xi} - I_{\xi\eta}) \omega_\xi \omega_\eta + I_{\xi\eta} (\dot{\omega}_\xi - \omega_\xi \omega_\xi) + I_{\eta\eta} (\dot{\omega}_\eta + \omega_\xi \omega_\zeta) + I_{\eta\zeta} (\omega_\xi^2 - \omega_\zeta^2) = M_\eta,$$

$$I_{\zeta\xi} \dot{\omega}_\xi + (I_{\xi\xi} - I_{\xi\zeta}) \omega_\xi \omega_\zeta + I_{\xi\zeta} (\dot{\omega}_\zeta - \omega_\xi \omega_\zeta) + I_{\xi\zeta} (\dot{\omega}_\zeta + \omega_\xi \omega_\zeta) + I_{\zeta\zeta} (\omega_\xi^2 - \omega_\eta^2) = M_\zeta.$$

Уравнение движения можно записать в обобщённом виде:

$$m_S \ddot{q} + b = F \quad (7)$$

или в развёрнутом матричном виде:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{\xi\xi} & I_{\xi\eta} & I_{\xi\zeta} \\ 0 & 0 & 0 & I_{\eta\xi} & I_{\eta\eta} & I_{\eta\zeta} \\ 0 & 0 & 0 & I_{\zeta\xi} & I_{\zeta\eta} & I_{\zeta\zeta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{\xi\xi} \\ a_{\xi\eta} \\ a_{\xi\zeta} \\ \dot{\omega}_\xi \\ \dot{\omega}_\eta \\ \dot{\omega}_\zeta \end{Bmatrix} +$$

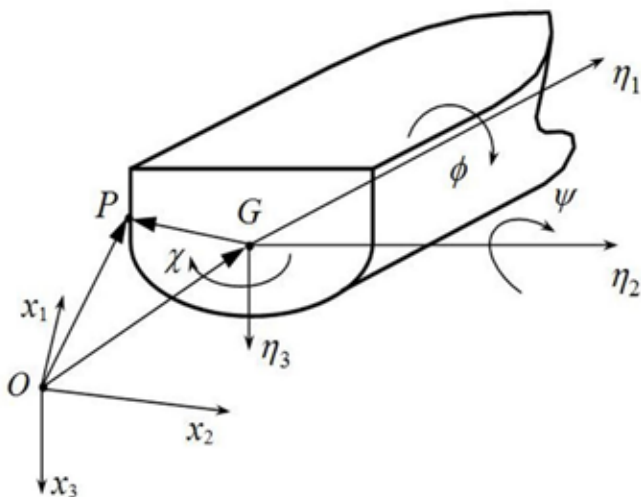


Рис. 1. Системы координат

$$+ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ (I_{xx} - I_{yy})\omega_x\omega_z - I_{yy}\omega_x\omega_z + I_{xx}\omega_x\omega_z + I_{yz}(\omega_x^2 - \omega_z^2) \\ (I_{yy} - I_{xx})\omega_x\omega_z - I_{yz}\omega_x\omega_z + I_{yy}\omega_x\omega_z + I_{xx}(\omega_x^2 - \omega_z^2) \\ (I_{yy} - I_{xx})\omega_x\omega_z - I_{xx}\omega_x\omega_z + I_{yz}\omega_x\omega_z + I_{yy}(\omega_x^2 - \omega_z^2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix},$$

где m_s — матрица инерции (масс) судна; $\ddot{\mathbf{q}}$ — вектор обобщённых ускорений, \mathbf{b} — так называемый гироскопический момент; \mathbf{F} — вектор обобщённых внешних сил.

В правой части уравнения движения (7) сгруппированы внешние силы и моменты, включающие: силы тяги F_T ; вес судна F_G ; гидродинамические и гидростатические силы, обусловленные взаимодействием судна с идеальной жидкостью F_W ; не потенциальные силы сопротивления, обусловленные вязкостью жидкости и образованием вихрей F_F :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_W + \mathbf{F}_F. \quad (8)$$

Тяговая нагрузка F_T задаётся в зависимости от параметров двигателей и движителей.

Следует отметить, что разделение гидродинамических сил на составляющие F_W и F_F является условным. Процессы обтекания судна вязкой жидкости (обычно сложные, включающие ламинарные, турбулентные и переходные потоки, крупные вихри, волнообразование и разрушение волн, кавитацию) с трудом поддаются строгому математическому описанию. В настоящее время существуют методики и компьютерные программные средства, принципиально позволяющие выполнять анализ гидродинамики вязкой жидкости на основе решения уравнений Навье — Стокса, в том числе для турбулентных течений. Тем не менее, в задачах динамики судов на волнении такие средства требуют слишком больших вычислительных затрат. Кроме того, существуют разные численные модели турбулентности, пригодные для соответствующих режимов течений. Но при качке судна на штормовых волнах характер течения вокруг различных его частей постоянно изменяется. При анализе такого нестационарного процесса необходима смена разных моделей в различных областях, что приводит к резкому усложнению численных методик.

В связи с этим в большинстве практических задач качки судна используется допущение, что гидродинамические силы инерционной и вязкостной природы можно определять отдельно. При этом силы F_W находятся из решения задачи динамики идеальной жидкости. Для вычисления вязкостного сопротивления F_F существуют различные приближённые методики, основанные на результатах экспериментов и опыте эксплуатации судов.

Рассмотрим далее определение F_W , но предварительно отметим следующее. Известно, что в большинстве задач качки судов оправдывает себя модель безвихревого (потенциального) течения. В этом случае течение идеальной жидкости в односвязной области полностью характеризуется потенциалом скорости (однозначной функцией координат и времени).

