

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Цуй Сюй, Гусева Р. И., Ли Вэй, Чжан Линюни, Гао Юй
Cui Xu, R. I. Guseva, Li Wei, Zhang Lingyun, Gao Yu

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

SURFACE ANALYSIS OF HIGH PERFORMANCE CARBON FIBERS AND STUDY ON THEIR MECHANICAL PROPERTIES



Цуй Сюй¹ – доцент, магистр технических наук, зам. декана факультета аэрокосмической техники Шэньянского авиационного технического института, Китай. E-mail: cuixug@163.com.

Mr. Cui Xu – Assistant Professor, Master of Engineering, Deputy Head of the Faculty of Airspace Technology, Shenyang Aviation Technical Institute, China. E-mail: cuixug@163.com.



Гусева Роза Ивановна – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры "Технология самолетостроения", зам. декана самолетостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: r_guseva@knastu.ru

Ms. R.I. Guseva – PhD in Engineering, Assistant Professor, Professor at the Department of Aviation Technology, Deputy Dean of the Aircraft Engineering Faculty, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: r_guseva@knastu.ru

Ли Вэй – доцент Шэньянского авиационного технического института, Китай. E-mail: msk-lw@hotmail.com.

Li Wei – Assistant Professor, Shenyang Aviation Technical Institute, China. E-mail: msk-lw@hotmail.com.

Чжан Линюни – профессор Шэньянского авиационного технического института, Китай. E-mail: zhangly79@163.com

Zhang Lingyun – Professor, Shenyang Aviation Technical Institute, China. E-mail: zhangly79@163.com

Гао Юй – доцент Шэньянского авиационного технического института, Китай. E-mail: gaoyu1971@163.com

Gao Yu – Assistant Professor, Shenyang Aviation Technical Institute, China. E-mail: gaoyu1971@163.com

Аннотация. Проведены оценка составов аппретов, наносимых на волокно, и оценка содержания азота, кислорода и углерода на поверхности раздела волокно-матрица. Оценены адгезионные свойства аппретов на основе эпоксидных связующих для полимерной матрицы и углеродного волокна T700, T800-12K, T800-6K. Результаты позволяют заключить, что от наносимого аппрета и состояния поверхности углеродных волокон в большой степени зависит прочность сцепления на границе волокно-связующее. Применяя обработку угольных волокон аппретами, добиваются повышения механических характеристик композиционных материалов.

Summary. The paper offers analysis of the composition of coupling agents coated upon fiber, and estimation of the content of Nitrogen, Oxygen and Carbon on the boundary surfaces "fiber - matrix". Adhesion properties of the epoxy coupling agents for polymer matrix and carbon fiber T700, T800-12K, T800-6K are estimated. The obtained results show that the applied coupling agent and the condition of the surface of the car-

1. Статья новаторского типа отдела образования провинции Ляо Нин Китая (2008T149) the Project is sponsored by "Liaoning BaiQianWan Talents Program" (2010921081)

2. Статья подготовлена при участии Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия)

bon fiber impact largely adhesion properties on the fiber-coupling boundary. By treatment of carbon fibers with coupling agents improved mechanical properties of composition materials can be obtained.

Ключевые слова: углеродные волокна, поверхности раздела, аппретирование, механические характеристики, адгезия.

Key words: carbon fibers, boundary surfaces, finishing, mechanical properties, adhesion.

Высокопрочные композиционные материалы с углеродным волокном (КМУ) на эпоксидной матрице (CF/EP) имеют высокую удельную прочность и удельный модуль упругости, отличаются стабильностью размеров, низким коэффициентом теплового расширения и рядом уникальных свойств, что позволяет широко использовать их в аэрокосмической технике, например, в твердых оболочках камер сгорания двигателя, в ракетах "Трайидент", Карлик", "Титан -4"(США); в ракетополетителях "М5" (Япония); во французских ракетах "Ариан -5", в российских ракетах и космических аппаратах.

В научной литературе отмечается, что характеристики полимерных композитов зависят от типа наполнителя (волокна или ткани) и матрицы, но и наносимый аппрет на поверхности раздела "волокно – матрица" повышает эффективность свойств полимерного композита [1 - 3].

У полимерного композиционного материала между волокном и связующим образуются пограничные слои, которые обеспечивают более высокие физические и химические связи, и одновременно обеспечивается равномерное перераспределение напряжений между волокнами, предотвращая растрескивание аппрета и матрицы при высокой нагрузке [4].

Многочисленные результаты исследований по обработке поверхности углеродных волокон показывают, что с помощью химических или физических средств обработки увеличивается шероховатость поверхности волокна, улучшается прочность сцепления между волокном и матрицей. Но слишком высокая прочность сцепления может привести к концентрации напряжений на границе раздела и уменьшению вязкости разрушения углеродного волокна, так как оно является хрупким и чувствительным материалом к поверхностным повреждениям. Следовательно, лучший способ повысить сцепление между волокном и матрицей – получить аппрет высокой прочности и высокой вязкости.

Новейшей модификацией угольных композиционных материалов на сегодня являются КМУ с углеродными волокнами T800 и T1000 [5], которые созданы как модификации углеродных волокон T300 и T700.

Для анализа состояния поверхности после нанесения аппрета различных углеродных волокон в работе используется сканирующий электронный микроскоп SEM S-2700 (Япония), инфракрасный спектрометр PE-983 (США), рентгеновский фотоэлектронный спектрометр (XPS)-PH15400 (США), испытательное оборудование GB-6058-85 (КНР) [6-8].

Проведение исследований

1. Определялись составы аппретов для различных углеродных волокон
2. Определялось содержание элементов на поверхностях углеродных волокон после нанесения аппретов.

Эксперименты проходили на углеродных волокнах японской компании "Торейка". В табл. 1 представлены характеристики углеродных волокон. Из таблицы следует, что волокно T1000-12K имеет самую большую прочность (6300 МПа) и самый высокий модуль упругости на растяжение (270 ГПа). Самое низкое значение прочности и модуля упругости зафиксировано у углеродного волокна T700-12K, соответственно прочность 4900 МПа и модуль упругости 230 ГПа.

Основные характеристики углеродных волокон

Углеродные волокна	Линейная плотность, г/км ⁻¹	Плотность, г/см ⁻³	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
T700-12K	810,0	1,80	4900	230
T800-6K	222,0	1,77	5010	265
T800-12K	455,0	1,78	5030	261
T1000-12K	493,3	1,80	6300	270

При исследовании аппретов на поверхностях углеродных волокон T700, T800-6K, T800-12K, T1000 использовался инфракрасный спектрометр (ИК).

Результаты анализа показывают, что аппрет на поверхности углеродного волокна T700 содержит эпоксидную смолу E-51 и малеиновый ангидрид; аппрет на поверхности углеродных волокон T800, T1000 содержит эпоксидную смолу E-51 и фталиевый ангидрид.

С помощью рентгеновского фотоэлектронного спектрометра (XPS) исследовалось содержание отдельных элементов на поверхности углеродных волокон после нанесения аппрета. Интенсивность спектров XPS углеродных волокон (рис. 1) отражает содержание кислорода, азота и углерода на поверхностях углеродных волокон. Численные значения интенсивности спектров элементов приведены в табл. 2.

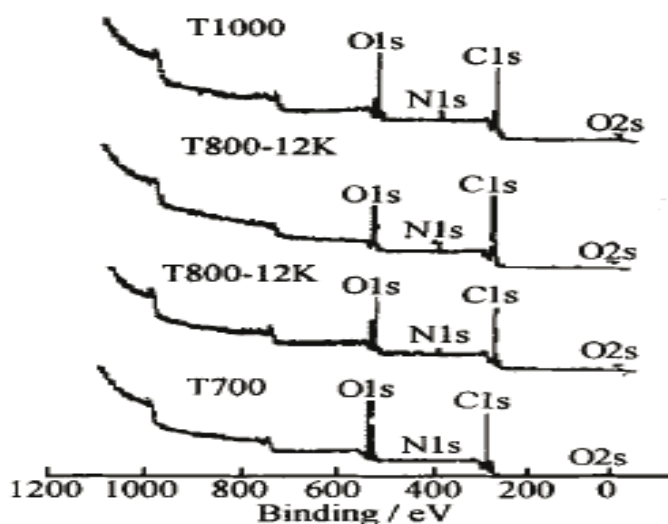


Рис. 1. Интенсивность спектр-элементов на поверхности углеродных волокон (XPS)

Таблица 2

Содержание элементов на поверхности различных углеродных волокон; %

Контролируемые вещества, %	Углеродные волокна			
	T700	T800-6K	T800-12K	T1000
Углерод C1s	76,58	74,20	72,87	78,48
Кислород O1s	23,42	22,09	23,22	18,57
Азот N1s	—	3,71	3,91	2,95

Анализ результатов

1. Анализ значений, приведенных в табл. 2, показывает:

- содержание азота на поверхности у всех волокон низкое, а у углеродных волокон T700 на поверхности вообще не содержится азота;

- у волокон Т800-12К содержание углерода на поверхности ниже, чем у остальных, что говорит о невысокой жесткости и прочности волокна;

- у волокон Т1000 содержание кислорода и азота на поверхности самое низкое. Это говорит о том, что поверхность волокна Т1000 – самая прочная, не рыхлая, высокое содержание углерода на поверхности говорит, что волокно высокомодульное и жесткое.

Следует отметить, что:

- с увеличением содержания углерода на поверхности волокна прочность материала увеличивается;

- присутствие кислорода на поверхности волокна ухудшает механические характеристики материала, так как атомарный кислород внедряется в поверхностные слои волокна, разрыхляет поверхность;

- присутствие азота на поверхности углеродных волокон незначительно, хотя азот повышает твердость и износостойкость поверхности металлов.

С помощью ЭВМ анализировали спектр углеродов Cls в различных волокнах. Выделена граница между поверхностно-активными атомами углерода (граница, где спектр Cls = 285eV) и пассивными атомами углерода (где спектр Cls > 285eV) (рис. 2). Концентрация между активными и пассивными группами углерода для различных волокон приведена в табл. 3.

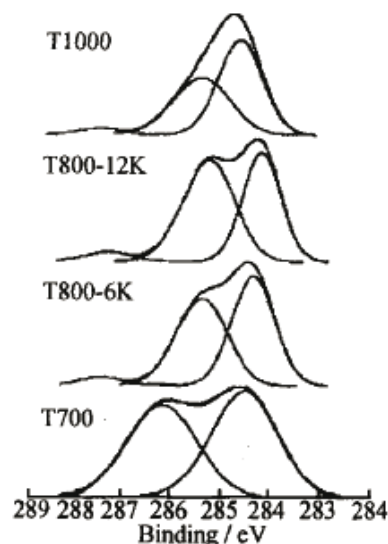


Рис. 2 Спектры углерода Cls на поверхностях углеродных волокон (XPS)

Таблица 3

Содержание углеродов в активных и пассивных группах

Материал	Содержание углерода, %	
	Активная группа	Пассивная группа
Углеродное волокно		
T700	52,48	47,52
T800-6K	50,11	49,89
T800-12K	43,01	56,99
T1000	54,81	45,19

Анализ значений, приведенных в табл. 3, показывает:

- что у волокон Т700, Т1000 химическая активность выше, чем у волокна Т800-12К;
- содержание активной группы углерода у волокна Т800-12К самое низкое (только 43,01 %).

Кроме того, проводилось электронное сканирование физического состояния поверхности углеродных волокон Т700, Т800-6К, Т800-12К, Т1000 (с помощью микроскопа SEM) (рис. 3).

Анализировались диаметры волокон, состояние поверхности волокна, влияние состояния поверхности волокна на адгезионные качества "волокно – матрица".

Сканирование показало:

- диаметр у различных углеродных волокон различен;
- диаметр волокна Т700 самый большой (Ø 7 микрон), диаметр волокна ТТ800-12К самый маленький (Ø 5 – 6 микрон);
- поверхность волокна Т800-6К – рыхлая;
- поверхность волокон Т700 и Т1000 самая гладкая;

- на поверхности волокна Т800 равномерно располагаются канавки по направлению волокон;
- диаметр волокна Т800-6К равен 8 микрон [9].

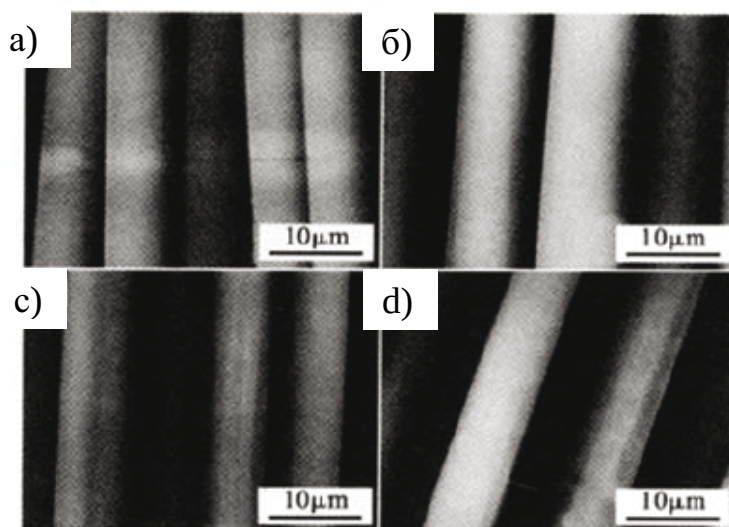


Рис. 3. Состояние поверхностей различных волокон:
a – T1000-12K; b – T700-12K; c – T800-12K; d – T800-6K

ЛИТЕРАТУРА

1. Wu Renjie. Композиционный материал [М]. Город TianJing: издательство TianJing, 2000.
2. HUANG V D. Influence of ultrasonic treatment on the characteristics of epoxy resin and interfacial property of its carbon fiber composites [J]. Composites Science and Technology, 2002, 62: 2153-2159.
3. PARK Soo Jin. Effect of fiber-polymer interactions on fracture toughness behavior of carbon fiber-resin forced epoxy matrix composites [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2000,22: 287-291.
4. Zhang Qingde. Влияние прививки поверхности углеродного волокна с матрицей акриламида на свойство аппрета композитных материалов [J]. Журнал композитных материалов, 2001 (1) :50-54.
5. Zhao Jiexiang, Углеродные волокна Торейки и анализ их композиций [J]. аэрокосмические материалы и технологии, 2000 (6) :53-56
6. SMILEY R J. AFM, SEM and XPS characterization of PAN-based carbon fibers in oxygen plasmas[J]. Journal of Material Science, 1993, (28), 3601-3611.
7. BOGOEVA-CACEVA G. The effect of surface treatment on the interfacial properties in carbon fiber/epoxy matrix composites [J]. Journal of Material Science, 1995, (30) : 3543 - 3546.
8. BOGOEVA-GACEVA G. Characterization of the surface and interphase of plasma-treated HM carbon fiber [J]. Composites Part (A), 1997, 28: 445 -452.
9. ZENG Hanmin, Yu Qiao, Peng Weizhou, Углеродные волокна и микроструктура композиционных материалов, [М] .Гуанчжоу. Чжуншаньский университет, 1996.

Приходько Н. Б.

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ МАССЫ КРЫЛА
УНИФИЦИРОВАННОГО САМОЛЕТА

Приходько Н. Б.

N. B. Prikhodyko

**ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ МАССЫ КРЫЛА
УНИФИЦИРОВАННОГО САМОЛЕТА**

**THE STUDY OF DECREASING WING'S MASS EFFICIENCY OF UNIFIED AIRCRAFT
EFFECTS OF DECREASED WEIGHT OF THE UNIFIED AIRCRAFT'S WING**



Приходько Нина Борисовна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27. E-mail: prikhodykonina@mail

Ms. Nina B. Prikhodko – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin avenue. E-mail: prikhodykonina@mail

Аннотация. Рассмотрено влияние уменьшения массы крыла на увеличение себестоимости изготовления самолета и уменьшение затрат в эксплуатации.

Summary. The paper considers the effects of decreased wing's weight upon the cost of an aircraft and on its operation costs: the rise of the former and cut on the latter.

Ключевые слова: глубокая унификация, модификация, себестоимость, семейство самолетов, эксплуатационные расходы.

Key words: deep unification, modification, cost, aircraft family, operating costs.

УДК 629.7.01

При исследовании вопроса об эффективности создания семейств самолетов, проектируемых на принципах глубокой унификации, возникает ряд задач частного характера.

На рис. 1 приведено некоторое семейство гражданских самолетов, состоящее из базового самолета (БС) и его модификаций (M_1 , M_2 , M_3).

Рассмотрим пару «базовый самолет – модификация M_1 ». Оба самолета конструктивно идентичны и предназначены для перевозки одинакового количества пассажиров ($m_{к.н.2}$) на разных по протяженности линиях (L_1 и L_3). Однако в зависимости от значения L_1 и потребного количества самолетов для этой дальности может быть целесообразным уменьшение взлетной массы самолета M_1 за счет снижения веса силового набора крыла на значение $\Delta m_{кр}$.

Таким образом, задача сводится к сравнительной оценке двух вариантов: модификации M_1 без изменения крыла и модификации M'_1 с облегченным крылом.

Снижение массы крыла модифицированного самолета приведет к изменениям затрат как на этапе производства, так и на этапе эксплуатации.

На этапе производства себестоимость самолета M'_1 (относительно БС) возрастет на значение ΔC , так как потребуются дополнительные затраты, связанные с обработкой материала силового набора крыла.

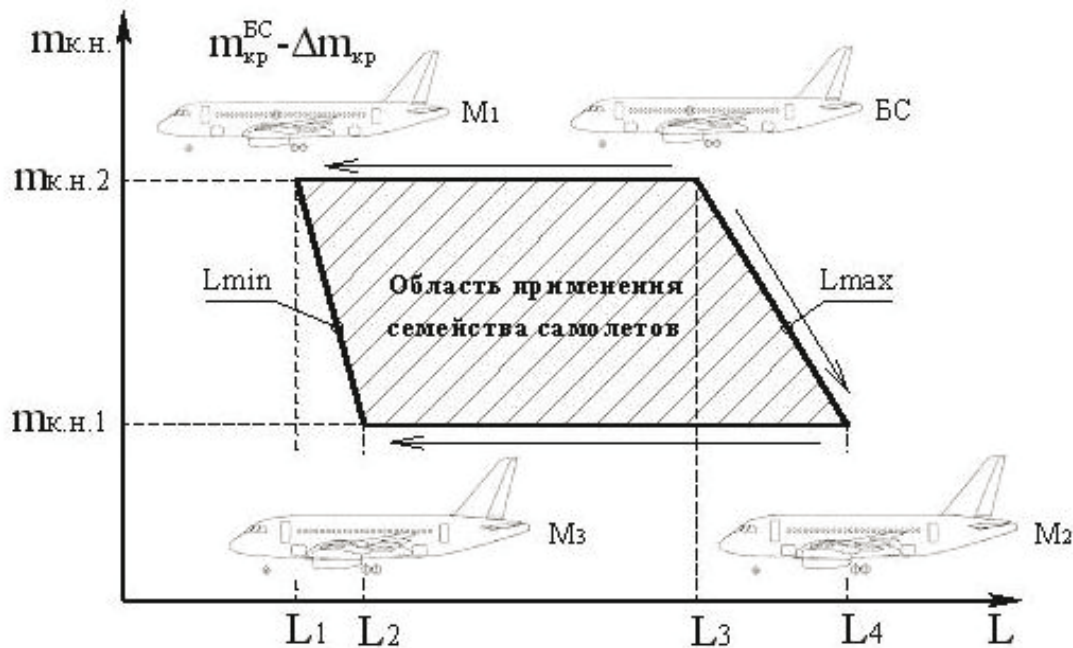


Рис. 1. Область применения семейства самолетов, созданного на принципах глубокой унификации:

БС – базовый самолет; M_1, M_2, M_3 – модификации; $m_{к.н.}$ – масса коммерческой нагрузки; L – дальность; $m_{кр}^{БС}$ – масса крыла базового самолета; $\Delta m_{кр}$ – изменение массы крыла базового самолета

Чтобы определить приращение ΔC , воспользуемся формулой Берсенева [1]:

$$C_{кр} = a \cdot m_{кр}^{2/3}, \quad (1)$$

где $C_{кр}$ – себестоимость изготовления крыла, р.; a – коэффициент пропорциональности; $m_{кр}$ – масса крыла, кг.