Строгая теория нестационарного потенциального течения основана на теоремах Томсона и Лагранжа. Теорема Томсона о циркуляции заключается в том, что если объём идеальной жидкости находится под действием потенциальных массовых сил, то циркуляция скорости по любому замкнутому контуру остаётся неизменной во всё время движения. Следствием этой теоремы является теорема Лагранжа, доказывающая, что если объём идеальной жидкости находится под действием потенциальных массовых сил и в безвихревом потенциальном движении, то он останется в безвихревом потенциальном движении и в последующие моменты времени. В частном случае, если движение жидкости начинается из состояния покоя, то оно будет безвихревым и потенциальным.

Для определения сил F_W , действующих на судно, следует проинтегрировать давления p по смоченной поверхности судна:

$$\mathbf{F}_W = \int_{S_s} p \mathbf{n} dS \quad \mathbf{M}_W = \int_{S_s} p \mathbf{n} \times \mathbf{r} dS, \quad (9)$$

где F_W и M_W — гидродинамические сила и момент; \mathbf{n} и \mathbf{r} — нормаль к поверхности судна и вектор положения точки поверхности относительно начала корабельной системы координат; S_s — смоченная поверхность судна.

Давление в идеальной жидкости можно получить из интеграла Коши — Лагранжа:

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi)^2 + gz \right) = -\rho \Phi - \rho gz, \quad (10)$$

где ρ — плотность жидкости; φ — потенциал скорости; t — время; g — ускорение свободного падения; Φ — потенциал ускорения [7], состоящий из линейной ($\varphi_t = \partial \varphi / \partial t$) и нелинейной ($v^2/2$) частей.

Для определения потенциальных функций φ и φ_t большое значение имеет теорема о существовании и единственности потенциального поля: если в каждой точке границы односвязного объёма однозначно заданы либо потенциал, либо его производная по нормали к границе, то внутри такого объёма существует поле с однозначным значением потенциала в любой точке. Из однозначности значения $\partial \varphi / \partial n$ на границе следует требование к её гладкости (отсутствию углов).

Поле скоростей жидкости в фиксированный момент времени определяется решением смешанной

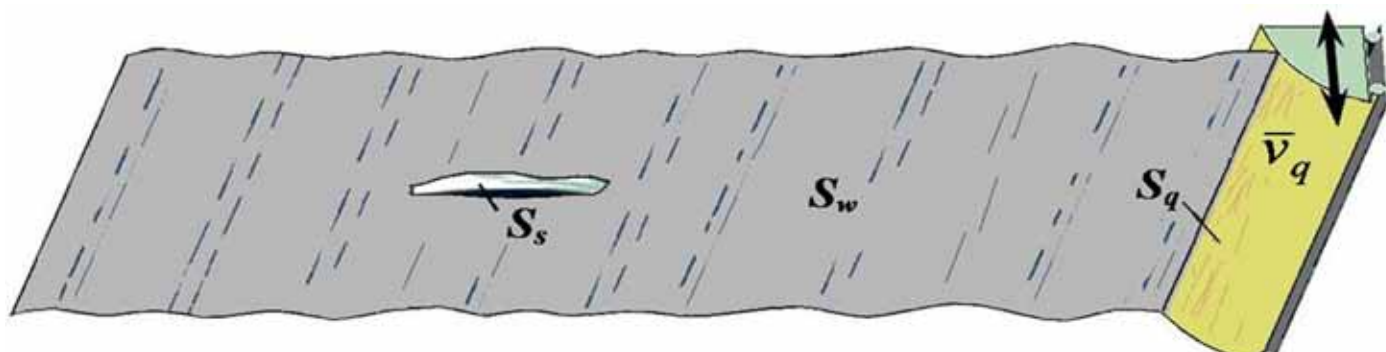


Рис. 2. Совместная модель волнообразования и качки судна

краевой задачи для уравнения Лапласа:

$$\Delta \varphi(x, y, z) = 0 \quad \text{в} \quad \Omega, \quad (11)$$

$$\varphi(x, y, z) = \bar{\varphi}_w, \quad \text{на} \quad S_w, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial n} = \bar{v}_s, \quad \text{на} \quad S_s, \quad (13)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \varphi = 0; \quad \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{на} \quad S_\infty, \quad (14)$$

где Ω — область жидкости, $S = S_s + S_w + S_\infty$ — граница области Ω , состоящая из смоченной поверхности судна S_s , свободной поверхности S_w и условной границы S_∞ на большом удалении R от судна; $\bar{\varphi}_w$ и \bar{v}_s — предварительно определяемые значения потенциала скорости и нормальной составляющей скорости на соответствующих участках границы. Определение $\bar{\varphi}_w$ и \bar{v}_s будет рассмотрено далее.

При наличии дна или твердых стенок S_b , ограничивающих объём жидкости, условие (13) следует применить к этим границам с учетом их неподвижности: $\bar{v}_b = 0$.

Волновое движение жидкости можно задать путём введения некоторой подвижной части границы S_q — волнопродуктора (см. рис. 2). На этой границе вводится условие (13) с заданным движением $\bar{v}_q(t)$.

Уравнение Лапласа (11) для потенциала скорости жидкости является следствием закона сохранения массы и выводится из уравнения неразрывности в случае потенциального течения. Для определения линейной части потенциала ускорения φ_t также может быть использована система (11) — (14) — в ней необходимо только заменить φ на φ_t [7]. При этом уравнение Лапласа относительно φ_t выражает закон

сохранения гидродинамического равновесия и закон сохранения энергии (так как для вычисления силы F_w рассматривается консервативная система, то есть течение идеальной жидкости полагается без потери энергии).

Прежде чем решать систему уравнений (11) — (14) для функций φ и φ_t , необходимо получить выражения для граничных условий на свободной поверхности (12) и на смоченной поверхности судна (13), то есть $\bar{\varphi}_w$, \bar{v}_s , $\bar{\varphi}_w$ и \bar{v}_s . Очевидно, что эти условия в нестационарной задаче изменяются во времени и определяются движением судна и поверхности воды. Поэтому в конкретный момент времени t они вычисляются после решения уравнений движения (7) — (10) для предыдущих моментов времени.

Для решения уравнений движения требуется задать начальные условия (в момент времени t_0): положение судна и других границ, условия (12) и (13). При этом если движение начинается из состояния покоя, то $\bar{\varphi}_w(t_0) = 0$.

В последующие моменты времени t потенциал скорости на свободной границе можно вычислить с применением конечных разностей [3]:

$$\bar{\varphi}_w(t) = \varphi_w(t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^t \frac{d\varphi}{dt} dt \approx \varphi_w(t_{i-1}) + \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)_{w(t_{i-1})} \cdot \Delta t,$$

где Δt — шаг между расчётными моментами времени. В этой формуле пока неизвестна скорость изменения потенциала в момент времени t_{i-1} . Определим её (индексы пока для краткости опустим):

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \varphi_t + (\nabla \varphi)^2.$$

На свободной поверхности воды $p = 0$. Отсюда из (10) получим:

$$\varphi_t = \bar{\varphi}_{tw} = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_w)^2 - gz, \quad (15)$$

Тогда $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{2}(\nabla\varphi)^2 - gz$. В результате для граничного условия (12) на свободной поверхности получим:

$$\bar{\varphi}_{wi} \approx \varphi_{w(i-1)} + \left(\frac{1}{2}(\nabla\varphi)^2 - gz \right)_{w(i-1)} \Delta t, \quad (16)$$

Для кинематического граничного условия (13) на смоченной поверхности судна определим нормальные скорости и ускорения точек этой поверхности с учётом (3) и (4):

$$\bar{v}_s = \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_g + \mathbf{d}'\mathbf{x}_\theta / dt + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}_\theta),$$

$$v_g = \mathbf{n} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{a}_g + d^2\mathbf{x}_\theta / dt^2 + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{d}'\mathbf{x}_\theta / dt + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{x}_\theta + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}_\theta)) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2}(\nabla\varphi)^2 \right).$$

С учётом ортогональности векторов \mathbf{n} и $\mathbf{d}'\mathbf{x}_\theta / dt$ эти выражения могут быть приведены к виду [7]:

$$\bar{v}_s = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_g + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}_\theta), \quad (17)$$

$$v_{ts} = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{a}_g + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{x}_\theta) + q, \quad (18)$$

где $q = \mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}_\theta) + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{d}'\mathbf{x}_\theta / dt) - k_n (d'\mathbf{x}_\theta / dt)^2 - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2}(\nabla\varphi)^2 \right)$, (19) k_n — нормальная кривизна поверхности судна вдоль линии тока, $\mathbf{d}'\mathbf{x}_\theta / dt = \nabla\varphi - \mathbf{v}_g - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}_\theta$. В формуле (18) первое слагаемое соответствует ускорению плавающего тела, а слагаемые в (19) можно вычислить, определив поле скоростей жидкости.

Численный волновой бассейн

Практическая реализация математической модели, рассмотренной в п. 2.1, без дополнительных упрощений возможна только с применением компьютерного моделирования. Методическое и программное обеспечение, реализующее подобные математические модели, получило обобщённое название «численный волновой бассейн» (Numerical Wave Tank).

В основе численного волнового бассейна лежат численные методы и алгоритмы решения уравнений

движения (7) — (10) с начальными условиями (задачи Коши) и уравнений, выражающих законы сохранения для идеальной жидкости (краевой задачи для уравнения Лапласа (11) — (14)).

Применение метода граничных элементов.

Потенциальные линейные функции φ и φ_t в любой момент времени должны удовлетворять уравнениям (11) — (14). Допустим, что условия (14) выполняются. Тогда смешанная краевая задача для уравнения Лапласа относительно функции φ может быть записана в виде:

$$\Delta\varphi(x) = 0 \quad \text{в } \Omega,$$

$$\varphi(x) = \bar{\varphi} \quad \text{на } S_\varphi,$$

$$\frac{\partial\varphi(x)}{\partial n} = \bar{v} \quad \text{на } S_v,$$

где x — некоторая точка области Ω с декартовыми координатами (x_1, x_2, x_3) , $S = S_\varphi + S_v$ — граница области Ω , состоящая из частей, на которых заданы соответственно $\bar{\varphi}$ и \bar{v} .