Продифференцировав уравнение (1), получим:

$$\frac{\partial C_{кр}}{\partial m_{кр}} = a \frac{2}{3} m_{кр}^{-1/3}. \quad (2)$$

Выразим значение a из уравнения (1), подставим в уравнение (2):

$$\frac{\partial C_{кр}}{\partial m_{кр}} = \frac{2}{3} \frac{C_{кр}}{m_{кр}} = \frac{2}{3} \bar{C}_{кр}^{БС},$$

где $\bar{C}_{кр}^{БС}$ – себестоимость 1 кг крыла базового самолета, р./кг.

Значение $\Delta m_{кр}$ определим из следующего уравнения при условии обеспечения постоянства технического уровня ($\bar{m}_{кр}^{БС} = \text{const}$):

$$\Delta m_{кр} = \bar{m}_{кр}^{БС} \Delta m_0, \quad (3)$$

где Δm_0 – изменение взлетной массы модификации M'_1 относительно БС, кг, которое определяется по формуле

$$\Delta m_0 = \Delta m_T + \Delta m_{кр} . \quad (4)$$

Здесь Δm_T – изменение массы топлива при переходе от дальности L_3 к L_1 , кг.

Подставив уравнение (4) в (3) и выразив $\Delta m_{кр}$, получим (без учета влияния изменения коэффициента разгрузки крыла):

$$\Delta m_{кр} = \frac{\overline{m}_{кр}^{BC} \Delta m_T}{1 - \overline{m}_{кр}^{BC}} .$$

Таким образом, себестоимость самолета в производстве увеличится на величину:

$$\Delta C = \frac{2}{3} \overline{C}_{кр}^{BC} \frac{\overline{m}_{кр}^{BC} \Delta m_T}{1 - \overline{m}_{кр}^{BC}} .$$

При эксплуатации расходы на один летный час уменьшатся на величину $\Delta A_{ч}$ [2]:

$$\Delta A_{ч} = f(\Delta \Pi_{сам}, \Delta m_{пуст}, \Delta m_0),$$

где $\Delta \Pi_{сам}$ – изменение цены самолета без двигателей за счет увеличения себестоимости изготовления крыла, р.; $\Delta m_{пуст}$ – изменение массы пустого самолета, кг.

Таким образом, при равном количестве сравниваемых вариантов самолетов эффект будет достигнут в случае, если экономия от эксплуатации варианта с облегченным крылом превысит производственные затраты на это изменение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саркисян, С. А. Экономическая оценка летательных аппаратов / С. А. Саркисян, Э. С. Минаев. – М.: Машиностроение, 1972. 180 с..
2. Проектирование самолетов: учебник для вузов / С.М. Егер, В.Ф. Мишин, Н.К. Лисейцев и др.; под ред. С. М. Егера. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.

Стельмашук С. В.
S. V. Stelmashchuk

**ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ ПО ПРЯМЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА
НА ОСНОВЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ**

**ON ANALYTICAL SYNTHESIS USING DIRECT QUALITY FACTORS BASED
ON A SIMPLIFIED MODEL**



Стельмашук Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27. E-mail: rukdpsv@rambler.ru

Mr. Sergei V. Stelmashchuk – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Electro Drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin avenue. E-mail: rukdpsv@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрен параметрический синтез ПИ-регулятора по прямым показателям качества, основанный на методике оценки качества системы автоматического регулирования, где скорректированная система заменяется упрощённой моделью – инерционным звеном второго порядка. Приведён пример синтеза.

Summary. The paper considers parametrical synthesis of the PI-controller using direct factors of quality, based on the method for estimation of quality of an automatic control system where the corrected system is replaced with a simplified model – an inertial link of the second. The synthesis example is provided.

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

Key words: control system, quality factors, inertial link of the second order, transient process, synthesis.

УДК 62.83

Введение

Методы синтеза регулятора системы автоматического регулирования (САР), такие как метод ЛАХ, методы настройки на различные стандартные формы [3] и т.д., требуют полного математического описания объекта регулирования. В данной статье рассмотрен подход к синтезу параметров регулятора, основанный на соответствующих классических методах синтеза, но используя частичные сведения о математическом описании объекта регулирования. Такой подход может применяться к объектам с нелинейным математическим описанием или к физическим объектам, используя экспериментальные данные.

Целью работы является применение сугубо аналитического подхода к решению задачи синтеза, без использования каких-либо графических зависимостей. Это позволит решать задачу синтеза на этапе эксплуатации САР. Условием задачи являются ограниченные сведения о математическом описании объекта, которые можно получить экспериментальным способом. В данной статье, для примера, рассматривается параметрический синтез пропорционально-интегрирующего регулятора (ПИ-регулятора).

Основным критерием синтеза является равенство частоты среза и запаса устойчивости по фазе скорректированной САР и упрощённой модели САР, параметры которого соответствуют требуемым прямым показателям качества (ППК).

Постановка задачи

Задана передаточная функция объекта регулирования $W_o(p)$, представляющая собой инерционное звено высокого порядка. Необходимо определить параметры ПИ-регулятора по требуемым ППК: перерегулированию σ^{mp} и времени переходного процесса t_{nn}^{mp} .

Колебательное звено является упрощённой моделью скорректированной САР в замкнутом состоянии и играет роль эталонной или желаемой характеристики, как желаемая ЛАХ в методе ЛАХ или корни, соответствующие стандартной форме. В данной работе для синтеза учитываются только две качественные характеристики: требуемые значения частоты среза ω_{cp}^{mp} и запаса устойчивости по фазе $\Delta\varphi^{mp}$, соответствующие упрощённой модели.

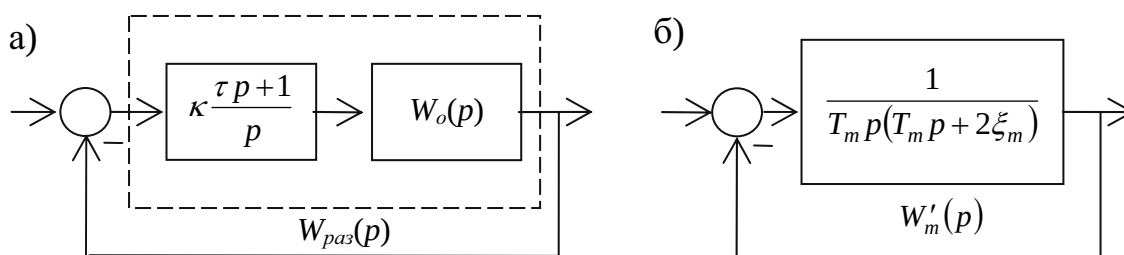


Рис. 1. САР (а) ставится в соответствии с колебательным звеном (б) в разомкнутом состоянии

Эти характеристики определяются для разомкнутой САР. Поэтому сравниваются разомкнутая передаточная функция корректируемой САР $W_{раз}(p)$ и передаточная функция упрощённой модели в разомкнутом состоянии $W'_m(p)$ (см. рис. 1). Поскольку ПИ-регулятор приводит САР к астатизму 1-го порядка, то колебательное звено в разомкнутом состоянии также должно быть астатическим.

Определение характеристик качества

Определение качественных характеристик определяется в два этапа, которые в принципе можно объединить в один этап.

Формулы аналитической связи между ППК и параметрами колебательного звена представлены в [2]. Задаваясь требуемыми значениями ППК σ^{mp} и t_{nn}^{mp} , можно определить необходимые значения параметров колебательного звена T_m и ξ_m .

Определение требуемых значений частоты среза ω_{cp}^{mp} и запаса устойчивости по фазе $\Delta\varphi^{mp}$ по параметрам упрощенной модели T_m и ξ_m осуществляется исходя из формул для вычисления параметров упрощённой модели для астатической САР [1]:

$$\varphi_{cp}^{mp} = -\arccos\left(2\xi_m^2 - \sqrt{1 + 4\xi_m^2}\right), \quad (1)$$

$$-\pi \leq \varphi_{cp}^{mp} \leq -\frac{\pi}{2}, \quad \Delta\varphi^{mp} = \varphi_{cp}^{mp} + \pi;$$

$$\omega_{cp}^{mp} = \frac{1}{T_m} \sqrt{\sqrt{1 + 4\xi_m^2} - 2\xi_m^2}, \quad (2)$$

где φ_{cp}^{mp} – значение фазовой частотной характеристики (ФЧХ) САР при ω_{cp}^{mp} .

Определение параметров ПИ-регулятора

Параметры ПИ-регулятора рассчитываются исходя из равенства ЛАЧХ и ФЧХ, разомкнутых скорректированной САР и упрощённой модели при частоте среза ω_{cp}^{mp} :

$$\begin{aligned} L_o(\omega_{cp}^{mp}) + L_p(\omega_{cp}^{mp}) &= 0; \\ \varphi_o(\omega_{cp}^{mp}) + \varphi_p(\omega_{cp}^{mp}) &= \varphi_{cp}^{mp}. \end{aligned}$$

где $L_o(\omega) = 20 \lg(|W_o(\omega)|)$ – ЛАЧХ объекта регулирования;

$\varphi_o(\omega) = \arg(W_o(\omega))$ – ФЧХ объекта регулирования;

$L_p(\omega) = 20 \lg\left(\left|k \frac{\tau j\omega + 1}{j\omega}\right|\right)$ – ЛАЧХ ПИ-регулятора;

$\varphi_p(\omega) = \arg\left(k \frac{\tau j\omega + 1}{j\omega}\right)$ – ФЧХ ПИ-регулятора.

Решая данную систему уравнений, получим формулы для вычисления параметров ПИ-регулятора:

$$k = \frac{\omega_{cp}^{mp}}{|W_o(j\omega_{cp}^{mp})| \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2(\varphi_{cp}^{mp} - \varphi_o(\omega_{cp}^{mp}))}}; \quad (3)$$

$$\tau = -\frac{\operatorname{ctg}(\varphi_{cp}^{mp} - \varphi_o(\omega_{cp}^{mp}))}{\omega_{cp}^{mp}}. \quad (4)$$

В расчётах удобнее вместо значения запаса устойчивости по фазе $\Delta\varphi^{mp}$ использовать связанное с ней значение ФЧХ φ_{cp}^{mp} .

Поскольку $\varphi_p(\omega)$ изменяется в диапазоне $\left(-\frac{\pi}{2}, 0\right)$, то на значение ω_{cp}^{mp} накладывается ограничение исходя из неравенства:

$$\varphi_{cp}^{mp} < \varphi_o(\omega_{cp}^{mp}) < \varphi_{cp}^{mp} + \frac{\pi}{2} \Rightarrow \varphi_o^{-1}\left(\varphi_{cp}^{mp} + \frac{\pi}{2}\right) < \omega_{cp}^{mp} < \varphi_o^{-1}(\varphi_{cp}^{mp}).$$

Ограничение на частоту среза определяет ограничение на требуемое время переходного процесса:

$$t_{nn.min}^{mp} < t_{nn}^{mp} < t_{nn.max}^{mp},$$

где

$$t_{nn.min}^{mp} = \lambda(\xi_m) \frac{\sqrt{\sqrt{1 + 4\xi_m^4} - 2\xi_m^2}}{\omega_{cp.max}^{mp}} - \quad (5)$$

минимальное допустимое t_{nn}^{mp} ;

$$t_{nn.max}^{mp} = \lambda(\xi_m) \frac{\sqrt{\sqrt{1 + 4\xi_m^4} - 2\xi_m^2}}{\omega_{cp.min}^{mp}} - \quad (6)$$

максимальное допустимое t_{nn}^{mp} ;

$\lambda(\xi_m)$ – коэффициент, связывающий время переходного процесса и постоянную времени упрощённой модели [2];

$\omega_{cp.min}^{mp}$, $\omega_{cp.max}^{mp}$ – граничные значения частоты среза, определяемые решением уравнений

$$\varphi_{cp}^{mp} + \frac{\pi}{2} = \varphi_o(\omega_{cp.min}^{mp}), \quad \varphi_{cp}^{mp} = \varphi_o(\omega_{cp.max}^{mp}). \quad (7)$$

Данный способ настройки ПИ-регулятора даёт приблизительный результат. Расхождения в значениях ППК САР от требуемых ППК зависят от свойств объекта управления и могут достигать значительной погрешности при изменении требуемых значений ППК. Причиной большой погрешности является дискретное изменение времени переходного процесса в зависимости от колебательного характера переходных процессов [1] и несоблюдение требований по запретной области запаса устойчивости [3].

Пример аналитического синтеза ПИ-регулятора

Для минимизации погрешности можно задавать требуемое значение по времени переходного процесса на среднем участке интервала $(t_{nn.min}^{mp}, t_{nn.max}^{mp})$. Задан объект регулирования

$$W_o(p) = \frac{1}{(0.05p + 1)(0.04p^2 + 0.3p + 1)}.$$

Таковыми передаточными функциями, как правило, моделируются электроприводы постоянного тока.

Аналитический синтез ПИ-регулятора осуществляется по следующему алгоритму:

1. Задаётся требуемое перерегулирование $\sigma^{mp} = 0,15$, т.е. 15 %.
2. Расчёт коэффициента демпфирования упрощённой модели [2]:

$$\xi_m = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{\ln(\sigma^{mp})} \right)^2}} = 0,517.$$

3. Расчёт требуемого значения фазы при частоте среза по формуле (1): $\varphi_{cp}^{mp} = -2,214$.

4. Определение граничных значений частоты среза с помощью решения уравнений (7): $\omega_{cp.min}^{mp} = 1,79c^{-1}$, $\omega_{cp.max}^{mp} = 6,45c^{-1}$.

5. Расчёт допустимых значений времени переходного процесса по формулам (5) и (6): $t_{nn.min}^{mp} = 0,63$ с, $t_{nn.max}^{mp} = 2,28$ с,

где необходимо рассчитать коэффициент $\lambda(\xi_m)$ [2]: $n = \text{floor} \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_m^2}}{\pi \xi_m} \ln \left(\frac{1}{\Delta} \right) \right) = 1$.

Здесь $\Delta = 0,05$ – относительная величина зоны установившегося процесса. Тогда

$$\lambda(\xi_m) = \frac{\arctg \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_m^2}}{\xi_m} \right) + n\pi}{\sqrt{1 - \xi_m^2}} + 2\xi_m - \Delta e^{\frac{\xi_m}{\sqrt{1 - \xi_m^2}} \left(\arctg \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_m^2}}{\xi_m} \right) + n\pi \right)} = 5,28.$$

6. Задаётся требуемое время переходного процесса $t_{nn}^{mp} = 1,5c$.

7. Расчёт постоянной времени упрощённой модели [2]: $T_m = \frac{t_{nn}^{mp}}{\lambda(\xi_m)} = 0,284c$.

8. Расчёт требуемого значения частоты среза по формуле (2): $\omega_{cp}^{mp} = 2,73c^{-1}$.

9. Расчёт параметров ПИ-регулятора по формулам (3) и (4): $\kappa = 2,78$, $\tau = 0,136c$.

На рис. 2 представлены кривые переходных процессов упрощённой модели $h_m(t)$ и скорректированной САР $h(t)$. ППК скорректированной САР составили $t_{nn} = 1,34c$ и $\sigma = 0,163$, что составило 11,9 % и 7,8 % погрешности соответственно.

Если поменять требования, например $t_{nn}^{mp} = 1c$ и $\sigma^{mp} = 0,2$, то расхождения по результатам синтеза гораздо значительней $t_{nn} = 1,44c$ и $\sigma = 0,18$, что составляет погрешность 30,6 % и 10,2 % соответственно.

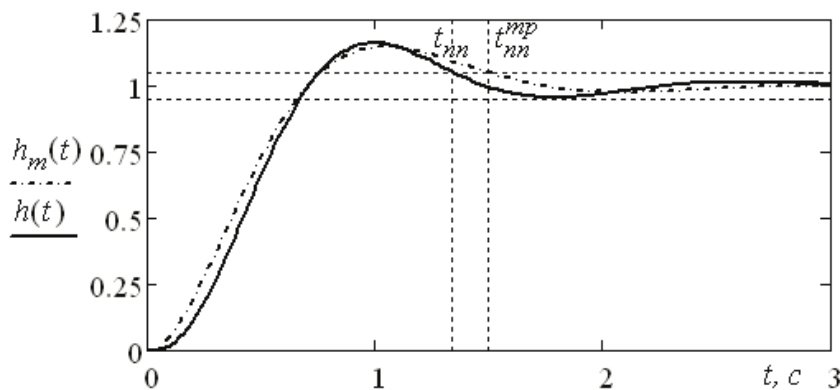


Рис. 2. Переходные процессы упрощённой модели $h_m(t)$, соответствующей требуемым ППК, и скорректированной САР $h(t)$

На рис. 3 видно дискретное изменение времени переходного процесса (последнее вхождение в зону установившегося процесса не на втором, а третьем полупериоде переходного процесса), а на рис. 4 видно нарушение запретной области запаса устойчивости АФХ разомкнутой скорректированной системы.