Существуют способы решения данной задачи, например, методом Бубнова-Галеркина с преобразованием интегралов по объёму к интегралам по границам по теореме Остроградского-Гаусса [1]. В результате можно получить граничное интегральное уравнение:

$$c(\xi)\varphi(\xi) + \int_{S_\varphi} \bar{\varphi}(x)v^*(\xi,x)dS(x) + \int_{S_v} \varphi(x)v^*(\xi,x)dS(x) =$$

$$= \int_{S_\varphi} v(x)\varphi^*(\xi,x)dS(x) + \int_{S_v} \bar{v}(x)\varphi^*(\xi,x)dS(x)$$

или

$$c(\xi)\varphi(\xi) + \int_S \varphi(x)v^*(\xi,x)dS(x) = \int_S v(x)\varphi^*(\xi,x)dS(x) \quad (20)$$

где ξ — некоторая точка области Ω с декартовыми координатами (ξ_1, ξ_2, ξ_3) ; $c(\xi)$ — относительный внутренний угол границы в точке ξ (для точки на гладкой границе $c = 0,5$, для внутренней точки $c = 1$); φ^* — фундаментальное решение для уравнения Лапласа;

$$v^* = \frac{\partial\varphi^*}{\partial n}$$

Фундаментальное решение для оператора Лапласа представляет потенциал источника единичной интенсивности в бесконечной области [1]:

$$\varphi^*(\xi, x) = \frac{1}{4\pi R(\xi, x)}, \quad (21)$$

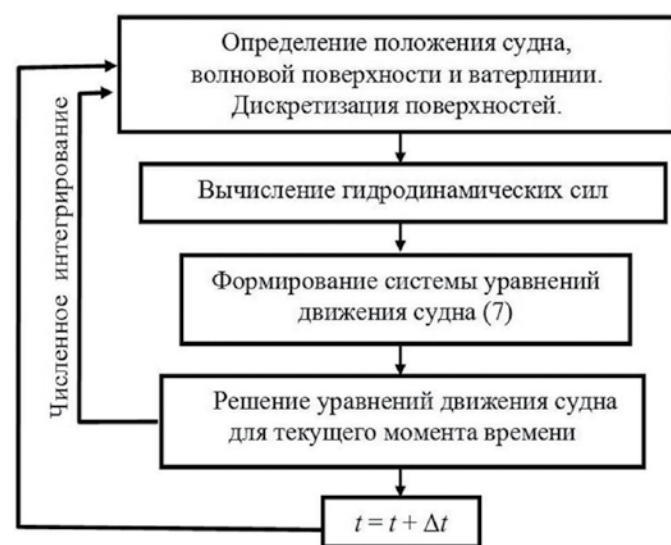


Рис. 3. Обобщённая блок-схема решения задачи о качке судна

где ξ —точка, в которой расположен источник; x —текущая точка (точка наблюдения); R —расстояние между этими точками.

При решении интегрального уравнения (20) не обязательно рассматривать внутренние точки области Ω . Если интерес представляет только решение на границе, то при применении численной процедуры система алгебраических уравнений будет иметь существенно меньший порядок.

Метод граничных элементов (МГЭ) является численным методом решения уравнения (20). Он заключается в следующем [1]: искомые функции $\varphi(x)$ и $v(x)$ (на границах S_v и S_φ соответственно) представляются в виде рядов:

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n \varphi_i u_i(x),$$

$$v(x) = \sum_{i=1}^n v_i u_i(x),$$

где φ_i и v_i —значения искомых функций в заданных точках (узлах) на границе S ; $u_i(x)$ —заданные аппроксимирующие (базисные) функции локального вида (они не равны нулю в малых окрестностях точки i границы S , которые называют граничными элементами); n —число узлов на границе S . Формулы (22) можно представить отдельно для каждого граничного элемента (ГЭ) k в виде:

$$\varphi_k(\eta) = \sum_{j=1}^m \varphi_{jk} u_{jk}(\eta) = \{U\}_k^T \{\varphi\}_k,$$

$$v_k(\eta) = \sum_{j=1}^m v_{jk} u_{jk}(\eta) = \{U\}_k^T \{v\}_k, \quad (23)$$

где η —точка границы в местной нормированной системе координат граничного элемента; m —число узлов элемента.

Подставим (23) в (20). При этом заменим интегралы по границе суммами интегралов по граничным элементам, учитывая свойство локальности базисных функций. Уравнение (20) для каждого узла i принимает вид:

$$c(\xi_i) \varphi(\xi_i) + \sum_{k=1}^N \int_{\Gamma_k} \{U\}_k^T v^*(\xi_i, \eta_k) dS_k \{\varphi\}_k =$$

$$= \sum_{k=1}^N \int_{\Gamma_k} \{U\}_k^T \varphi^*(\xi_i, \eta_k) dS_k \{v\}_k, \quad (24)$$

где N —число элементов. Систему уравнений (24) можно записать в матричном виде:

$$[H] \{\varphi\} = [G] \{v\}, \quad (25)$$

где $[H]$ и $[G]$ —заполненные, несимметричные матрицы порядка $n \times n$; $\{\varphi\}$ и $\{v\}$ —векторы узловых значений функций φ и v .

Алгоритм решения задачи

В качестве исходных данных к расчету динамики судна задаются: граничные поверхности; массовые характеристики и геометрия корпуса судна (в корабельной системе координат); упор винта; движение волно-продуктора; коэффициенты вязкостного сопротивления и др.

Обобщённая блок-схема расчёта представлена на рисунке 3. Интегрирование уравнения движения судна (7) можно выполнить одним из численных методов, например методом Рунге-Кутты.

Гидродинамические силы F_w определяются путём интегрирования давлений по смоченной поверхности судна по формулам (9). Для вычисления давлений используется формула (10). Потенциальное поле скоростей жидкости в каждый момент времени определяется с помощью МГЭ с дискретизацией всех границ (смоченной поверхности судна, прилегающей свободной поверхности воды, поверхностей волнопродуктора и, при ограниченной глубине или ширине расчётного бассейна, его дна или стенок).



Рис. 4. Блок-схема решения задачи о качке судна

В формулу (10) входит линейная часть потенциала ускорений $\varphi_t = \partial\varphi/\partial t$, вычисление которой представляет проблему.