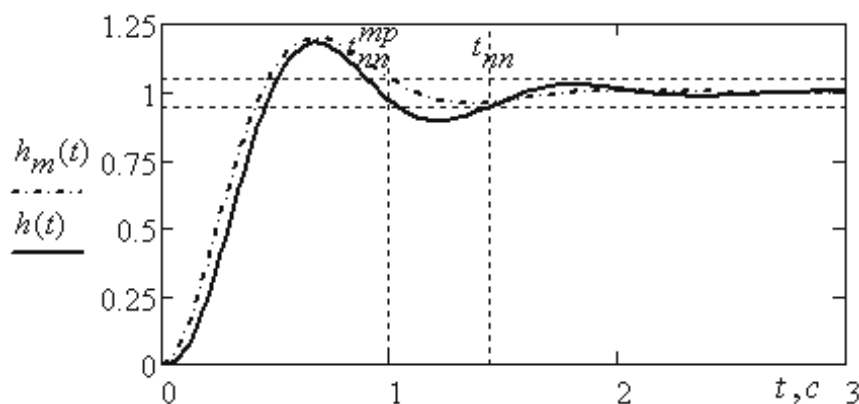


Рис. 3. $h_m(t)$ и $h(t)$ при изменённых значениях t_{nn}^{mp} и σ^{mp}

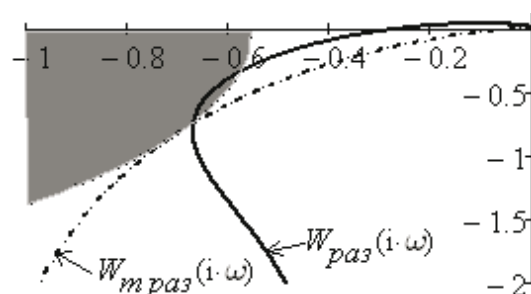


Рис. 4. АФХ упрощённой модели $W_{m,раз}(j\omega)$ и скорректированной
САР $W_{раз}(j\omega)$ в разомкнутом состоянии

Выводы

Несмотря на аналитический подход к рассмотренной методике синтеза, что делает процесс настройки ПИ-регулятора более лёгким (настройка «за одно действие» [2]), необходимо отметить следующие недостатки:

1. Низкая точность результатов аналитического синтеза параметров ПИ-регулятора обуславливается тем, что требования по t_{nn}^{mp} берутся крайние на интервале $(t_{nn.min}^{mp}, t_{nn.max}^{mp})$. Значения интервала вычисляются по σ^{mp} .

2. Для осуществления синтеза необходима дополнительная информация об объекте регулирования: $\omega_{cr.min}^{mp} = \varphi_o^{-1}\left(\varphi_{cr}^{mp} + \frac{\pi}{2}\right)$, $\omega_{cr.max}^{mp} = \varphi_o^{-1}\left(\varphi_{cr}^{mp}\right)$, $|W_o(j\omega_{cr}^{mp})|$ и $\varphi_o(\omega_{cr}^{mp})$.

Для того чтобы данная методика синтеза применялась для настройки ПИ-регулятора в процессе эксплуатации САР, вся информация, приведённая в недостатках, должна извлекаться из кривой разгона объекта регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стельмашук, С. В. Оценка качества системы автоматического регулирования на основе упрощённой модели / С. В. Стельмашук // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № I-1(1). – С. 36-39.
2. Стельмашук, С. В. Расчёт прямых показателей качества колебательного звена на основе метода Ньютона / С. В. Стельмашук // Электротехнические комплексы и системы: материалы международной научно-технической конференции. В 5 т. Т. 3. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – С. 107-111.
3. Бессекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.

Димитрюк О. К., Танкова С. Г.
O. K. Dimitryuk, S. G. Tankova

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СЛУЖЕБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ СБОРОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ

PARTICULAR TO THE DEVELOPMENT OFFICIAL USE ASSEMBLIES



Димитрюк Олег Калинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681024, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Первостроителей, д. 19, кв. 435.

Mr. Oleg K. Dimitryuk – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681024, Komsomolsk-on-Amur, 19 Pervostroiteley pr., ap. 435.



Танкова Светлана Геннадьевна – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Ms. Svetlana G. Tankova – PhD in Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Рассмотрены задачи и последовательность разработки служебного назначения машины (изделия), отвечающего качественным характеристикам.

Summary. The tasks and the sequence of development of the service destination machine (product) that meets the quality characteristics.

Ключевые слова: сборка, сборочная единица, служебное назначение, технологический процесс, точность, качество.

Key words: assembly, assembly unit, service appointment process, the accuracy and quality.

УДК 621.941.06

Приступая к разработке технологического процесса сборки сборочной единицы (изделия), технолог не имеет у себя таких важных исходных данных, как данные о служебном назначении изделия. Однако качество работы на этом начальном этапе зависит от того, как понято технологом служебное назначение изделия и как оно будет учтено при разработке технологического процесса сборки и изготовления деталей. Поэтому для качественного выполнения работы по разработке технологических процессов необходимо изучить сборочную единицу и разработать формулировку служебного назначения сборочной единицы с количественными оценками, определяющими точность, производительность и технические требования.

Каждую машину создают для выполнения определённого технологического процесса, в результате осуществления которого должна быть получена продукция требуемого качества. В связи с этим содержание служебного назначения машины должно отражать исчерпывающие данные о продукции, которую ей предстоит производить: вид, качество, количество.

Служебное назначение машины должно включать перечень условий, в которых машине предстоит работать и производить продукцию требуемого качества в необходимом количестве. Условия работы машины включают комплекс показателей с допустимыми отклонениями, характеризующих качество исходного продукта, потребляемую энергию, режимы работы машины и состояние окружающей среды. Составной частью описания служебного назначения машины могут быть требования к экономичности, надёжности и производительности машины. Требуемую производительность машины определяют технико-экономическими расчётами.

Кроме того, в описание служебного назначения машины могут входить дополнительные требования, которые необходимо учесть при проектировании и изготовлении машины: к внешнему виду, безопасности работы, удобству и простоте обслуживания и управления, уровню шума, коэффициенту полезного действия и т. п.

Каждая машина, как и отдельные её механизмы, выполняет своё служебное назначение при помощи ряда исполнительных поверхностей или их сочетаний, принадлежащих деталям машин.

При разработке служебного назначения сборочной единицы необходимо:

- тщательно изучить конструкцию сборочной единицы, устройство сборочной единицы, принцип взаимодействия всех деталей сборочной единицы и их рабочие функции;
- выявить и установить необходимые требования и условия по всем показателям служебного назначения сборочной единицы;
- определить количественную оценку показателей, требований и условий для данной сборочной единицы.

Пример формулировки служебного назначения сборочной единицы. На рис. 1 по-

казано приспособление-кондуктор для сверления отверстия в заготовках. Формулировка этого приспособления будет примерно следующей.

Приспособление-кондуктор предназначено для ориентирования заготовок базовым отверстием, устанавливаемых на оправку **4** по посадке $\text{Ø}12\text{H}7/\text{g}7$. Приспособление должно обеспечивать точность сверления отверстий $\text{Ø}6$ мм с точностью не ниже 12-го квалитета, точность размера от торца заготовки до оси отверстия кондукторной втулки **7** с допуском 0,2 мм; отклонение от перпендикулярности оси **В** отверстия кондукторной втулки относительно оси **А** базовой оправки не более 0,08 мм; отклонение от смещения оси **В** отверстия кондукторной втулки относительно оси **А** базовой оправки не более 0,1 мм (на виде в плане).

Станочное приспособление-кондуктор состоит из деталей: **1** – корпус; **2** – кондукторная плита; **3** – постоянная кондукторная втулка без бурта; **4** – жёсткая цилиндрическая оправка; **5** – четыре винта для крепления кондукторной плиты к корпусу; **6** – штифты; **7** – постоянная кон-

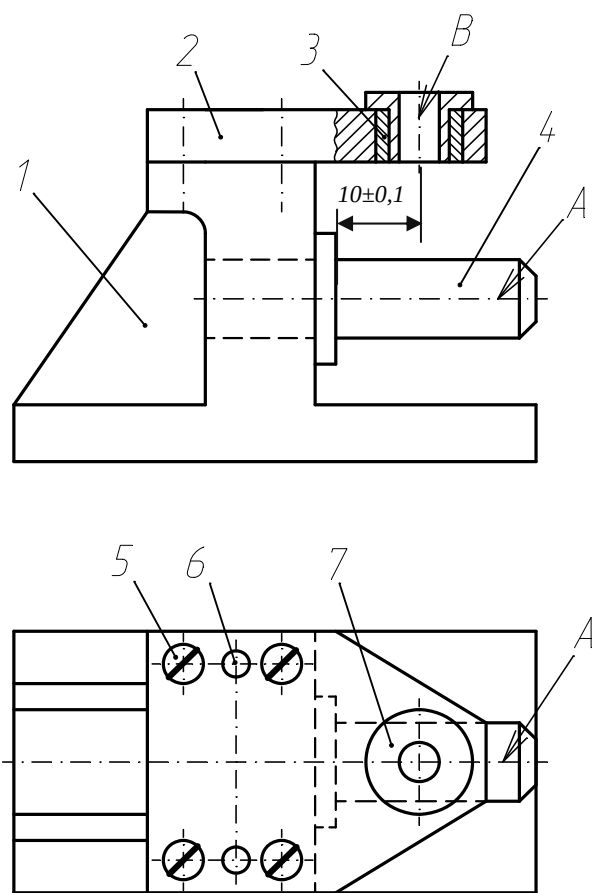


Рис. 1



дукторная втулка с буртом и диаметром отверстия 6 мм. Штифты необходимы для точного ориентирования и фиксации кондукторной плиты на корпусе приспособления и обеспечивают заданную точность положения оси отверстия втулки **7** относительно оси базовой оправки **4**.

Опыт показывает, что каждая ошибка, допущенная при разработке, выявлении и уточнении служебного назначения машины, а также её механизмов, приводит не только к созданию недостаточно качественной машины, но и вызывает лишние затраты труда на её изготовление и эксплуатацию. Недостаточно глубокая разработка и изучение служебного назначения машины порождает излишне жёсткие, экономически неоправданные требования к точности и другим показателям качества машины.

Первоначально служебное назначение машины формулирует заказчик и уточняет при оформлении заказа на проектирование. Для конструктора формулировка служебного назначения машины является исходным документом, который впоследствии он прилагает к чертежам машины. От технолога, приступающего к разработке технологии изготовления машины и являющегося лицом, ответственным за сдачу готовой машины, помимо изучения, требуется критическая оценка формулировки служебного назначения машины.

Разработав конструкцию и сделав необходимые расчёты, конструктор в описании конструкции даёт формулировку служебного назначения машины и её сборочных единиц, обоснованно назначает технические требования и нормы точности, вытекающие из служебного назначения, указывает методы достижения требуемой точности в соответствии с данными по количественному выпуску машины, которые обеспечивают более экономичное её изготовление.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакшин, Б. С. Теория и практика технологии машиностроения: в 2 кн. Кн. 2: Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1982. – 367 с.
2. Димитрюк, О. К. Технология сборки: учеб. пособие / О. К. Димитрюк. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2005. – 65 с.
3. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения: учеб. для машиностроит. спец. вузов / И. М. Колесов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1999. – 591 с.
4. Проектирование технологии: учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
5. Худобин, Л. В. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / Л. В. Худобин, В. Ф. Гурьянихин, В. Р. Берзин. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.

Щелкунов Е. Б., Хвостиков А. С.
МЕТАЛЛООБРАБОТКА 2011

Щелкунов Е. Б., Хвостиков А. С.
E. B. Schelkunov, A. S. Khvostikov

МЕТАЛЛООБРАБОТКА 2011

METALWORKING 2011



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

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



Хвостиков Александр Станиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: ktm@knastu.ru.

Mr. Alexander S. Khvostikov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Аннотация. Приведены тематика и обзор наиболее интересных экспонатов выставки «Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности».

Summary. Offered is a review of most interesting exhibits of the "Equipment, tooling and instruments for metalworking industry" exhibition.

Ключевые слова: станок, робот, обрабатывающий центр, фреза, инструмент, координатно-измерительная машина.

Key words: machine-tool, machining centre, milling tool, tooling, coordinate measurement machine.

УДК 621.0

23-27 мая 2011 г. в Москве, в центральном выставочном комплексе (ЦВК) «Экспоцентр», прошла 12-я Международная специализированная выставка «Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности». Выставка организована ЦВК «Экспоцентр» и Российской Ассоциацией производителей станкоинструментальной продукции «Станкоинструмент» при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ, Союза машиностроителей России. В ней приняли участие 29 стран. Свои разработки представили не только ведущие мировые компании, но и учебные заведения. Научно-технические издательства демонстрировали свою печатную продукцию. Всего в выставке участвовало 779 экспонентов.

В рамках выставки проводились семинары и форумы. Их тематика отражает основные приоритетные направления развития металлообрабатывающей отрасли, начиная с подготовки специалистов и заканчивая прогрессивными методами обработки.

На выставке демонстрировались металлорежущие станки и комплектующие к ним, роботы, режущий и вспомогательный инструменты, средства контроля и измерения, программные продукты, металлургическое и сварочное оборудование.

Металлорежущие станки были представлены всеми классами и размерами от настольных, рекомендуемых для использования в учебном процессе и в малом бизнесе, до тяжелых расточных станков и обрабатывающих центров (ОЦ).

На выставке экспонировалось большое количество малогабаритных и настольных станков. Свою продукцию выставили крупные предприятия и малые, созданные на базе вузов. Среди них ОАО «Торговый дом» Воткинский завод»; Станкостроительная Компания Роктер (г. Москва); Фирма Лир, официальный дистрибьютор Cielle; ОАО «НТЦ «Завод Ленинец» (г. Санкт-Петербург); ООО «Gravotech Marking»; Reggiana Macchine Utensili s.r.l.; BALTEXIM, официальный представитель Bits From Bytes и др.

ОАО «Торговый дом» Воткинский завод» представил широкий спектр настольных металлообрабатывающих станков «WORK HORSE». Среди них токарные, сверлильные, комбинированные, заточные. Наиболее интересны специализированные заточные станки для заточки спиральных сверл и концевых фрез (рис. 1).



Рис. 1. Настольный станок для заточки цельных концевых фрез GS-6

ОАО «НТЦ «Завод Ленинец» выставил станки серии «Снайпер». Среди них трехкоординатный фрезерный станок с ЧПУ «СНАЙПЕР 9», используемый для обработки самых разных материалов от дерева до закаленных сталей. От предыдущей конструкции его выгодно отличают большая жесткость и более мощный станочный электрошпиндель ET-80-2,5 (2,5 кВт) взамен фрезера Kress мощностью 1,05 кВт, предназначенного для ручного применения.

Компания Reggiana Macchine Utensili s.r.l. демонстрировала станки для механической маркировки. Их особенность в использовании технологии ударно-точечной маркировки и прочерчивания. Рисунок наносится с помощью специальной иглы. Движения иглы схожи с движениями иглы в матричном принтере. Преимуществами такого метода обработки являются низкие энергозатраты, практически нулевая стоимость расходных материалов, высокие производительность и качество.

Среди станков среднего размера следует особо отметить вертикальные и горизонтальные токарные, фрезерные станки с ЧПУ и ОЦ, экспонированные ООО «Шевалье.ру» (CHEVALIER MACHINERY INC.).

Токарные станки этой компании обладают необычной для данного класса станков особенностью – возможностью перемещения суппорта по трем координатам ($Y = \pm 55$ мм). Данная функция позволяет производить обработку заготовки концевым инструментом, закрепленным в автоматической инструментальной головке, (фрезерование, сверление) со смещением от оси Z.

На рис. 2 показана автоматическая инструментальная головка горизонтального токарного станка с противопинделем модели FNL-320SY (наибольший диаметр обработки 460 мм), представленный ООО «Шевалье.ру». Буквой А на рис. 2 обозначены направляющие для реализации движения головки по оси Y.

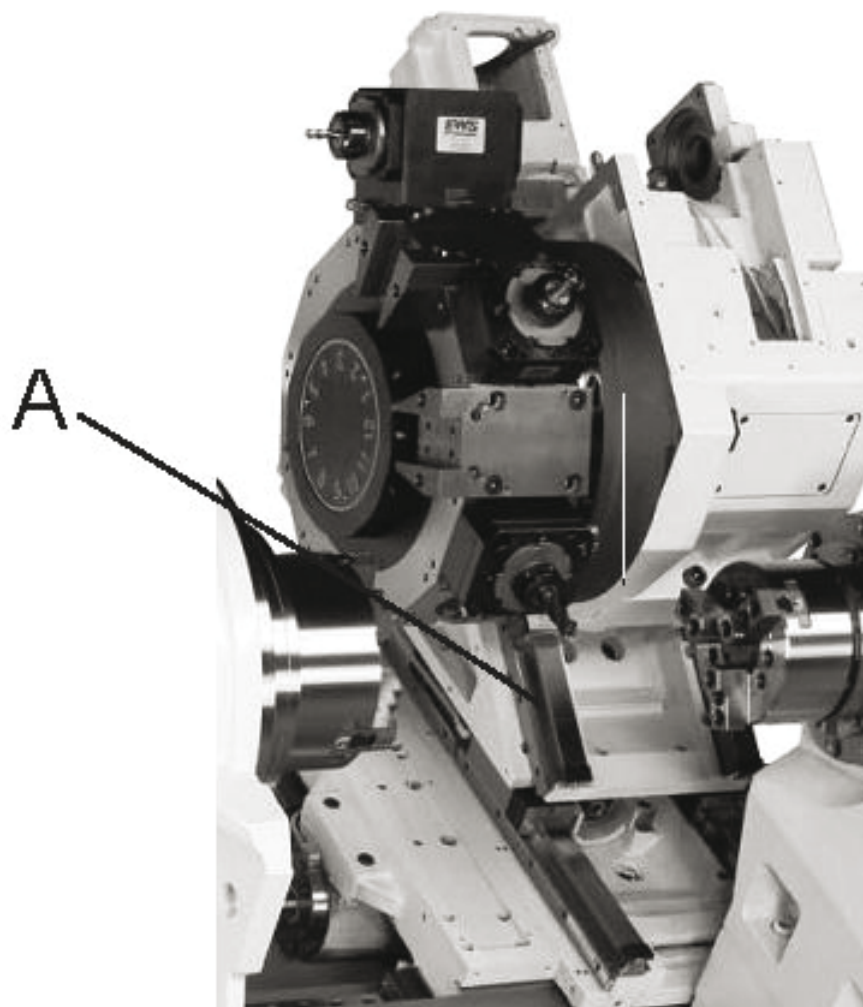


Рис. 2. Автоматическая инструментальная головка
токарного станка модели FNL-320SY

ОЦ модели QR1620-L был представлен ООО «Шевалье.ру» в комплексе с загрузочной системой EROWA Robot Easy (рис. 3). ОЦ используется для обработки заготовок размером $520 \times 400 \times 380$ мм и массой до 250 кг на частотах вращения до $10\,000 \text{ мин}^{-1}$ ($15\,000 \text{ мин}^{-1}$ опц.). Станок оснащен барабанно-рычажным инструментальным магазином, позволяющим производить смену инструмента за 1 секунду.

Загрузочная система EROWA Robot Easy является отдельным универсальным модулем, включающим в себя тактовый стол и манипулятор для подачи заготовок к станку. Манипулятор способен перемещать грузы массой до 250 кг на расстояние до 1600 мм.



Рис. 3. Металлообрабатывающий комплекс на базе ОЦ QP1620-L

Среди тяжелых станков особо выделяется высокоскоростной пятикоординатный ОЦ с гибридной кинематикой МЦ 2 (рис. 4) – совместная разработка Савеловского машиностроительного завода (СМЗ) и Национального института авиационных технологий (НИАТ).

Центр предназначен для комплексной обработки крупногабаритных объемных изделий одинарной, двойной и знакопеременной кривизны с габаритами 6000 × 3000 × 1000 мм из конструкционных сталей, титановых и алюминиевых сплавов, композиционных материалов в аэрокосмической, судостроительной, автомобильной и других отраслях машиностроения.

В МЦ-2 объединены агрегаты с последовательной кинематикой, позволяющие осуществлять линейные перемещения по оси X (перемещение траверсы) и оси Y (перемещение каретки), и закрепленный на каретке 3Z модуль (трипод), выполненный на элементах параллельной кинематики. 3Z модуль осуществляет перемещение шпинделя в направлении оси Z, а также повороты вокруг осей X и Y. Станок собран из отдельных секций. Такой агрегатно-модульный принцип конструкции позволяет создавать на базе центра различные модификации по габаритам обработки и технологическим возможностям.

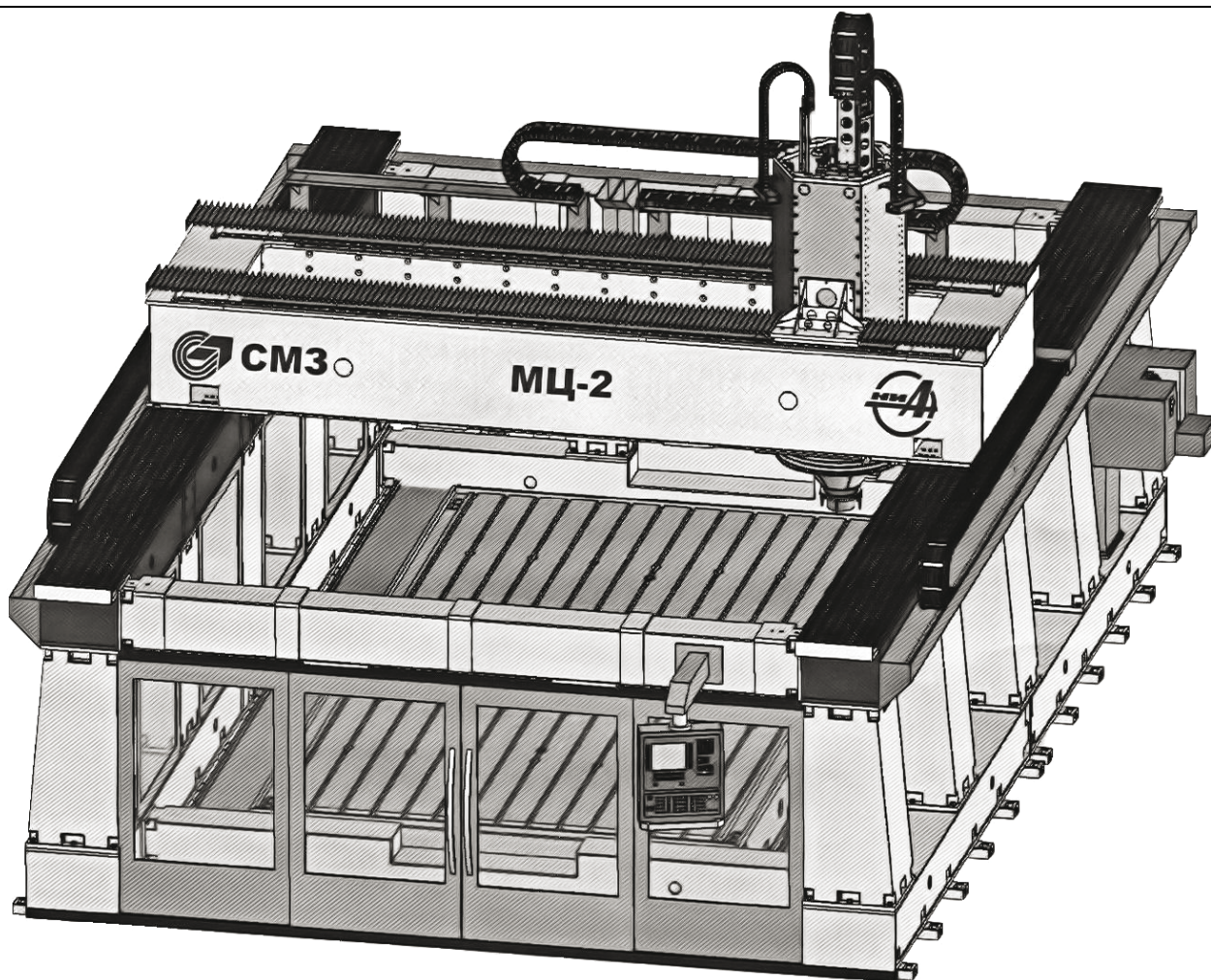


Рис. 4. Компоновка ОЦ МЦ-2

Особое внимание организаторами выставки было отведено технологии и оборудованию для раскроя металла на гидроабразивных и лазерных станках. Этой тематике были посвящены семинары «Современные технологии гидроабразивной резки» (организатор ООО «ДЕГ-РУС») и «ВНИТЭП повышает производительность лазерного раскроя металла» (организатор ЗАО «ВНИТЭП»).

Демонстрация работы лазерных станков привлекала большое число зрителей.

Станки для лазерной обработки были представлены двумя типами. Первый – это малогабаритные станки для лазерной маркировки, например лазерные граверы и маркеры ООО «Лазерный центр» (г. Санкт-Петербург) и «Атеко» (г. Москва).

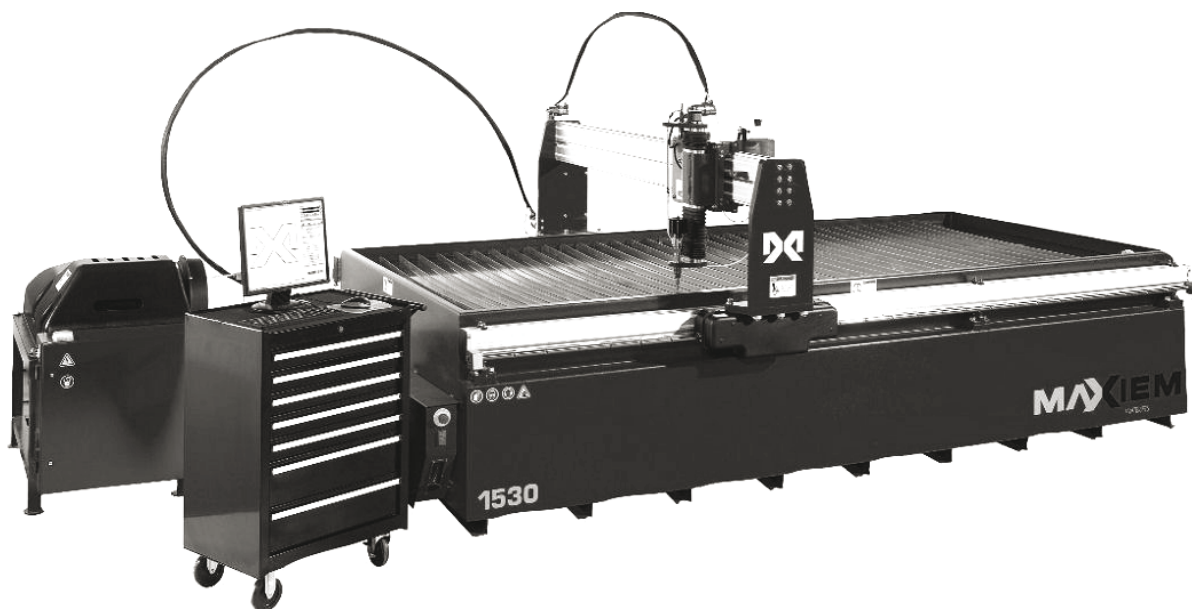
Второй тип станков для лазерной обработки – это промышленные станки лазерного раскроя листового материала. На выставке экспонировались станки как зарубежных, так и отечественных производителей: ООО САЛЬВАНИНИ СНГ; ЗАО «ВНИТЭП» (г. Москва) и др.

ЗАО «ВНИТЭП» продемонстрировало серию промышленных комплексов лазерной обработки металла «Навигатор». Самый большой в данной серии комплекс КС-11В в длину составляет 28 500 мм. Промышленные комплексы оснащены волоконным лазером и линейными синхронными двигателями.

Станки для гидроабразивной обработки были представлены несколькими компаниями. Среди них ООО "Джет Систем РУ" (г. Калининград), представляющее корпорацию «ОМАХ» (США); ТКЦ Центрум – представитель компании Flow; Балтийская промышленная компания – представитель компании TECHNl Waterjet и др.

На рис. 5, *а* показан станок MAXIEM 1530 производства корпорации «ОМАХ», предназначенный для резки плоских элементов из любого материала (металл, пластмасса, стекло, камень, керамика, композиты). На столе станка могут размещаться листовые заготовки размером 3835×1576 мм. На рис. 5, *б* показано изделие, демонстрирующее возможности данного станка.

а)



б)

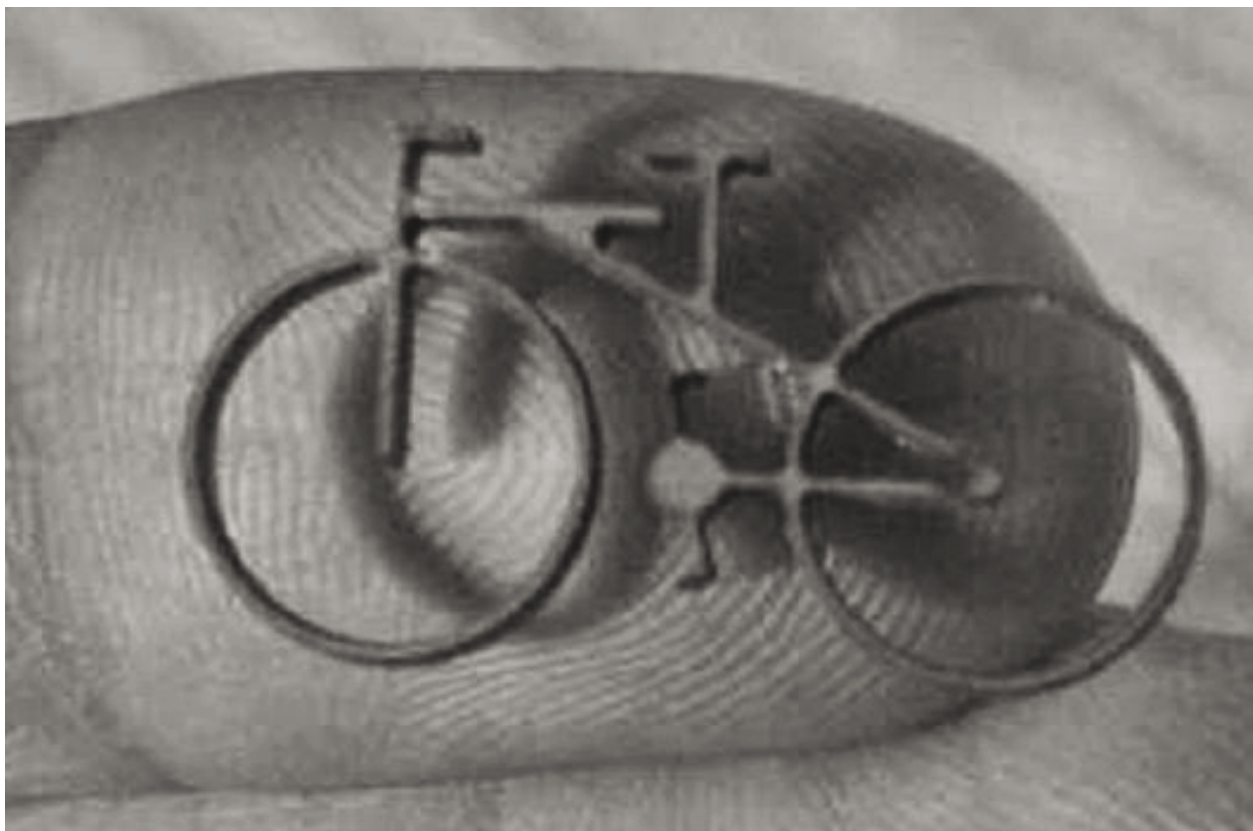


Рис. 5. *а* – станок для гидроабразивной резки; *б* – изделие, изготовленное на данном станке

ООО «Вэлдком» экспонировало станок серии COMBO компании ESKERT, объединяющий в себе два различных метода резки: плазменной и гидроабразивной. Такое техническое решение позволяет сочетать высочайшее качество гидроабразивной резки с низкими эксплуатационными расходами и высокой производительностью, характерными для плазменной резки.

Большой интерес посетителей выставки вызывали стенды, демонстрирующие промышленных роботов. Современные роботы способны выполнять самые разные задачи: манипулирование грузами, сварочные работы, плазменную резку, механическую обработку. Свою продукцию представили зарубежные и отечественные производители промышленных роботов: FANUC ROBOT EUROPE; Motoman; ООО «Вебер Инженеринг (г. Москва), входящее в группу компаний «Вебер Комеханикс»; SHL Automation; ОАО «АВТОВАЗ» (г. Тольятти) и др.

На рис. 6 показан робот – дельтапод FANUC Robot M-1iA/05S с контроллером R30iA со встроенной системой 2D зрения.



Рис. 6. FANUC Robot M-1iA/05S

На рис. 7 показан промышленный робот SHL для транспортирования заготовки между станками, реализующими только главное вращательное движение. Схват робота не только удерживает заготовку во время обработки, но и совершает рабочую подачу аналогично движению руки рабочего.

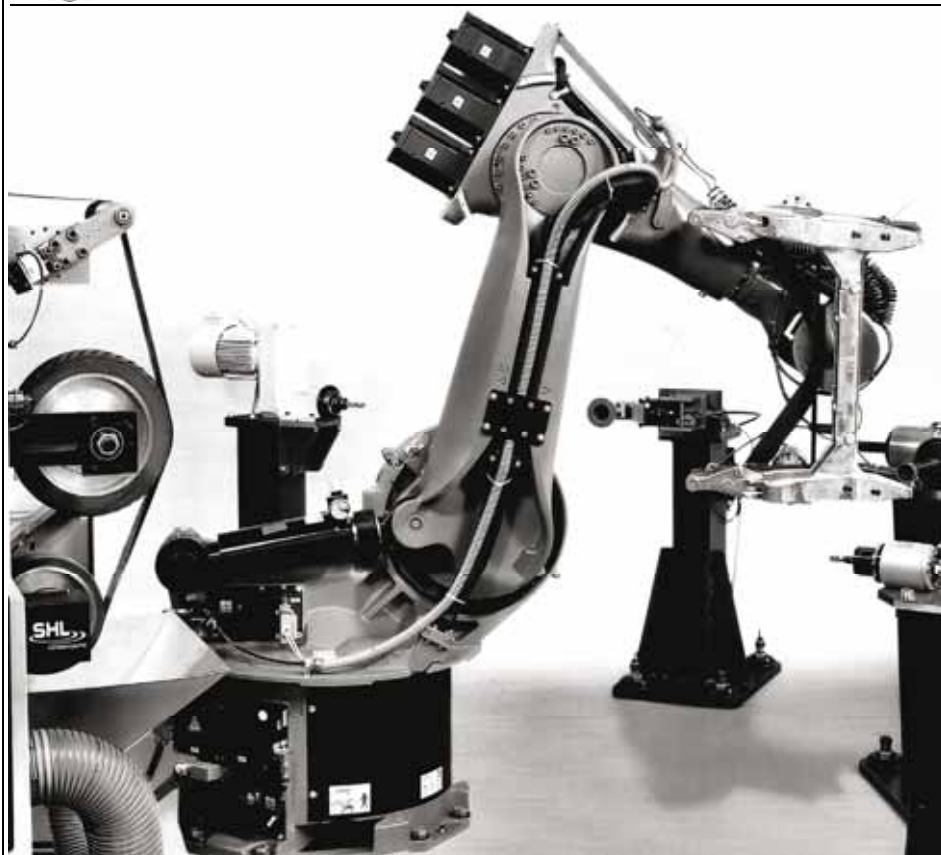


Рис. 7. Промышленный робот компании SHL



Рис. 8. Концевая фреза для обработки титановых сплавов производства ООО «ПК МИОН»

ОАО «АВТОВАЗ», известное своими автомобилями, на данной выставке представило технологическое оборудование собственного производства. Помимо промышленных роботов ОАО «АВТОВАЗ» продемонстрировало токарные ОЦ модели «КОМТОК», «КОМТОК-2», «КОМТОК-ВТС 2» и комплектующие к станкам.

Демонстрировали на выставке свои достижения и ведущие мировые производители инструмента. Широко был представлен цельный твердосплавный инструмент, инструмент со сменными многогранными пластинами, абразивный.

Были на выставке и новинки инструментальной промышленности. ООО «ПК МИОН» (г. Томск) выставило концевую фрезу для черновой и чистовой обработки титановых и других труднообрабатываемых сплавов (рис. 8). Ее особенностью является переменный угол наклона каждого зуба по всей длине режущей кромки, что улучшает условия контакта зубьев с обрабатываемой поверхностью, уменьшает силы резания и обеспечивает деление и удаление стружки из зоны резания. Фреза изготовлена из быстрорежущей стали P6M5K5 с износостойким покрытием ZrN.

ООО «Кама-МСМ», наряду с твердосплавным инструментом, продемонстрировало монолитные керамические фрезы производства итальянской компании CERIN S.p.a., предназначенные для работы на сверхвысоких скоростях резания.

Оригинальный резец под названием MaxiClick – разработка CERATIZIT (г. Люксембург), экспонировало ЗАО ПРОМИНТЕХ (г. Санкт-Петербург) (рис. 9). Необычность его

конструкции состоит в том, что он устроен аналогично канцелярскому ножу с выдвижным лезвием. По мере изнашивания режущая вставка выдвигается, а ее изношенное звено отламывается.



Рис. 9. Резец MaxiClick

На рис. 10 показана круглая твердосплавная пластина для фрезерования производства ООО «KENNAMETAL». Ее уникальность в наличии каналов для подвода СОТС в зону резания.



Рис. 10. Пластина для фрезерования производства ООО «KENNAMETAL» с каналами для подвода СОТС

Много интересных моделей было показано производителями контрольно-измерительной техники. ООО «Лапик» выставил координатно-измерительную машину КИМ 1000, выполненную на базе механизма с параллельной кинематикой.

Компания ООО Renishaw продемонстрировала новую разработку – измерительную систему Equator 300. Конструкция приводного механизма представляет собой параллельный механизм – дельтапод. Благодаря этому достигнута высокая подвижность измерительной головки. В процессе трехмерного сканирования обрабатываются тысячи точек, что позволяет эффективно измерять сложные формы и обеспечивает более точный метрологический результат. В системе применен метод калибровки, основанный на традиционном сравнении изготавливаемых деталей с эталоном.

Компания ООО «СИНЕРКОН» представила продукцию нескольких ведущих мировых производителей лабораторного оборудования, таких как: международная компания OXFORD Instruments; немецкая компания KB-PRUEFTECHNIK; итальянская фирма REMET; немецкая компания PRUFTECHNIK.

Большой интерес посетителей выставки привлек стенд ООО "Сонатек", представляющий английскую компанию Aberlink Innovative Metrology LLP. На рис. 11 показана самая популярная из производимых компанией Aberlink Innovative Metrology LLP координатно-измерительная машина КИМ Axiom too 600 с ЧПУ. Машина рекомендована для измерения деталей сложной геометрии и протоколирования полученных результатов, а также для контроля отклонений геометрических параметров изделий от шаблона и проверки геометрических характеристик поверхностей.