В некоторых простых задачах возможно вычисление этой величины с помощью конечной разности [4; 5; 6]:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} \approx \frac{\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1})}{\Delta t}$$

Однако значение потенциала скорости в фиксированной точке в один из моментов времени (t_i или t_{i+1}) может оказаться неопределённым, если при движении смоченной поверхности эта точка оказывается за пределами области жидкости. Исключить эту неопределённость или уменьшить её влияние можно только приближёнными способами экстраполяции в сочетании с уменьшением Δt и размеров граничных элементов. Этот способ для подвижной границы не гарантирует сходимости процесса численного

расчёта.

Более трудоёмким, но корректным является определение φ_t из решения краевой задачи (11)–(14) — в ней необходимо только заменить φ на φ_t [7]:

$$\Delta\varphi_t(x, y, z) = 0 \quad \text{в } \Omega \quad (26)$$

$$\varphi_t(x, y, z) = \bar{\varphi}_{tw}, \quad \text{на } S_w \quad (27)$$

$$\frac{\partial\varphi_t(x, y, z)}{\partial n} = \bar{v}_{ts}, \quad \text{на } S_s \quad (28)$$

Решается данная задача с помощью МГЭ. Фундаментальное решение типа (21) позволяет автоматически удовлетворить условиям на бесконечности. Для решения этой задачи необходимо предварительно определить граничные условия, то есть значения $\bar{\varphi}_{tw}$ и \bar{v}_{ts} по формулам (15) и (18). Для определения $\bar{\varphi}_{tw}$ вначале должна быть решена краевая задача относительно потенциала скорости.

Для вычисления \bar{v}_{ts} необходимы ускорения судна. Для текущего момента времени они неизвестны. Методы решения этой проблемы можно найти в работе [7]. Наиболее прост итерационный подход, в соответствии с которым на первом итерационном шаге ускорения a_w и w задаются приближённо. В качестве первого приближения удобно использовать значения ускорений на предыдущем шаге по времени.

В результате уточнённая блок-схема численного моделирования движения судна имеет вид, представленный на рисунке 4.

При выборе метода численного интегрирования уравнений движения по времени важно обеспечить устойчивость и достаточную точность вычислений. На практике хорошие результаты даёт метод Рунге-Кутты (четвёртого порядка точности) и метод Рунге-Кутты-Гила (пятого порядка точности). С применением этих методов движение волн и качку судна можно моделировать с удовлетворительной точностью при шаге по времени $\Delta t \leq T_w/20$, где T_w — период волн. Шаг Δt также должен быть согласован с размерами граничных элементов Δx . Ориентировочная оценка:

$$\Delta t \leq 1.6 \sqrt{\frac{\Delta x}{g}}$$

Приведём схему численного интегрирования методом Рунге-Кутты [7]. Для этого введём обозначения: $x_{wj}(t)$ — вектор положения узла волновой поверхности; $\varphi_{wj}(t)$ — потенциал скорости в узле волновой

Коэффициенты	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
Метод Рунге-Кутта	0	$\frac{1}{2}$	0	1	2	2
Метод Рунге-Кутта-Гила	$\frac{1}{2}(\sqrt{2}-1)$	$\frac{1}{2}(2-\sqrt{2})$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}(2+\sqrt{2})$	$2-\sqrt{2}$	$2+\sqrt{2}$

Рис. 4. Блок-схема решения задачи о качке судна

поверхности; $q(t)$, $\dot{q}(t)$, $\ddot{q}(t)$ — векторы перемещения, скорости и ускорения судна; $S(t) = S(x_{wj}(t), q(t))$ — граница расчётной области жидкости, определяемая положением узлов волновой поверхности и судна; $\varphi(S(t))$ и $\varphi_0(S(t))$ — потенциал скорости и потенциал ускорений на границе $S(t)$, полученные по МГЭ.

Численное интегрирование на каждом шаге по времени Δt выполняется в четыре этапа:

— первый этап:

$$\begin{aligned} \Delta x_{wj1} &= \nabla \varphi(S(t)) \Delta t; & x_{wj1} &= x_{wj}(t) + \frac{1}{2} \Delta x_{wj1}; \\ \Delta \varphi_{wj1} &= (-gz_j + \frac{1}{2} (\nabla \varphi(S(t)))^2) \Delta t; & \varphi_{wj1} &= \varphi_{wj}(t) + \frac{1}{2} \Delta \varphi_{wj1}; \\ \Delta \dot{q}_1 &= \ddot{q}(\varphi(S(t)), \varphi_0(S(t))) \Delta t; & \dot{q}_1 &= \dot{q}(t) + \frac{1}{2} \Delta \dot{q}_1; \\ \Delta q_1 &= \dot{q}(t) \Delta t; & q_1 &= q(t) + \frac{1}{2} \Delta q_1; \end{aligned}$$

$S_1 = S(x_{wj1}, q_1)$ — перестроение и разбиение границ;

$\varphi(S_1)$ вычисляется по МГЭ; $\varphi_0(S_1)$ вычисляется по МГЭ;