Комсомольск-на-Амуре был представлен на выставке двумя участниками: заводом «Амурлитмаш» и Комсомольским-на-Амуре государственным техническим университетом «КНАГТУ».

Завод «Амурлитмаш» демонстрировал на выставке дробебетные и дробеструйные установки, предназначенные для очистки дробью поверхностей отливок от пригара и окалины.

КНАГТУ представил несколько оригинальных разработок. Среди них электродуговые металллизаторы и технология восстановления деталей и нанесения антикоррозионных покрытий, представленные кафедрой «Технология машиностроения». Для реализации данной технологии при вузе создано предприятие ООО «Композит-ДВ». Технология поддержана в конкурсе УМНИК в 2009 г. и в программе Старт 2011 г. (руководитель Саблин П. А.).

Кафедрой «Материаловедение и новые конструкционные материалы» были продемонстрированы две разработки: 1) технология и оборудование для создания абразивного режущего инструмента методом припекания твердосплавного порошка (руководители Башков О. В., Ким В. А.); 2) акустико-эмиссионная диагностическая система (руководитель Башков О. В.). Обе работы поддержаны в конкурсе УМНИК.

Кафедра «Тепловые энергетические установки» представила высокоскоростные пневматические шпиндели. Разработка выполнена при поддержке грантов Министерства образования и науки РФ, Российского фонда фундаментальных исследований, фонда поддержки малых предприятий в научно-технической сфере и гранта президента РФ поддержки молодых российских ученых.

12-я Международная специализированная выставка «Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности» подтвердила свою актуальность и востребованность. По своим масштабам она отражает все мировые тенденции развития металлообрабатывающей отрасли.



Рис. 11. КИМ Axiom too 600

Мокрицкий Б. Я., Бурков А. А.

МЕТОДОЛОГИЯ НЕТРАДИЦИОННОГО КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Мокрицкий Б. Я., Бурков А. А.

B. Y. Mokritsky, A. A. Burkov

**МЕТОДОЛОГИЯ НЕТРАДИЦИОННОГО КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА
К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

**NON-TRADITIONAL HOLISTIC APPROACH TO THE PROBLEM OF INCREASING
EFFICIENCY OF METAL CUTTING TOOLS**

Мокрицкий Борис Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Y. Mokritsky – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: boris@knastu.ru.

Бурков Александр Алексеевич – доктор технических наук, профессор, проректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sdsov@knastu.ru.

Mr. Alexander A. Burkov – Doctor of Engineering, Professor, Vice Rector, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sdsov@knastu.ru.

Аннотация. Каждый технологический процесс изготовления металлорежущего инструмента эффективен в конкретных условиях эксплуатации. Его можно «собирать» из отдельных типовых технологических приёмов путём их добавления или изъятия до нужного уровня эксплуатационного показателя.

Summary. Each technological process implied in producing metal-cutting tools is effective under certain operational conditions. It (process) can be «assembled» from separate typical technological methods by means of adding or extracting them until a necessary level of performance is reached.

Ключевые слова: работоспособность инструмента, концепция многостадийного упрочняющего воздействия, технологический процесс изготовления инструмента.

Key words: tool capacity, concept of multistage reinforcing action, technological process of tool production.

УДК 621.9

Введение

Производительность и точность обработки заготовок из типовых конструкционных материалов лимитированы, в том числе, работоспособностью металлорежущего инструмента. Проблема повышения работоспособности инструмента ещё более значима для обработки труднообрабатываемых и специальных материалов, где затраты на инструмент могут достигать трети и более от цены изделия.

Данная работа посвящена решению отдельных задач проблемы повышения работоспособности инструмента, а именно обоснованию методологии выбора эффективного технологического процесса изготовления инструмента [1; 2] для конкретных условий эксплуатации. Исходной посылкой для разработки методологии служит следующая аксиома: в эксплуатации не нужен инструмент, период стойкости которого недостаточен для обработки одной поверхности заготовки, и не нужен такой инструмент, у которого после обработки некоторого числа заготовок остаётся значительный ресурс эксплуатации, но недостаточный для обработки ещё одной заготовки.



Основы методологии нетрадиционного подхода к проблеме повышения работоспособности инструмента

Общепринятый подход состоит в том, что разрабатывается тот или иной метод изготовления инструмента и затем оптимизируется область его применения и рациональные режимы эксплуатации инструмента. Предлагаемый в работе нетрадиционный подход к повышению работоспособности состоит в том, что он:

а) комплексный и предусматривает:

- разработку технологических процессов изготовления инструмента по принципу многовариантного упрочняющего воздействия на инструментальный материал на любом из этапов изготовления инструмента;

- распространение принципов упрочняющего воздействия на разные типы инструментальных материалов;

- разработку не только процессов изготовления инструмента, но и способов контроля качества инструмента;

б) включает в себя разработку некоего арсенала [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9] технологических процессов изготовления инструмента для того, чтобы под заданные условия эксплуатации из этого арсенала выбирать эффективный.

Разработанные технологические процессы изготовления инструмента, способы контроля его качества и прогнозирования работоспособности проверены [3; 4; 5] на новизну и защищены более изобретениями (гриф «Для служебного пользования» снят с более чем 30 изобретений только в 2010 г., соответственно формулы изобретений впервые опубликованы в № 3 и № 10 Бюллетеня изобретений РФ). Они объединены единым исследовательским и изобретательским замыслом. Их сущность сводится к тому, что:

а) упрочняющие воздействия могут быть реализованы на любом из этапов изготовления инструментального материала;

б) вид, назначение и количество упрочняющих воздействий могут быть многовариантны для любого из этапов изготовления;

в) рассмотрены три основных этапа осуществления упрочняющих воздействий:

- этап изготовления основы инструментального материала;

- этап архитектурирования покрытия;

- этап упрочнения покрытия;

г) упрочняющие воздействия разработаны для инструмента, выполненного из твёрдого сплава, режущей керамики и сверхтвёрдых материалов;

д) технологические процессы изготовления инструмента разработаны как набор последовательностей упрочняющих воздействий для достижения разного уровня работоспособности инструмента;

е) для оценки качества инструмента применены физические методы (экзоэлектронная и акустическая эмиссия) исследования состояния инструментального материала, установлены виды связи контролируемых параметров с эксплуатационными свойствами инструмента и найдены корреляции для прогнозирования его работоспособности.

Структура предлагаемой концепции комплексного подхода к проблеме повышения работоспособности инструмента представлена на рис. 1 – 2.

Отдельные результаты и их обсуждение

Ниже приведено несколько примеров выбора (проектирования) эффективного технологического процесса для тех или иных условий резания в сравнении с известными решениями.

Пример 1. Обработка специальных материалов.

Рассмотрим случаи обработки броневой судостроительной стали АК-29 и труднообрабатываемого титанового сплава ВТ-3-1 (применяется в авиа- и судостроении).

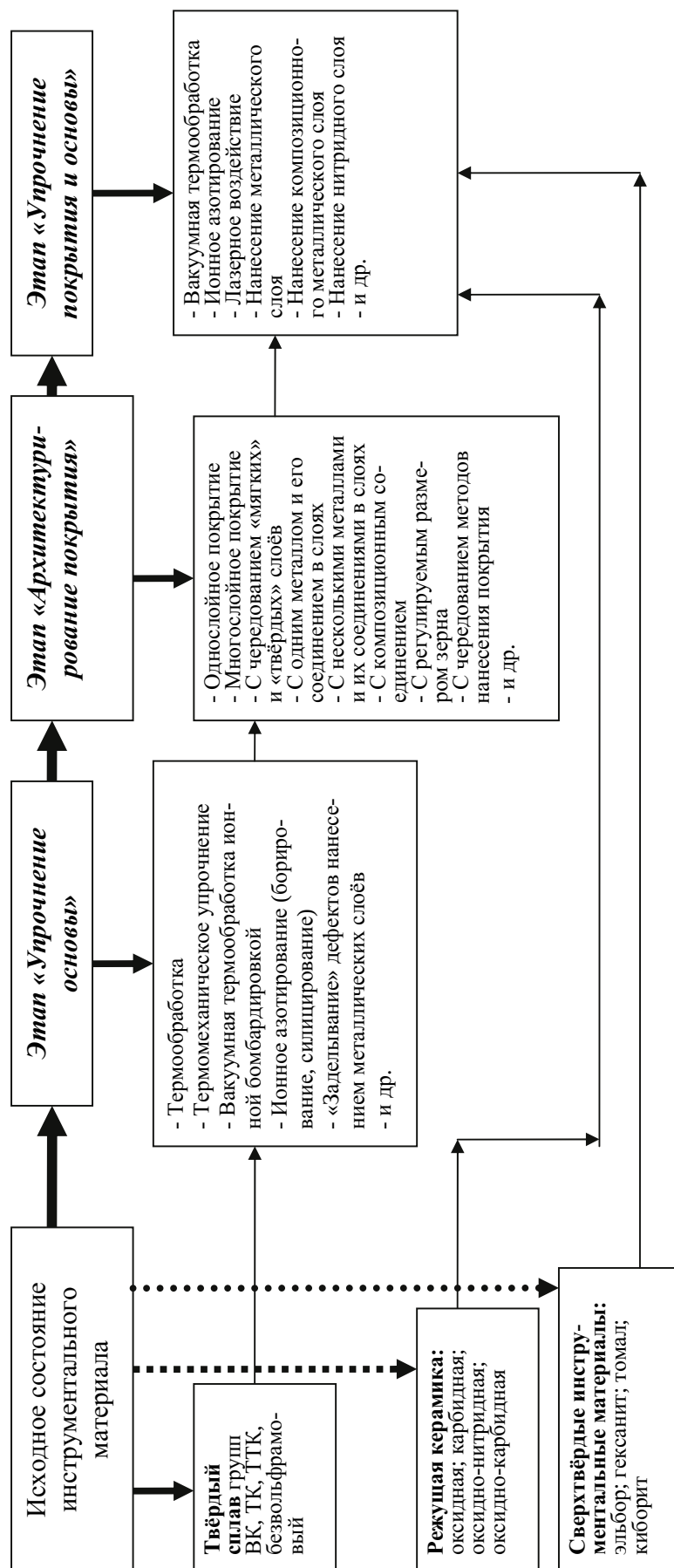


Рис. 1. Структура концепции многостадийных технологических процессов изготовления инструмента как последовательности воздействий по упрочнению исходного инструментального материала

Проведены исследования качества инструмента по работоспособности (по величине периода стойкости и коэффициенту его вариации) различных разработанных инструментальных материалов и инструмента, изготовленного зарубежными производителями по современным технологиям. Три лучших решения расположим в порядке роста качества инструмента. Это означает, что инструмент, расположившийся на самом высоком (правый столбец в табл. 1) месте, имеет максимальную работоспособность и обработал самое большое число заготовок. На втором месте инструмент с худшим результатом и т.д. Из данных табл. 1 следует, что указанные решения (строка 3) превосходят известные решения или конкурируют с ними (столбец 3 строка 4).

Таблица 1

Сопоставление эффективности разработанных и существующих приёмов упрочнения твёрдого сплава

Материал	Вид обработки	1	Три лучших (в порядке роста периода стойкости) инструментальных материалов		
1	2		3	4	5
АК-29	Точение	2	Balzers	BK8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZrMo)N + ZrMo; BK8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr	
	Фрезерование	3	BK8 + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr	BK8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr	BK8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZrMo)N + ZrMo
ВТ-3-1	Точение в нормальных условиях	4	BK8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZrMo)N + ZrMo; Мицубиси; Balzers	Corloy Inc.	BK8 + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr
	Точение «на удар»	5	Corloy Inc.; Сандвик коромант	BK8 + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr	BK8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr
	Фрезерование	6	Мицубиси; Corloy Inc.; Balzers	BK8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZrMo)N + ZrMo	BK8 + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr

Примечание: 1. иа – ионное азотирование; 2. Мицубиси, Вольф, Corloy Inc., Сандвик коромант – условное обозначение импортного инструмента (место производства) с современным многослойным покрытием, остальное – инструмент собственного производства по разработанным технологическим приемам; 3. данные получены в равных условиях резания по результатам многократных (от 5 до 10 экспериментов с коэффициентом вариации стойкости не более 0,3) испытаний

Решения были получены за счёт правильного вовлечения иерархии механизмов упрочнения инструментального материала на этапе проектирования его эксплуатационных свойств либо путём последовательного подбора упрочняющих воздействий.

В этом и состоит преимущество предлагаемой концепции. Например, пробный техпроцесс не позволил получить нужный результат. Брали из арсенала следующий техпроцесс (см. рис. 1), т.е. к уже апробированному техпроцессу добавляли ещё одно или несколько упрочняющих воздействий, использующих тот или иной механизм упрочнения инструментального материала. Опять проверяли результат. И так до тех пор, пока не получали нужный результат. Либо применяли метод акустической эмиссии для прогнозирования работоспособности инструмента ещё на стадии пробного техпроцесса его изготовления.

Пример 2. Колёсотокарная обработка.

Так сложилось в мировой практике, что разработчик (или производитель) нового инструмента выходит на мировой рынок с цифрами, показывающими рациональность данного инструмента в сравнении с другими инструментами именно при восстановительной токарной обработке поверхностей катания колёс грузовых вагонов (это жесточайшие условия резания с глубиной резания до 14 мм из-за того, что приходится режущим лезвием заглубляться под слои, самозакалённые в результате юза и пробуксовки колёс).

Полученные нами результаты при обработке колёс со скоростью резания 50-90 м/мин, подачей 2,0-0,8 мм/об при глубине резания 4-12 мм (меньшие значения – для чистовой обработки) тангенциальной пластиной формы LNMХ (301940) приведены в табл. 2. Из данных табл. 2 следует, что разработанный инструмент (два правых столбца) имеет не только более высокий коэффициент стойкости. Он более надёжен, т.к. имеет меньшие значения коэффициента вариации.

Таблица 2

Сравнительная износостойкость разработанного и импортного инструмента

Сравниваемые показатели	Инструмент фирмы «Sandvik Coromant» с наноструктурным многослойным покрытием AT15S + TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN	Инструмент фирмы Corloy Inc. (Корея) с наноструктурным многослойным покрытием Ti + TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN	Разработанный инструмент AT15S + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZrMo)N + ZrMo + лазерное упрочнение	Разработанный инструмент T14K8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr
Коэффициент стойкости до износа 0,8 мм	1,0	1,2	1,6	1,3
Коэффициент вариации стойкости	0,47	0,33	0,32	0,29
Примечание: иа – ионное азотирование поверхности пластины; лазерное упрочнение – воздействие лучом лазера на покрытие с целью «залечивания» его дефектов				

Пример 3. Токарная обработка высокопрочного чугуна.

Результаты приведены для режима резания: глубина 0,13 мм, подача 0,08 мм/об, скорость резания 195 м/мин. Иллюстрация результатов приведена на рис. 3.

Анализ гистограммы позволяет заключить следующее:

а) Ударно-циклический характер нагружения инструмента (обработка поверхности с пазами) снижает период стойкости инструмента в 2,73 раза (из сопоставления столбцов 1 и 2) в сравнении с обработкой непрерывной поверхности. Достичь того уровня работоспособности, который имеет место при обработке непрерывной поверхности, не позволяет ни один из разработанных технологических приёмов упрочнения инструмента.

б) Применение покрытий с цирконием (столбцы 6 и 7) более эффективно, чем с титаном (столбцы 4 и 5).

Разработанные методы исследования свойств инструмента с использованием акустической эмиссии (АЭ) разнообразны по назначению и используемому параметру. Установлено, что акустический метод оценки свойств более достоверен, чем традиционный коэрцитивный метод. Оценка трещиностойкости наиболее просто обеспечивается при использовании эталона путём сравнения испытываемого образца с эталоном. Отношение числа N2 сигналов АЭ при нагружении инструмента к числу сигналов N1 при нагружении эталона характеризует трещиностойкость инструмента: чем меньше это отношение, тем выше сопротивляемость материала инструмента образованию и росту трещин. Физический смысл этого состоит в

следующей посылке: чем меньше суммарный счёт N2 у исследуемого образца, тем меньше событий в нём произошло за время нагружения. Наиболее вероятные события – это образование и рост трещин.

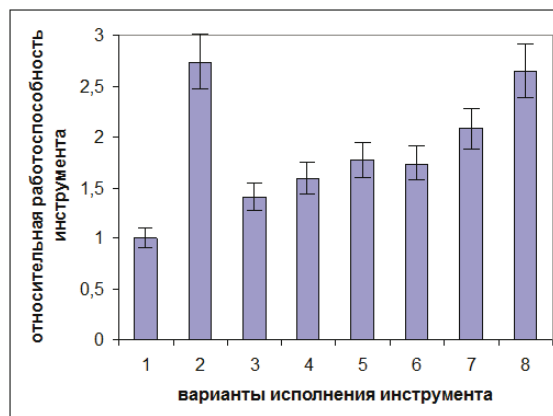


Рис. 3. Гистограмма относительной работоспособности инструмента с различным состоянием инструментального материала при точении детали «импеллер» (за единицу принят период стойкости ВОК-60 в исходном состоянии): 1 – ВОК-60 в исходном состоянии; 2 – то же при обработке непрерывной поверхности; 3 – ВОК-60 после стабилизирующей термообработки; 4 – ВОК-60 после стабилизирующей термообработки и нанесения покрытия из титана; 5 – ВОК-60 после стабилизирующей термообработки и нанесения покрытия из титана + нитрида титана; 6 – ВОК-60 после стабилизирующей термообработки и нанесения покрытия из циркония; 7 – ВОК-60 после стабилизирующей термообработки и нанесения покрытия из циркония + нитрида циркония; 8 – ВОК-60 круглой формы после стабилизирующей термообработки и нанесения покрытия из циркония + нитрида циркония

Большими возможностями оценки качества инструмента обладают те методы, которые позволяют исследовать параметры АЭ в кинетике нагружения материала. Из всех разработанных динамических методов нагружения здесь приведены сведения по маятниковому скрайбированию (новизна защищена патентами РФ на изобретения № 2140075, 2140076, 2138039, 2138038, 2147735, 2147737, 2124715). Установлен вид связи отдельных параметров АЭ с физико-механическими или эксплуатационными свойствами инструментального материала. Так, например, из анализа графиков накопления энергии E сигналов (физический смысл: площадь под кривой графика пропорциональна накопленной работе разрушения) во время нагружения образца следует, что образование трещин в твёрдосплавном материале с покрытием начинается позже, чем без покрытия, хотя на разрушение покрытия не требуется значительной работы. Этим, в частности, подтверждена сложная и многофункциональная роль покрытий на инструменте, в том числе во взаимосвязи с материалом основы и процессами в поверхностных слоях основы инструментального материала.

При анализе графиков скорости изменения плотности энергии по безразмерному коэффициенту Kp оценки долей вязкого и хрупкого механизмов разрушения с учётом распределения амплитуд акустических сигналов установлено, что традиционные архитектуры покрытий инициируют развитие хрупкого механизма разрушения в инструментальном материале, причем акты хрупкого разрушения протекают с большими амплитудами сигналов, число таких актов велико, а интенсивность сигналов значительна. Применение в покрытиях «мягких» металлических слоёв даже при малости толщины такого слоя резко повышает долю вязкого механизма разрушения, что требует большей величины работы на разрушение и соответственно влечёт за собой повышение работоспособности инструмента. Этим, в частности, подтверждена целесообразность и необходимость исполнения покрытий с чередованием «мягких» и «твёрдых» слоёв в покрытии.

Методология исследования свойств материалов маятниковым акустическим методом положена в основу разработки методов оценки свойств инструментальных материалов с тем, чтобы на основе большего, чем при обычном акустическом методе оценки, числа параметров АЭ без субъективного фактора оперативно производить оценку свойств. Например, метод оценки трещиностойкости инструмента по частоте сигналов АЭ реализуется на основе сравнительного анализа зависимости спектральной плотности (спектра мощности) от частоты сигналов АЭ (см. рис. 4).

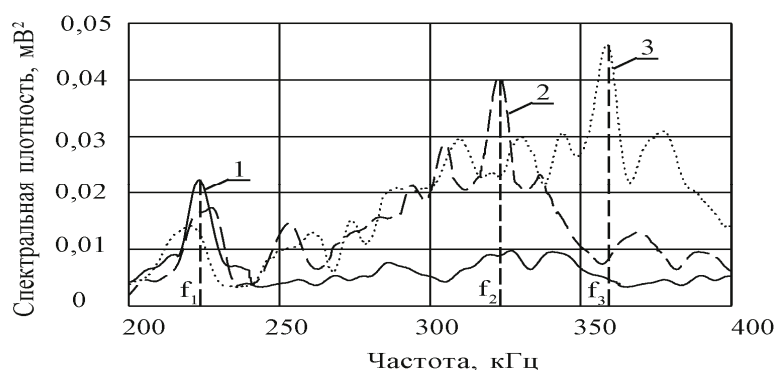


Рис. 4. Пример записи спектров частот сигналов образцов:
1 – BK8; 2 – BK8 + Zr + ZrN; 3 – BK8 + TiC + TiCN + NiN

Установлено, что значение частоты, характеризующей пик спектральной плотности (значение f_1 для кривой 1 на рис. 4, значение f_2 для кривой 2 и т.д.), имеет корреляцию с трещиностойкостью инструментального материала. Установлено, что чем выше значение характеристической частоты f , тем выше работоспособность инструмента за счёт лучшей его трещиностойкости. Физический смысл установленных зависимостей состоит в следующем: образование и рост мелких трещин сопровождается генерацией сигналов АЭ большой (высокой) частоты, крупных трещин – генерацией сигналов малой (низкой) частоты.

Общие рекомендации

Для конкретных условий эксплуатации инструмента из разработанного арсенала эффективный технологический процесс должен выбираться исходя из учёта стоящих задач не только на основе учёта периода стойкости инструмента. Здесь важны экономические показатели.

Рациональные области применения разработанных инструментов приведены в табл. 3 и на рис. 5.

Выводы

На основании выполненного комплекса теоретико-экспериментальных исследований [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9] предложены научно обоснованные технологические и технические решения, направленные на повышение периода стойкости металлорежущего инструмента при обработке заготовок из специальных материалов, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса. Получены следующие основные результаты и выводы:

1. Созданы методология и концепция комплексного подхода к решению проблемы повышения эксплуатационных свойств металлорежущего инструмента, состоящие в разработке арсенала технологических упрочняющих воздействий на каждой стадии его изготовления.

Таблица 3

Рекомендации по областям применения разработанного инструмента

Группа обрабатываемых материалов	Вид обработки	Схема технологического процесса изготовления инструмента	Рекомендуемая скорость резания, м/мин	Коэффициент повышения стойкости
Специальные легированные стали для колёс локомотивов и вагонов	Колёсотокарная обработка	AT15S + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZrMo)N + ZrMo + лазерное упрочнение	50-80	1,6 в сравнении с AT15S + TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN
		T14K8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr		1,3 в сравнении с AT15S + TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN
Титановые сплавы BT-3-1, BT 20	Точение в нормальных условиях	BK8 + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr	40-80	2,1 в сравнении с инструментом фирмы Сандвик Коромант
	Точение «на удар»	BK8 + и.а. + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr	35-60	2,6 в сравнении с инструментом фирмы Сандвик Коромант
	Торцевое фрезерование	BK8 + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr BK8 + и.а. + TiC + Ti + Zr + (TiZrMo)N + ZrMo	60- 80	1,4 – 1,6 в сравнении с инструментом фирмы Сандвик Коромант
Судостроительные стали АК-29, АК-32ПК	Точение	BK8 + иа + TiC + Ti + Zr + (TiZrMo)N + ZrMo; BK8 + и.а. + TiC+Ti +Zr + (TiZr)N + Zr	140-200	3,6 – 4,2 в сравнении с инструментом фирмы Corlov
	Торцевое фрезерование	BK8 + и.а. + TiC + Ti + Zr + (TiZrMo)N + ZrM BK8 + и.а. + TiC + Ti + Zr + (TiZr)N + Zr	120-160	4,2 – 4,4 в сравнении с инструментом фирмы Corlov
	Точение	ВОК 71 + вакуумная термообработка + Nb + Zr	150-280	1,8 в сравнении с BK8 + TiN + TiCN + TiN
		ВОК-60 + науглероживание + термообработка + ионная очистка + Zr + ZrN + термообработка	120	2,6 в сравнении с ВОК-60
Высокопрочный чугун	Точение «на удар»	ВОК-60 + вакуумная термообработка + Zr + ZrN	195	2,0 в сравнении с ВОК-60
		Киборит с ионным азотированием + (Ti, Zr) + ZrN.	195	6,4 в сравнении с BK8 и 3,5 раза в сравнении с ВОК-60

Это позволяет управлять работоспособностью инструмента и выбирать эффективный технологический процесс изготовления инструмента применительно к конкретным условиям эксплуатации и обеспечивает увеличение периода стойкости в 2...6 раз по сравнению с неупрочнённым инструментом и до двух раз по сравнению с новейшими решениями.

2. Эффективность упрочняющих воздействий существенно различается для разных инструментальных материалов. Например, вакуумная термообработка твёрдого сплава по

величине прироста периода стойкости инструмента до 30 % менее эффективна, чем вакуумная термообработка режущей керамики или сверхтвёрдого инструментального материала и наоборот, нанесение покрытия до двух раз более эффективно для твёрдого сплава, чем для режущей керамики и сверхтвёрдых инструментальных материалов.

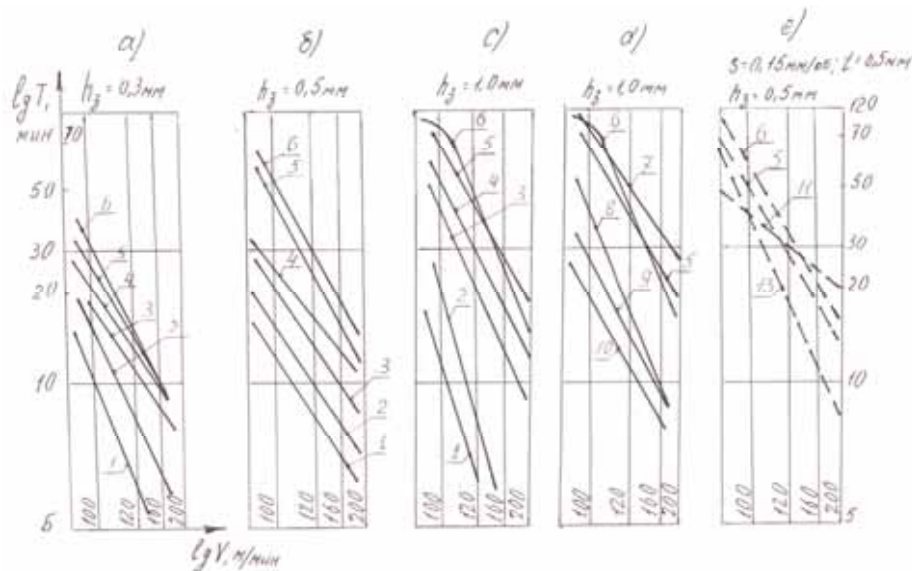


Рис. 5. График влияния элементов режима резания (V – скорость резания) на период стойкости T инструмента при токарной обработке заготовок из специализированной судостроительной стали АК-29 (а, б, в) и АК-32П (г, д) при подаче $S = 0,3$ мм/об, глубине резания 1,5 мм и разной величине допустимого износа h_3 : **1** – ВК8+TiN; **2** – ТТ10К8Б+TiN; **3** – инструмент с покрытием производства фирмы Мицубиси; **4** – ВК6ОМ+(TiMo)N (изменение размера зерна в покрытии по В.П. Табакову); **5** – ТТ10К8Б+TiC+(TiCr)N (по А.С. Верещаке); **6** – ВК8+и.а.+TiC(ГТ)+Ti+Zr+(TiZrMo)N+ZrMo; **7** – ТТ10К8Б+и.а.+TiC(ГТ)+Ti+Zr+(TiZrMo)N+ZrMo; **8** – ВК8+и.а.+Ti+(TiZrMo)N+ZrMo+лазер; **9** – ТТ10К8Б+TiC(ГТ)+Ti+Zr+(TiZrMo)N; **10** – ВК8+тз+Ti+(TiZrMo)N+Zr+лазер; **11** – инструмент с покрытием изготовлен фирмой Сандвик Коромант; **12** – инструмент с покрытием изготовлен фирмой Corlov; **13** – ТТ10К8Б+и.а.+TiC(ГТ)+Ti+(TiZrMo)N+ZrMo; приняты условные обозначения: ГТ – газотермический метод осаждения покрытия; и.а. – ионное азотирование; тз – термозаточка основы инструментального материала

3. Уровень эффективности одинакового упрочняющего воздействия на режущую керамику и сверхтвёрдые инструментальные материалы сопоставим (отличие в несколько процентов). Это объясняется ограниченными возможностями вовлечения механизмов упрочнения по сравнению с твёрдым сплавом и создаёт предпосылки для применения более дешёвого материала и технологического приёма упрочнения.

4. Степень повышения периода стойкости металлорежущего инструмента в результате воздействия на него совокупности нескольких технологических воздействий не равна алгебраической сумме эффектов его повышения от каждого воздействия в отдельности. Как правило, общий эффект прироста стойкости меньше суммы эффектов повышения стойкости отдельных технологических воздействий. Однако при реализации смежных механизмов упрочнения в совокупности воздействие общий эффект прироста стойкости значительно выше суммы эффектов повышения стойкости отдельных воздействий. Так, чередование в покрытии слоёв различной твёрдости по сравнению с таким же количеством слоёв одинаковой твёрдости обеспечивает более высокую стойкость.

5. Достижение сверхэффектов повышения периода стойкости осуществимо при реализации смежных механизмов упрочнения. Таким образом, в совокупности воздействий следует использовать сразу нескольких иерархических уровней механизмов упрочнения инструментального материала, причём чем больше уровней, тем выше эффект, а пропуск хотя бы одной стадии хотя бы на одном из этапов изготовления сопровождается снижением эффекта.

6. Эффективность технологических процессов изготовления твёрдосплавного металлорежущего инструмента наиболее значимо растёт:

- на стадии подготовки основы инструментального материала за счет термообработки ионной бомбардировкой – в 1,5 раза, а также в 1,8 раза за счёт удаления дефектных зёрен, образовавшихся при алмазно-абразивной обработке пластин, стабилизации внутренних напряжений в пластине и образования ювенильных химически активных областей;

- на стадии архитектурирования покрытий за счет однократного чередования «мягких» и «твёрдых» слоёв в покрытии в 3 раза, за счет многократного чередования «мягких» и «твёрдых» слоёв в 5 раз вследствие торможения роста трещин вязкой составляющей покрытия;

- на стадии снижения дефектности покрытий в 1,5 раза за счёт лазерного упрочнения, способствующего локальному перераспределению внутренних напряжений в режущей пластине и технологическому заполнению трещин и несплошностей.

7. Разработаны рекомендации по выбору рациональных технологических процессов изготовления пластин металлорежущих инструментов в зависимости от требуемого уровня периода стойкости и экономических ограничений. При невысоких требованиях к уровню периода стойкости (увеличение до 1,5 раз) наиболее рациональными являются технологические упрочняющие воздействия на исходную инструментальную основу.

8. Технологические процессы изготовления пластин из режущей керамики и сверхтвёрдых инструментальных материалов обеспечиваются теми же приёмами, что и для твёрдого сплава, но для них наиболее эффективны вакуумная термообработка основы (увеличение стойкости в 1,7 раза) и нанесение металлических слоёв покрытия (увеличение стойкости в 1,3 раза).

9. Комбинированием технологической последовательности упрочняющих воздействий возможно частичное перекрытие областей эффектного применения групп инструментальных материалов, в частности, при точении высокопрочных отбелённых чугунов твёрдосплавный инструмент замещён керамическим с увеличением скорости резания в 2 раза без ущерба качеству, а периода стойкости инструмента в 6 раз.

10. Разработанный комплекс способов оценки качества инструмента позволяет прогнозировать работоспособность инструмента по результатам оценки физико-механических и эксплуатационных свойств инструментальных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мокрицкий, Б. Я. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путём управления свойствами инструментального материала: моногр. / Б. Я. Мокрицкий. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 232 с.
2. Современные методы конструирования, контроля качества и прогнозирования работоспособности режущего инструмента / Ю. Г. Кабалдин, Б. Я. Мокрицкий, Н. А. Семашко, С. П. Тараев. – Владивосток, ДВГУ, 1990. – 122 с.
3. А.с. СССР № 1372976. Многослойное покрытие и способ его получения / Ю. Г. Кабалдин, Б. Я. Мокрицкий, С. А. Изотов, А. А. Бурков, В. Н. Аникин, Н. А. Семашко, Б. П. Щелкунов. – Опубл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
4. А.с. СССР № 1367529. Способ изготовления твёрдосплавного инструмента / Ю. Г. Кабалдин, Б. Я. Мокрицкий, А. А. Бурков, С. А. Изотов, А. А. Андреев, В. Н. Аникин, Б. П. Щелкунов. – Опубл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
5. А.с. СССР № 1351154. Способ обработки режущего инструмента / Ю. Г. Кабалдин, Б. Я. Мокрицкий, А. А. Андреев, С. А. Изотов, Н. Е. Кожевников, А. А. Бурков, Ю. В. Дунаевский. – Опубл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
6. Мокрицкий, Б. Я. Управление работоспособностью инструмента при нанесении покрытий / Б. Я. Мокрицкий // СТИН. – 2010. – № 11. – С. 11-16.
7. Mokritsii, B.Ya. Estimating Tool Properties on the Basis of Acoustic Emission / B. Ya. Mokritsii // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, № 10. – Pp. 1026-1028.
8. Мокрицкий, Б. Я. Управление работоспособностью металлорежущего инструмента путём нанесения покрытий / Б. Я. Мокрицкий // Металлообработка. – 2010. – № 3. – С. 12-15.
9. Мокрицкий, Б. Я. Управление работоспособностью металлорежущего инструмента путём нанесения покрытий, механической упрочняющей обработки и контроля качества / Б. Я. Мокрицкий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 9. – С. 38-47.



Биленко С. В., Муравьев В. И., Саблин П. А., Серебренникова А. Г.

S. V. Bilenko, V. I. Muravyev, P. A. Sablin, A. G. Serebryannikova

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

MODELING THE DYNAMICS OF CUTTING IN HIGH MACHINING

Биленко Сергей Владимирович – заведующий кафедрой «Технология машиностроения», доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, пр. Ленина, 27. E-mail: s.bilenko@knastu.ru.

Mr. Sergey V. Bilenko – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr. E-mail: s.bilenko@knastu.ru.

Муравьев Василий Илларионович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Mr. Vassily I. Muravyev – Doctor of Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Mr. Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Серебренникова Анжела Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tehmarsh@knastu.ru.

Ms. Anzhela G. Serebrennikova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr. E-mail: tehmarsh@knastu.ru.

Аннотация. В настоящей статье рассматривается влияние оборотной подачи на толщину среза, а также способа обработки на направление математического ожидания силы резания. Установлено целесообразное направление резания и способов ориентации динамометрических датчиков. Статья содержит основные выводы зависимостей толщины срезаемого слоя при высокоскоростном фрезеровании с использованием разрывных функций. Излагаются рекомендации по расположению динамометрических датчиков для встречного и попутного фрезерования.

Summary. The paper considers the influence of feed per revolution upon the depth of a cut, and the impact of the machining method on the direction of tool pressure average. Efficient cutting directions and the methods for load cell orientation have been established. The paper also contains the key conclusions concerning the dependences of the cutting depth at high-speed milling if discontinuous functions are used. Recommendations are offered for positioning of load cells for cut-up milling and cut-down milling.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, динамометрические датчики, инструмент, силы резания, толщина срезаемого слоя.

Key words: high-speed milling, load cells, tools, tool pressure, depth of cut.

УДК 621.914.3

Разработка новых эффективных технологий для машиностроительного производства немыслима без исследований динамики технологических систем механической обработки. При проектировании, изготовлении и эксплуатации современных высокоскоростных металлорежущих станков все чаще возникает необходимость решения задач, связанных с динамикой процесса обработки. В первую очередь, это относится к обеспечению условий устойчивого движения инструмента и заготовки [1].

Наиболее нестационарным из всех процессов механической обработки и, обладающий вследствие этого наиболее сложной динамикой, является процесс высокоскоростного фрезерования.

Для практического исследования динамики фрезерования достаточно часто бывает полезным знать примерное значение суммы сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_k$ резания, приложенных к режущим кромкам инструмента, и направление вектора $\vec{F}$ равнодействующей этих сил в координатах станка. Данные параметры являются основополагающими как при расчетах погрешностей размерной точности обработки вследствие упругих перемещений технологической системы, так и при построении моделей процесса фрезерования (см. рис. 1).

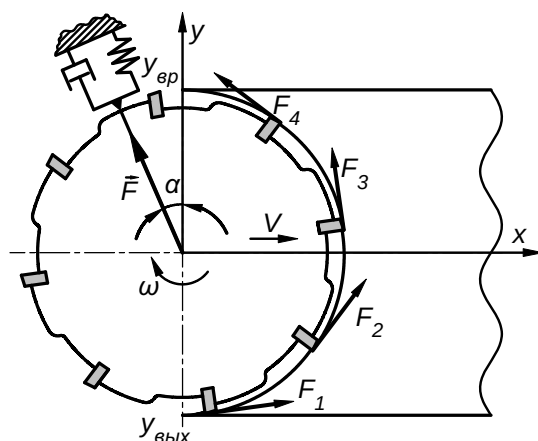


Рис. 1. Силевая схема процесса высокоскоростного фрезерования

Кроме того, заранее известные значения направления математического ожидания $\vec{F}$ равнодействующей сил резания и телесного угла ее разброса $\Delta\vec{F}$ позволят корректно, в соответствии с наиболее информативным пространственным направлением, расположить на станке систему датчиков для проведения экспериментальных исследований. В дальнейшем сигналы с этих датчиков с минимальной предобработкой могут быть использованы для исследования методами нелинейной динамики.