— второй этап:

$$\begin{aligned} \Delta x_{wj2} &= \nabla \varphi(S_1) \Delta t; & x_{wj2} &= x_{wj}(t) + c_1 \Delta x_{wj1} + c_2 \Delta x_{wj2}; \\ \Delta \varphi_{wj2} &= (-gz_{j1} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi(S_1))^2) \Delta t; & \varphi_{wj2} &= \varphi_{wj}(t) + c_1 \Delta \varphi_{wj1} + c_2 \Delta \varphi_{wj2}; \\ \Delta \dot{q}_2 &= \ddot{q}(\varphi(S_1), \varphi_0(S_1)) \Delta t; & \dot{q}_2 &= \dot{q}(t) + c_1 \Delta \dot{q}_1 + c_2 \Delta \dot{q}_2; \\ \Delta q_2 &= \dot{q}_1 \Delta t; & q_2 &= q(t) + c_1 \Delta q_1 + c_2 \Delta q_2; \\ S_2 &= S(x_{wj2}, q_2) - \text{перестроение и разбиение границ;} \\ \varphi(S_2) &\text{ вычисляется по МГЭ; } \varphi_0(S_2) \text{ вычисляется по МГЭ;} \end{aligned}$$

— третий этап:

$$\begin{aligned} \Delta x_{wj3} &= \nabla \varphi(S_2) \Delta t; & x_{wj3} &= x_{wj}(t) + c_3 \Delta x_{wj2} + c_4 \Delta x_{wj3}; \\ \Delta \varphi_{wj3} &= (-gz_{j2} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi(S_2))^2) \Delta t; & \varphi_{wj3} &= \varphi_{wj}(t) + c_3 \Delta \varphi_{wj2} + c_4 \Delta \varphi_{wj3}; \\ \Delta \dot{q}_3 &= \ddot{q}(\varphi(S_2), \varphi_0(S_2)) \Delta t; & \dot{q}_3 &= \dot{q}(t) + c_3 \Delta \dot{q}_2 + c_4 \Delta \dot{q}_3; \\ \Delta q_3 &= \dot{q}_2 \Delta t; & q_3 &= q(t) + c_3 \Delta q_2 + c_4 \Delta q_3; \\ S_3 &= S(x_{wj3}, q_3) - \text{перестроение и разбиение границ;} \\ \varphi(S_3) &\text{ вычисляется по МГЭ; } \varphi_0(S_3) \text{ вычисляется по МГЭ;} \end{aligned}$$

— четвёртый этап:

$$\begin{aligned} \Delta x_{wj4} &= \nabla \varphi(S_3) \Delta t; & x_{wj}(t+\Delta t) &= x_{wj}(t) + \frac{1}{6} (\Delta x_{wj1} + c_5 \Delta x_{wj2} + c_6 \Delta x_{wj3} + \Delta x_{wj4}); \\ \Delta \varphi_{wj4} &= (-gz_{j3} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi(S_3))^2) \Delta t; \\ \varphi_{wj}(t+\Delta t) &= \varphi_{wj}(t) + \frac{1}{6} (\Delta \varphi_{wj1} + c_5 \Delta \varphi_{wj2} + c_6 \Delta \varphi_{wj3} + \Delta \varphi_{wj4}); \\ \Delta \dot{q}_4 &= \ddot{q}(\varphi(S_3), \varphi_0(S_3)) \Delta t; & \dot{q}(t+\Delta t) &= \dot{q}(t) + \frac{1}{6} (\Delta \dot{q}_1 + c_5 \Delta \dot{q}_2 + c_6 \Delta \dot{q}_3 + \Delta \dot{q}_4); \\ \Delta q_4 &= \dot{q}_3 \Delta t; & q(t+\Delta t) &= q(t) + \frac{1}{6} (\Delta q_1 + c_5 \Delta q_2 + c_6 \Delta q_3 + \Delta q_4); \\ S(t+\Delta t) &= S(x_{wj}, q_3) - \text{перестроение и разбиение границ;} \\ \varphi(S(t+\Delta t)) &\text{ вычисляется по МГЭ; } \varphi_0(S(t+\Delta t)) \text{ вычисляется по МГЭ.} \end{aligned}$$

Коэффициенты c_k в этих формулах определяются по таблице.

ЛИТЕРАТУРА

- Бреббия, К. Методы граничных элементов: Пер. с англ./К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. — М.: Мир, 1987. — 524 с..
- Справочник по теории корабля. Том 2. Статика судов. Качка судов./Под ред. Я.И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 440 с.
- Чижимов, С. Д. Численные модели в задачах динамики судна/С. Д. Чижимов. — Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1999. — 182 с.
- Чижимов, С. Д. Численное моделирование продольной качки судна/С. Д. Чижимов // Вестник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета: Сб. науч. тр. — Комсомольск на Амуре: КНАГТУ, 2004.
- Chizhiumov, S. D. Numerical Modeling of Ship Motion in Heavy Sea Conditions/S. D. Chizhiumov // 6th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium (ISOPE PACOMS-2004). Vladivostok, Russia, September 12-16, 2004.
- Chizhiumov, S. D. Numerical Modeling of Ship Motion in Waves/S. D. Chizhiumov, D. V. Proshukalo // 18th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM—2004). Vladivostok, Russia, October 11-14, 2004.
- Tanizawa, K. The State of Art on Numerical Wave Tank // Proc. 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, Osaka, Japan, 2000—pp. 95-113.

Фукучи К., Кобучи С., Фуруя Т., Араи Ю.
K. Fukuchi, S. Kobuchi, T. Furuya, Yu. Arai

25.00.07

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАВНОВЕСИЯ АДсорБИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
РАЗЖИЖЕННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ
ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИ НЕИДЕАЛЬНОГО АДсорБИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ
И РАСШИРЕННОЙ ФОРМУЛЫ РАДКЕ-ПРАУЗНИЦА**

**PREDICTION OF ADSORPTION EQUILIBRIA FOR MULTI-SOLUTE DILUTE AQUEOUS
SOLUTIONS ON ACTIVATED CARBON USING THE MODEL OF NON-IDEAL ADSORPTION
OF SOLUTIONS AND THE EXTENDED RADKE-PRAUSNITZ EQUATION**

Фукучи К. — д. т. н., профессор, Убского национального технического университета (г. Убе, Япония).