Как известно [2], при фрезеровании траекторией относительного рабочего движения любой точки режущего лезвия является удлиненная циклоида – трохоида (см. рис. 2). Высота трохоиды равна диаметру D фрезы, а расстояние между ее петлями равно величине подачи S_0 на один оборот фрезы. Траектории движения лезвий отдельных зубьев сдвинуты друг относительно друга на величину подачи S_z на один зуб фрезы, равную S_0/z , где z – число зубьев фрезы.

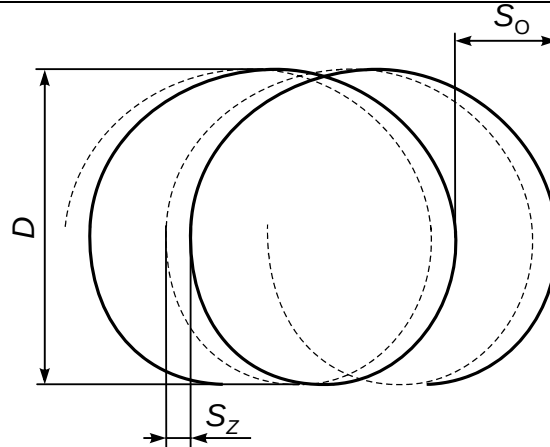


Рис. 2. Траектории рабочих движений двух смежных зубьев осевой цилиндрической фрезы (для $z = 4$, $S_o = 0,32D$)

Для упрощения расчета сил резания и вычисления размеров срезаемого слоя при фрезеровании трохоиду нередко заменяют окружностью. При этом предполагается [2], что ошибка от указанной замены не будет превышать 1 %. Однако в условиях высокоскоростной обработки (ВСО) даже такая незначительная погрешность может иметь существенное значение. Зачастую высокая скорость процессов пластической деформации при ВСО в совокупности с существенной нелинейностью зависимости силы резания от толщины среза и скорости резания приводят к возникновению особого типа поведения динамической системы – детерминированному хаосу, в результате чего динамическая система станка становится очень чувствительной даже к незначительным возмущениям [3; 4]. В режиме детерминированного хаоса любая погрешность, проявляющаяся вследствие какого-либо неучтенного фактора или неточности расчетов, подвергается экспоненциальному усилению и, в итоге, динамика реальной динамической системы сильно отличается от расчетных данных.

Таким образом, для условий высокоскоростного фрезерования следует использовать более тонкие расчеты силы резания. Для этого представим траекторию рабочего движения режущего лезвия при фрезеровании в виде кривой, описываемой точкой $A(x, y)$, отстоящей на фиксированном расстоянии $R = D/2$ от центра $O(x_0, y_0)$ круга, причем круг вращается по часовой стрелке с угловой скоростью $\omega = V_p / (2\pi \cdot D)$ (где V_p – скорость резания), а центр круга перемещается по оси абсцисс с линейной скоростью $v = S_o \cdot \omega / (2\pi)$. Тогда запишем траекторию движения зуба фрезы (сплошная линия на рис. 3) в виде системы параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = x_0 + R \cdot \cos(\varphi_0 - \omega\tau) \\ y = y_0 + R \cdot \sin(\varphi_0 - \omega\tau) \\ x_0 = S_o \cdot \frac{\omega}{2\pi} \cdot \tau \\ y_0 = 0 \end{cases},$$

где $\varphi_0 = \pi$ – начальный угол поворота фрезы; τ – параметр времени.

Теперь рассмотрим траекторию движения предыдущего зуба фрезы (штриховая линия на рис. 3). Отложим отрезок от центра O фрезы до точки A текущего положения режущего лезвия. Очевидно, что мгновенное значение толщины h_z срезаемого слоя равно расстоянию от точки A до точки A_1 пересечения отрезка OA и траектории движения предыдущего зуба. Найдем координаты x_2 и y_2 этой точки.

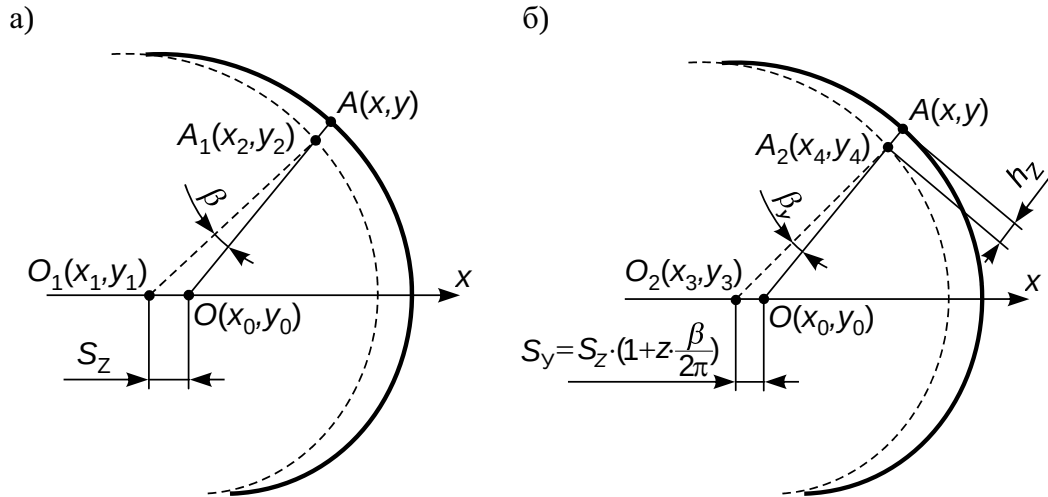


Рис. 3. Схема расчета мгновенного значения толщины h_z срезаемого слоя

Предположим, что центр фрезы в момент прохождения предыдущим зубом точки A_1 находился в точке $O_1(x_1, y_1)$ (см. рис. 3, а), отстоящей от текущего центра фрезы O на расстояние, равное подаче на зуб S_z , т.е.:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - S_z \\ y_1 = y \end{cases} \quad (1)$$

Теперь о точке A_1 нам известно, что, во-первых, она принадлежит отрезку OA :

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + t \cdot (x - x_0) \\ y_2 = y_0 + t \cdot (y - y_0) \end{cases}, \quad (2)$$

$$0 \leq t \leq 1, \quad (3)$$

где t – параметр принадлежности отрезку, а во-вторых, что она удалена от точки O_1 на расстояние, равное радиусу R фрезы:

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = R. \quad (4)$$

Подставляя формулы (1) и (2) в (4), получим следующее выражение:

$$(x_0 + t \cdot (x - x_0) - (x_0 - S_z))^2 + (y_0 + t \cdot (y - y_0) - y_0)^2 = R^2,$$

которое после преобразований обращается в квадратное уравнение вида:

$$t^2 \cdot R^2 + t \cdot (2 \cdot (x - x_0) \cdot S_z) + (S_z^2 - R^2) = 0. \quad (5)$$

Решим уравнение (5) относительно t по формуле

$$t_{1,2} = \frac{-2 \cdot (x - x_0) \cdot S_z \pm \sqrt{(2 \cdot (x - x_0) \cdot S_z)^2 - 4 \cdot R^2 \cdot (S_z^2 - R^2)}}{2 \cdot R^2},$$

что в конечном итоге приводит к выражению:

$$t_{1,2} = -\frac{S_z \cdot (x - x_0)}{R^2} \pm \sqrt{1 - \left(\frac{S_z \cdot (y - y_0)}{R^2} \right)^2}. \quad (6)$$

Так как по условию (3) параметр t неотрицателен, то один из корней t_2 уравнения (6), являющийся суммой двух отрицательных чисел и явно приводящий к отрицательному результату, можно отбросить. То есть получим:

$$t = \sqrt{1 - \left(\frac{S_z \cdot (y - y_0)}{R^2} \right)^2} - \frac{S_z \cdot (x - x_0)}{R^2}.$$

Зная параметр t , из (2) найдем точку $A_1(x_2, y_2)$. Однако при анализе рис. 3, а выявляется некоторая неточность – отрезки OA и O_1A_1 расположены относительно друг друга под углом β . А это значит, что точкам A и A_1 соответствуют разные фазы поворота зубьев фрезы и, следовательно, действительное расстояние между точками центров вращения не равно величине подачи S_z на зуб. Вычислим уточненное расстояние между точками центров вращения фрезы:

$$S_y = S_z + \frac{\beta}{2\pi} \cdot S_0 = S_z \cdot \left(1 + z \cdot \frac{\beta}{2\pi} \right).$$

Для этого, воспользовавшись одним из свойств векторного произведения, вычислим значение угла β по формуле

$$\beta = \arcsin \frac{\begin{vmatrix} (x_2 - x_0) & (y_2 - y_0) \\ (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \end{vmatrix}}{\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}},$$

которая после упрощения сводится к выражению:

$$\beta = \arcsin \frac{S_z \cdot (y_0 - y)}{R^2} = \arcsin \frac{-S_z \cdot y}{R^2} \quad (7)$$

Нетрудно заметить, что максимального своего абсолютного значения угол β достигает при условии $|y| = R$, когда он становится равным $\mp \arcsin(S_z/R)$. Таким образом, для условий фрезерования, соответствующих траекториям, отображенным на рис. 2 – 3, получим $S_z = 0,08D = 0,16R$, $\beta_{\max} = \pm 9,2^\circ$. То есть погрешность наших вычислений может достигать величины $\pm 9,2^\circ/360^\circ = \pm 2,6\%$.

Чтобы скомпенсировать данную погрешность, найдем уточненную точку $O_2(x_3, y_3)$ (см. рис. 3, б), в которой находился центр вращения фрезы в момент пересечения предыдущим зубом отрезка OA :

$$\begin{cases} x_3 = x_0 - S_y \\ y_3 = y \end{cases} \quad (8)$$

Тогда в соответствии с вышеописанным алгоритмом найдем уточненную точку $A_2(x_4, y_4)$, которая принадлежит отрезку OA :

$$\begin{cases} x_4 = x_0 + t_y \cdot (x - x_0) \\ y_4 = y_0 + t_y \cdot (y - y_0) \end{cases}, \quad (9)$$

$$0 \leq t_y \leq 1, \quad (10)$$

где t_y – уточненное значение параметра, и находится на расстоянии R от точки O_2 :

$$\sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2} = R. \quad (11)$$

С учетом (7), (8) и (11) получим следующее выражение для t_y :

$$t_y = \sqrt{1 - \left(\frac{S_y \cdot (y - y_0)}{R^2} \right)^2} - \frac{S_y \cdot (x - x_0)}{R^2}.$$

Отсюда, исходя из того, что толщина срезаемого слоя $h_z = |A_2A|$, где $|A_2A|$ – длина отрезка A_2A (см. рис. 3, б), отношение длин отрезков $|O_2A_2|/|OA| = t_y$ и значение $|OA| = R$, получим формулу для вычисления мгновенного значения h_z , которая с учетом (10) приобретет вид разрывной функции:

$$h_z(\tau) = \begin{cases} R \cdot (1 - t_y(\tau)) & \text{при } 0 \leq t_y(\tau) \leq 1 \\ 0 & \text{при } t_y(\tau) < 0 \text{ или } t_y(\tau) > 1 \end{cases}. \quad (12)$$

Следует отметить, что для расчета S_y мы использовали значение угла β , вычисленное по формуле (7). Поэтому для оценки погрешности вычислений необходимо выяснить насколько реальное значение угла β_y между отрезками OA и O_2A_2 в наших уточненных расчетах отличается от значения β , взятого за исходное. Величину β_y рассчитаем по формуле, аналогичной (7), но с учетом того, что параметры S_y и y зависят от параметра времени τ :

$$\beta_y(\tau) = \arcsin \frac{S_y(\tau) \cdot y(\tau)}{R^2}.$$

Численная проверка с помощью компьютерных расчетов показала, что расхождение между β_y и β составляет $\pm 0,05^\circ$, то есть погрешность вычислений равна $\pm 0,015\%$.

Зная значение $h_z(\tau)$ толщины срезаемого слоя, согласно методике [5] найдем величину силы резания, приложенной к одному зубу:

$$F_z(\tau) = h_z(\tau) \cdot t_\phi \cdot K_C, \quad (13)$$

где t_ϕ – глубина фрезерования; K_C – удельная сила резания, приходящаяся на единицу площади срезаемого слоя.

Величина K_C различна для разных обрабатываемых материалов и определяется по формуле

$$K_C = K_{C1} \cdot h_z^{-m_C}, \quad (14)$$

где K_{C1} – удельная сила резания (для конкретного обрабатываемого материала) при толщине стружки 1 мм; m_C – степенной показатель зависимости удельной силы резания от толщины стружки.

Исходя из (13) и (14), получим:

$$F_z(\tau) = h_z(\tau)^{1-m_C} \cdot t_\phi \cdot K_{C1}.$$

Значения параметров K_{C1} и m_C для различных материалов приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Материал	K_{C1}	m_C	Материал	K_{C1}	m_C
Сталь (HB125)	1500	0,25	Сплав жаропрочный	2900	0,25
Сталь (HB150)	1600	0,25	Титановый сплав	1400	0,23
Сталь легир. (HB175)	1700	0,25	Сталь кален. (HRC55)	4200	0,25
Сталь легир. (HB330)	2300	0,25	Сталь кален. (HRC63)	4250	0,25
Сталь нерж. (HB200)	2000	0,21	Чугун	900	0,28
Сталь нерж. (HB230)	2000	0,21	Алюминиевый сплав	700	0,25

Согласно предложенной методике рассчитаем ширину срезаемого слоя и силу резания для алюминиевого сплава (см. рис. 4). Для иллюстрации используем фрезы с числом зубьев z , равным 1, 8 и 300, а величину подачи S_z на зуб примем постоянной, равной 1 мм.

На графиках хорошо заметно, что чем больше оборотная подача S_0 (зависящая от z при $S_z = \text{const}$), тем более асимметрично выглядят графики толщин h_z и, следовательно, тем сильнее реальные значения h_z отличаются от тех значений, которые бы мы получили аппроксимацией трохоидальных траекторий режущих лезвий участками окружностей.

На практике, при высокоскоростном фрезеровании, режимов резания полным диаметром фрезы ($B = D$) стараются избегать, так как такой режим обработки сильно нагружает инструмент и катастрофически сокращает его ресурс. Для каждого высокоскоростного инструмента существуют рекомендуемые значения ширины B фрезерования при обработке различных материалов, превышение которых ведет к изменению теплового режима и, как следствие, к усиленному износу инструмента. Так, для инструментов фирмы *Sandvik Coromant* при обработке алюминиевых сплавов рекомендуется выбирать $B = 0,6D$, при обработке закаленных сталей – $B = 0,2D$ [5].

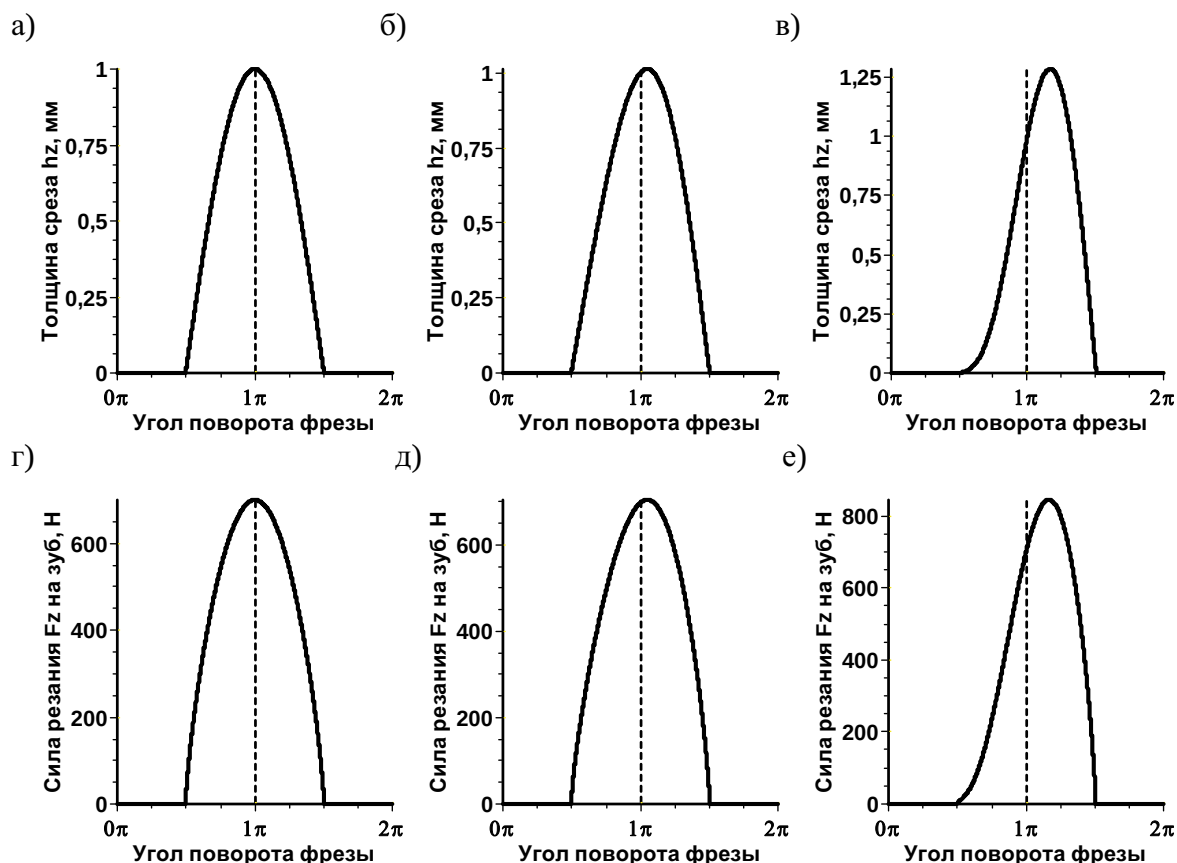


Рис. 4. Графики зависимостей ширины срезаемого слоя h_z и силы F_z резания, приложенной к одному зубу, при обработке алюминиевого сплава цилиндрической фрезой $D = 100$ мм с различным количеством зубьев: а, г – $z = 1$; б, д – $z = 8$; в, е – $z = 300$ ($S_z = 1$ мм, $t_\phi = 1$ мм, ширина фрезерования $B = D$).

Добавим условие обработки неполным диаметром фрезы в выражение (12) в виде дополнительных разрывных зависимостей. Тогда функция мгновенного значения толщины срезаемого слоя при фрезеровании приобретет вид:

$$h_z(\tau) = \begin{cases} R \cdot (1 - t_y(\tau)) & \text{при } (0 \leq t_y(\tau) \leq 1) \wedge (y_{\text{вых}} \leq y(\tau) \leq y_{\text{вр}}) \\ 0 & \text{при } (t_y(\tau) < 0) \vee (t_y(\tau) > 1) \vee (y(\tau) > y_{\text{вр}}) \vee (y(\tau) < y_{\text{вых}}) \end{cases},$$

где $y_{\text{вр}}$ и $y_{\text{вых}}$ – ординаты врезания и выхода соответственно, определяемые в зависимости от способа обработки:

- для симметричного фрезерования (см. рис. 1) $y_{\text{вр}} = B/2$, $y_{\text{вых}} = -B/2$;
- для встречного фрезерования $y_{\text{вр}} = D/2$, $y_{\text{вых}} = y_{\text{вр}} - B$;
- для попутного фрезерования $y_{\text{вых}} = -D/2$, $y_{\text{вр}} = y_{\text{вых}} + B$.