K. Fukuchi — Doctor in Engineering, Professor at the Ube National Technical University (Ube, Japan).

Кобучи С. — д. т. н., Университет Ямагучи (Япония).

S. Kobuchi — Doctor in Engineering, Yamaguchi University (Japan).

Фуруя Т. — д. т. н., Национальный институт передовых научных и производственных технологий (Япония).

T. Furuya — Doctor in Engineering, National Institute for Innovative Scientific and Industrial Technologies (Japan).

Араи Ю. — д. т. н., профессор Университета Киушу (г. Убе, Япония).

Yu. Arai — Doctor in Engineering, Professor at the Kiushu University (Ube, Japan).

Технический перевод — **Анисимова Е. С.**, к. ф. н., доцент.

Technical translation — **Ms. E. S. Anisimova**, PhD in Philology, Associate Professor.

Аннотация: Равновесие при адсорбировании органических однокомпонентных и многокомпонентных растворов необходимо при проектировании очистительных аппаратов, используемых для удаления органических примесей из отработанной воды с помощью активированного угля. Несмотря на значимость равновесия при адсорбировании, процесс адсорбирования многокомпонентных растворов мало изучен. Более того, мало изучен метод прогнозирования и корреляции равновесия при адсорбировании многокомпонентных растворов. В предыдущих работах мы использовали две модели прогнозирования для вычисления равновесия при адсорбировании многокомпонентных водных растворов при помощи активированного угля. Это модели неидеального адсорбирования растворов и расширенная формула Радке-Праузница (Radk—Prausnitz (R-P)).

Summary: Adsorption equilibria of organic single-solutes and multi-solutes are required in the design of purification facilities for removing organic pollutants from waste waters by activated carbon. In spite of its importance, few experimental data and studies have been made on multisolute adsorption equilibria. Furthermore, there are few studies on the method of prediction and correlation of multisolute adsorption equilibria. In our previous works, we had two predictive models for calculating the adsorption equilibria of organic multi-solute aqueous solutions on activated carbon. They are the non-ideal adsorbed solution and the extended Radke-Prausnitz (Radke — Prausnitz (R-P)) equation.

Ключевые слова: Адсорбирование, раствор, многокомпонентный водный раствор, модель, прогнозирование, активированный уголь.

Keywords: adsorption, solution, multi-solute aqueous solution, model, prediction, activated carbon.

Модель неидеального адсорбирования растворов

Модель неидеального адсорбирования растворов была предложена для равновесия адсорбирования (адсорбированная доля (n_i) против концентрации (c_i)) разжиженного водного раствора при помощи активированного угля [1]. Для многокомпонентного раствора модель неидеального адсорбирования представлена следующим образом:

$$c_i = \gamma_i z_i nT (n_{mi,0} \Lambda_{iw}/n_{mT} H_i(w)) \exp(\Lambda_{wi} - 1) \exp(\pi a_i/RT), (1)$$

$$\pi a_i/RT = -(1 + (n_{mT} - n_{mi,0})/nT) \ln \gamma_w z_w, (2)$$

$$\ln \gamma_i = 1 - \ln(\sum_j x_j \Lambda_{ij}) - \sum_k (x_k \Lambda_{ki} / \sum_j x_j \Lambda_{kj}), (3)$$

$$n_{mT} = \sum_i z_i n_{mi,0}, nT = \sum_i n_i, z_i = n_i/nT, x_i = n_i/n_{mT}, (4)$$

где γ — коэффициент активности фазы адсорбции; z — молярная фракция обезвоженного основания; ω — распределение давления; a — отдельная молярная

Фукучи К., Кобучи С., Фуруя Т., Арай Ю. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАВНОВЕСИЯ АДсорБИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАЗЖИЖЕННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИ НЕИДЕАЛЬНОГО АДсорБИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ И РАСШИРЕННОЙ ФОРМУЛЫ РАДКЕ-ПРАУЗНИЦА

область поверхности; R —газовая постоянная; T —абсолютная температура; x —молярная фракция фазы адсорбции; подстрочные знаки o и T обозначают одно- и многокомпонентные растворы. Четыре основных характеризующих параметра ($n_{mi,o}$, $H_i(w)$, Λ_{iw} , Λ_{wi}) могут быть соотнесены с точкой кипения при нормальных условиях t_b , молекулярным весом M и молекулярной областью A_m каждого раствора [2].

Далее параметры Уилсона между раствором i и j адсорбированными молекулами (Λ_{ij} , Λ_{ji}) могут быть соотнесены с точками кипения раствора следующим образом [2; 3]:

$$\ln \Lambda_{ij} = -4.33 + 0.0226 (t_b, i + t_b, j), \quad (5)$$

$$\ln \Lambda_{ji} = 2.17 - 0.0123 (t_b, i + t_b, j), \quad (6)$$

Расширенная формула Радке-Праузница

Радке и Праузниц [7] предложили полуэмпирическую формулу для вычисления равновесия адсорбирования однокомпонентных разжиженных водных растворов при помощи активированного угля:

$$n = ac/[1 + (a/b) c^{1-\beta}] \quad (7)$$

Где n , a , b и β —эмпирические константы; c —молярная концентрация раствора; n —доля адсорбции в растворе; a обозначает константу Генри для адсорбции при низкой концентрации, и b соответствует формуле Фрейндлиха при высокой концентрации. Таким образом, a и b означают интенсивность взаимодействия между адсорбатом и адсорбентом. β —это эмпирический параметр, отражающий зависимость концентрации от доли адсорбции. Формула Лэнгмуира может быть получена при допущении $\beta = 0$.

Формула Радке-Праузница была расширена для многокомпонентных растворов [4; 5; 6]:

$$n_i = a_i c_i / (1 + \sum_j a_{ij} c_j b_{ij}), \quad (8)$$

Для двухкомпонентных растворов в расширенной формуле Радке-Праузница (1) и (2) соответствуют i и j . Для четырехкомпонентных растворов в расширенной формуле Радке-Праузница (1), (2), (3) и (4) соответствуют i и j . Подстрочный знак o обозначает однокомпонентный водный раствор. Параметры a_{io} , a_{ii} и b_{ii} ($i = 1, 2$) могут быть представлены следующим соотношением [4].

$$a_{io} = a, a_{ii} = a/b, b_{ii} = 1 - \beta, \quad (9)$$

Для прогнозирования равновесия адсорбции для двухкомпонентных растворов необходимы параметры шести однокомпонентных и четырех двухкомпонентных растворов. В предыдущей работе [5] параметры однокомпонентных растворов a , b и β могли быть соотнесены с точкой кипения при нормальных условиях t_b и молекулярным весом M раствора.

По аналогии с параметрами однокомпонентного раствора каждый из четырех параметров двухкомпонентного раствора может быть представлен как функция t_b и M .

$$\ln a_{ij} = -17.8 - 0.114 t_b, i - 0.0269 t_b, j + 0.267 M_i + 0.208 M_j, \quad (10)$$

$$\ln a_{ji} = -30.7 - 0.0637 t_b, i - 0.0535 t_b, j + 0.315 M_i + 0.278 M_j, \quad (11)$$

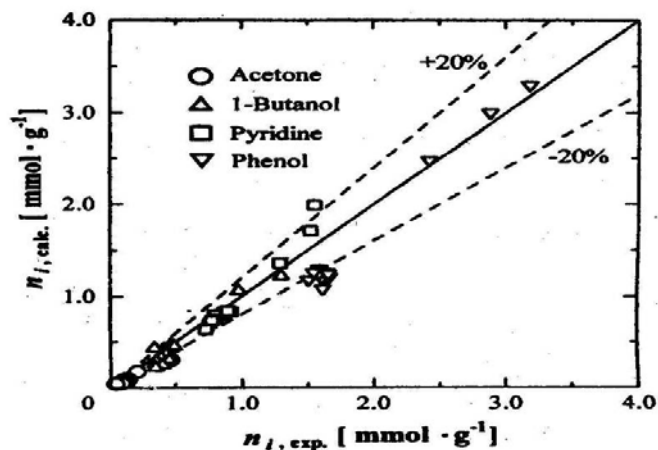


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных с прогнозируемыми результатами адсорбирования четырехкомпонентных растворов

$$\ln b_{ij} = 11.2 + 0.0490 t_b, i + 0.00709 t_b, j - 0.195 M_i - 0.0474 M_j, \quad (12)$$

$$\ln b_{ji} = 9.15 + 0.0506 t_b, i - 0.00334 t_b, j - 0.181 M_i - 0.0153 M_j, \quad (13)$$

Формулы (10)-(13) могут быть применены для вычисления равновесия адсорбирования органических двухкомпонентных разжиженных водных растворов при помощи активированного угля при температуре 25 °C.

Результаты и обсуждение

Результаты прогнозирования при помощи обеих моделей соответствуют экспериментальным данным, полученным при адсорбировании четырехкомпонентных водных растворов на рис. 1 [3; 6].

Представленная процедура может быть применима к ограниченному количеству растворов, таких, как низкомолекулярные органические соединения. Применимость данной процедуры для других соединений должна быть изучена в последующей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fukuchi, K., Kobuchi, S., Arai, Y. Application of vacancy solution theory to adsorption from dilute aqueous solutions. *J. Chem. Eng. Japan*, 1982, 15—pp. 316-318.
2. Fukuchi, K., Arai, Y. Measurement and prediction of adsorption equilibria of organic solutes from dilute aqueous solutions on activated carbon. *Colloids and Surfaces*, 1989, 37—pp. 387-394.
3. Fukuchi, K., Kobuchi, S., Arai, Y. Measurement and prediction of adsorption equilibria of quaternary organic solutes from dilute aqueous solutions on activated carbon. *Fundamentals of Adsorption—Pro. 4th International Conference on Fundamentals of Adsorption*.—Ed. Suzuki, M., Kodansha, Tokyo, 1993—pp. 177-184.
4. Fukuchi, K., Hamaoka, H., Arai, Y. Adsorption equilibria of organic solutes from dilute aqueous solution on activated carbon. *Mem. Fac. Eng., Kyushu Univ.*, 1980, 40—pp. 107-118.
5. Kobuchi, S., Furuya, T., Fukuchi, K., Arai, Y. Prediction of adsorption equilibria for two-solute dilute aqueous solutions on activated carbon using the extended Radke-Prausnitz equation. *J. Chem. Eng. Japan*, 2003, 36—pp. 1123-1126.
6. Kobuchi, S., Furuya, T., Fukuchi, K., Arai, Y. Prediction of adsorption equilibria for multi-solute dilute aqueous solutions on activated carbon using the extended Radke-Prausnitz equation. *J. Chem. Eng. Japan*, 2004, 37—pp. 119-120.
7. Radke, C. J., Prausnitz, J.M. Adsorption of organic solutes from dilute aqueous solution on activated carbon. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1972, 11—pp. 445-451.