Используем полученные математические зависимости для расчета силы резания при высокоскоростном фрезеровании. Первоначально определим, как изменяется суммарная сила $\vec{F}$ резания всех режущих лезвий фрезы в течение одного оборота инструмента. Проведенные компьютерные расчеты (см. рис. 5) показывают, что направление математического ожидания $\vec{F}$ силы резания сильно зависит от способа обработки. Так, при симметричном фрезеровании (см. рис. 5, а) математическое ожидание $\vec{F}$ направлено строго в направлении оси Y , при встречном фрезеровании (см. рис. 5, б) $\vec{F}$ составляет с осью Y положительный угол, а при попутном (см. рис. 5, в) – отрицательный.

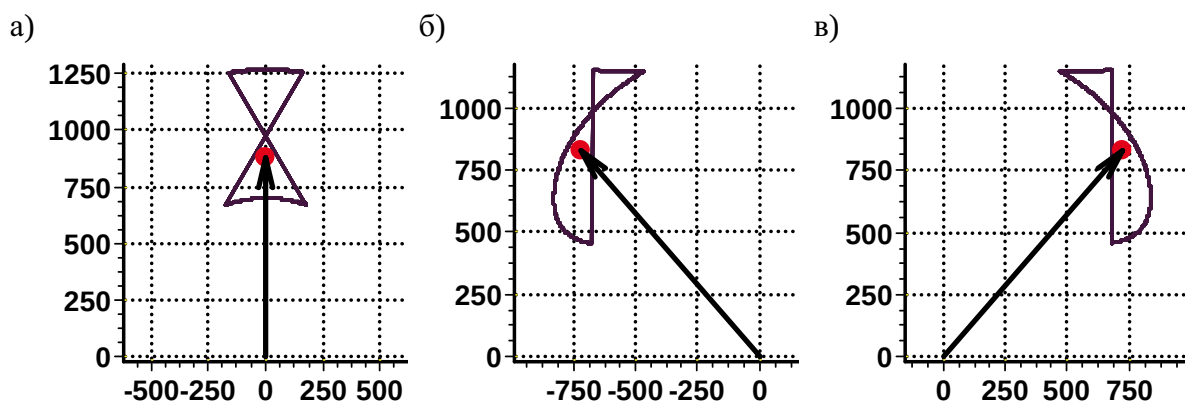


Рис. 5. Графики изменения проекций вектора $\vec{F}$ результирующей силы резания всех зубьев цилиндрической фрезы за один ее оборот: а – симметричное фрезерование; б – встречное; в – попутное. По осям абсцисс отложены проекции $\vec{F}$ на ось X (в Ньютонах), по осям ординат – проекции на ось Y (в тех же ед.), стрелкой показано математическое ожидание $\vec{F}$ ($D = 100$ мм, $z = 8$, $S_z = 1$ мм, $B = 0,5D$, алюминиевый сплав)

Следующим этапом рассмотрим, в какой степени на направление математического ожидания силы резания влияет величина ширины B фрезерования. Для этого проведем численные расчеты, результаты которых представлены на рис. 6.

В соответствии с полученными графиками можно сделать вывод о том, что для проведения экспериментальных исследований динамики сил резания при высокоскоростном фрезеровании целесообразно придерживаться симметричного направления резания, так как в этом случае математическое ожидание $\vec{F}$ всегда будет направлено вдоль оси Y и, следовательно, систему динамометрических датчиков также следует ориентировать строго вдоль оси Y , что в технологическом плане достаточно удобно. Кроме того, при симметричном фрезеровании угол наклона $\vec{F}$ не зависит от ширины B обработки и поэтому нет необходимости менять ориентацию системы датчиков при смене обрабатываемого материала.

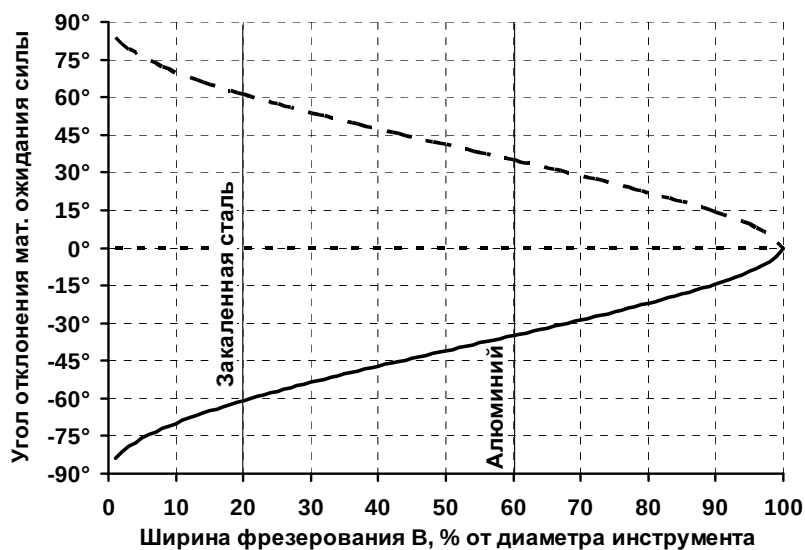


Рис. 6. Графики зависимости угла α наклона (относительно оси Y) математического ожидания F_{Σ} равнодействующей сил резания от ширины B фрезерования: встречное фрезерование (сплошная линия), попутное (штриховая линия), симметричное (пунктир)

При необходимости экспериментальные исследования можно проводить также для встречного и попутного фрезерования, но в этом случае систему измерительных датчиков необходимо будет ориентировать под существенным углом относительно оси Y : 37° для алюминия (рекомендованное значение $B = 0,6D$) и 61° для закаленных сталей (рекомендованное $B = 0,2D$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Кабалдин, Ю. Г. Исследование детерминированного хаоса в динамике процессов механообработки методом реконструкции аттрактора / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, С. В. Серый // Вестник машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 50-56.
4. Кабалдин, Ю. Г. Математическое моделирование динамической устойчивости процесса резания в виде нелинейного осциллятора с разрывными характеристиками / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, П. А. Саблин // Вестник машиностроения. – 2006. – № 10. – С. 35-43.
5. Материалы компании «Sandvik Coromant». URL: <http://www.coromant.sandvik.com>.

Шаломов В. И.

ИТОГИ ОПЫТНОЙ ПРОВЕРКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

Шаломов В. И.

V. I. Shalomov

**ИТОГИ ОПЫТНОЙ ПРОВЕРКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ**

**RESULTS OF EXPERIMENTAL TESTING OF THEORETICAL CALCULATIONS
OF OUTPUT CHARACTERISTICS OF A SPINDLE UNIT ON GAS-STATIK BEARINGS**



Шаломов Вячеслав Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: seu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav I. Shalomov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Heat Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: seu@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлены основные итоги экспериментальной проверки на опытном стенде теоретического расчёта выходных характеристик шпиндельных узлов с частично пористыми газостатическими опорами. Показаны результаты, свидетельствующие о достаточно качественном и количественном согласовании экспериментальных и расчетных выходных характеристик шпиндельного узла.

Summary. The paper presents key results of an experimental stand test of theoretical calculations of output characteristics of spindle units with partially porous gas static bearings. Results are presented which testify to both qualitative and quantitative matching of experimental and rated output characteristics of a spindle unit.

Ключевые слова: шлифовальный станок, шпиндельный узел, опытный стенд, выходные характеристики, режимы работы.

Key words: grinding machine, spindle unit, test stand, output characteristics, modes of operation.

УДК 621.924

Современные быстроходные и высокоточные шлифовальные, расточные и другие станки должны обеспечивать точность формы рабочих поверхностей порядка десятых долей микрометра при чистоте поверхности $R_a \leq 0,08$ мкм. Достижение таких показателей в небольшой степени связано с эксплуатационными качествами подшипников шпиндельных узлов (ШУ) металлорежущих станков.

Наибольшее распространение в ШУ получили подшипники качения. Однако опыт эксплуатации ШУ шлифовальных станков с опорами различных типов показывает, что в ряде случаев применение газовых подшипников более предпочтительно. Особенно следует выделить газостатические опоры, поскольку они способны, из-за усредняющего эффекта газового слоя, обеспечить точность вращения шпинделя, равную $0,02 \dots 0,04$ мкм.

Для решения задач теоретического и экспериментального исследований выходных характеристик ШУ, установленных на частично пористых газостатических опорах, в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете развита методика теоретического расчёта характеристик и разработан оригинальный опытный стенд для экспериментальной проверки расчетных данных.

В основе методики расчета выходных характеристик ШУ лежат численное решение уравнения Рейнольдса теории газовой смазки и система уравнений статики [2, 40].

Опытный стенд, имитирующий работу ШУ на газостатических подшипниках с пористыми вставками шпоночной формы [3, 52], позволил провести экспериментальные исследования выходных характеристик при угловых смещениях шпинделя. Основные геометрические размеры элементов и узлов ШУ: длина подшипников $L_1 = L_2 = 60$ мм; диаметр подшипников $D = 51,11$ мм; средний радиальный зазор $C = 50$ мкм; раздвижка линий наддува в опоре $b = 24$ мм; раздвижка опор $a = 213$ мм; вылет шпинделя $l = 67,3$ мм.

К важнейшим выходным характеристикам шпиндельного узла, характеризующим его точность и технологическую эффективность, относятся нагрузка и жесткость, измеренные на консоли шпинделя. В теоретических исследованиях характеристики выражены в безразмерной форме.

Для представления характеристик ШУ в зависимости от безразмерного комплекса прямо пропорционально среднему радиальному зазору в рассмотрение введен конструктивный параметр K_c , определяемый соотношением

$$K_c = c \cdot \sqrt[3]{\frac{\delta}{12 \cdot k_p \cdot R}},$$

где δ – высота пористой вставки, м; k_p – коэффициент проницаемости пористых вставок; R – радиус подшипника, м, [1, 51].

Одинаковое значение конструктивного параметра $K_c = 0,302$ принято и в теоретических, и в экспериментальных исследованиях.

Эксперименты проведены в статическом и гибридном режимах работы газостатических опор.

Статические эксперименты, соответствующие работе газовых опор в режиме подвеса, выполнены при абсолютном давлении наддува сжатого воздуха в подшипниках p_s , равном 0,297; 0,397; 0,495 и 0,573 МПа. Соответственно этим значениям относительное давление наддува $\bar{p}_s$ составляло 0,343; 0,258; 0,206 и 0,178. Выбор диапазона изменения давления сжатого воздуха на стенде основан на технических данных воздушной сети, применяемой на машиностроительных предприятиях. При постоянном значении установленного давления наддува в зазоре подшипников варьировалось давление сжатого воздуха на поршень нагрузочного устройства, имитирующего изменения механической нагрузки на шлифовальном круге шпинделя. С помощью микрометров измерялись угловые смещения вала в передней и задней опорах ШУ.

Результаты экспериментального исследования и теоретических расчётов относительной нагрузки на консоли вала $\bar{F}$ и коэффициента жёсткости $k_{\bar{F}}$ при работе ШУ в режиме подвеса и относительном давлении наддува $\bar{p}_s = 0,178$ представлены на рис. 1, 2.

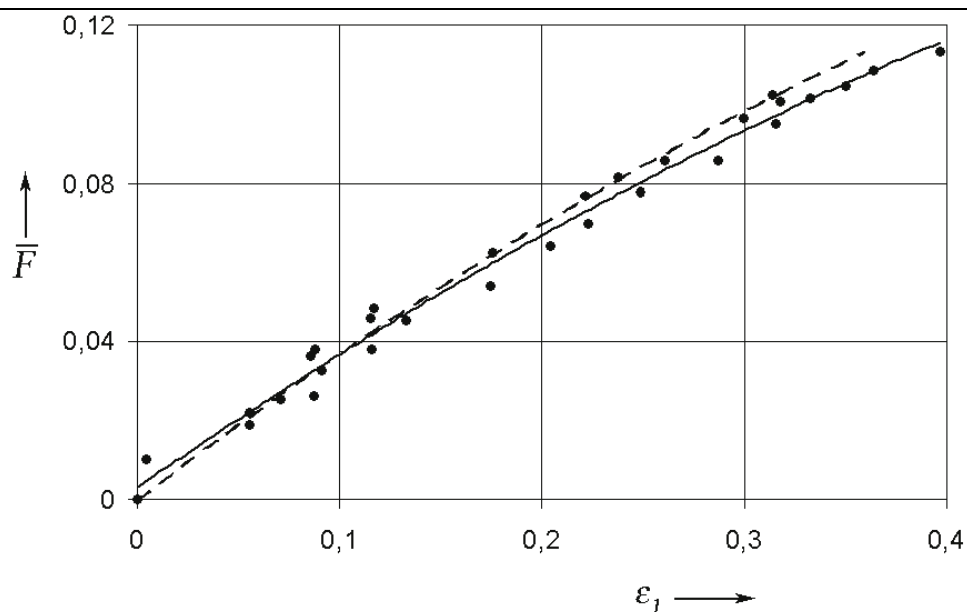


Рис. 1. Зависимость относительной нагрузки $\bar{F}$ от относительного эксцентриситета ε_1 : — — — — — теория; — — — — — эксперимент

В качестве аргумента выбран относительный эксцентриситет ε_1 в переднем подшипнике, смещения шпинделя в котором являются наибольшими.

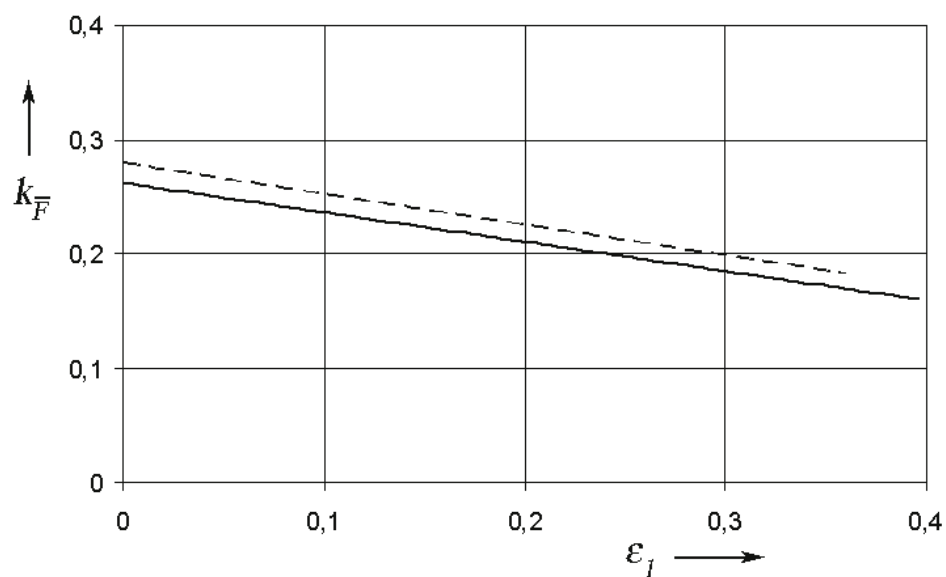


Рис. 2. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от относительного эксцентриситета ε_1 : — — — — — теория; — — — — — эксперимент

Графики зависимостей $\bar{F} = f(\varepsilon_1)$ и $k_{\bar{F}} = f(\varepsilon_1)$ наглядно показывают на вполне удовлетворительное согласование экспериментальных и теоретических данных во всем диапазоне относительного эксцентриситета ε_1 .

Так, при $\varepsilon_1 = 0,2$ относительная погрешность вычисления нагрузки на консоли шпинделя $\bar{F}$ составляет 4 %, а при $\varepsilon_1 = 0,3$ – 5 %. Таким образом, максимальная относительная ошибка определения нагрузки на консоли шпинделя не превышает 5 %.



Относительная погрешность определения коэффициента жесткости во всем диапазоне относительного эксцентриситета ε_1 не превышает 8 %. Эксперимент подтверждает также, что большие значения коэффициент жёсткости на консоли вала имеет при малых значениях относительного эксцентриситета.

Гибридный режим работы шпиндельных подшипников с внешним наддувом газа характеризуется наличием дополнительной подъёмной силы, возникающей в результате вращения шпинделя. Механизм её образования заключается в том, что при вращении эксцентрично расположенного во вкладыше шпинделя, газ под действием касательных сил вязкости увлекается поверхностью шпинделя и заполняет клиновидный зазор между шпинделем и вкладышем. Такое явление часто называют эффектом самогенерации давления или эффектом смазочного клина. С учётом внешнего наддува это приводит к дополнительному сжатию газа в смазочном слое и такому распределению давления, в результате которого несущая способность подшипника увеличивается. Гибридный режим работы подшипников называют также комбинированным.

Для сравнения выходных характеристик ШУ при работе опор в гибридном режиме в теоретических и экспериментальных исследованиях использован такой безразмерный комплекс подобия газовых опор, как число сжимаемости. Число сжимаемости Λ прямо пропорционально угловой скорости шпинделя [2, 47].

Эксперименты в гибридном режиме работы газовых опор ШУ проведены при значениях относительного давления наддува $\bar{p}_s$, равных 0,399 и 0,258. При каждом значении давления наддува выполнено три серии экспериментов с различными значениями частоты вращения вала. Скорость вращения вала ШУ варьировалась изменением расхода сжатого воздуха через приводную турбину. При задаваемых значениях частоты вращения вала определялись быстроходность шпинделя и числа сжимаемости. Сводные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические показатели экспериментов

Относительное давление наддува $\bar{p}_s$	Частота вращения n , мин ⁻¹	Быстроходность $(D \cdot n)$, мм · мин ⁻¹	Число сжимаемости Λ
0,339	32000	$1,63 \cdot 10^6$	0,331
	24000	$1,23 \cdot 10^6$	0,249
	12000	$0,61 \cdot 10^6$	0,124
0,258	36500	$1,86 \cdot 10^6$	0,285
	24000	$1,22 \cdot 10^6$	0,187
	12000	$0,61 \cdot 10^6$	0,094

Обобщенную картину согласования результатов теоретических исследований и экспериментальных данных при давлении наддува $\bar{p}_s = 0,258$ представляют графики выходных характеристик в функции числа сжимаемости и относительного эксцентриситета в переднем подшипнике $\bar{F} = f(\Lambda, \varepsilon_1)$ и $k_{\bar{F}} = f(\Lambda, \varepsilon_1)$, приведенные соответственно на рис. 3 и 4.

В целом анализ зависимостей $\bar{F} = f(\Lambda, \varepsilon_1)$ показал, что максимальная относительная ошибка в определении нагрузки на консоли вала достигается при относительном эксцентриситете $\varepsilon_1 = 0,3$ и составляет не более 6 %.

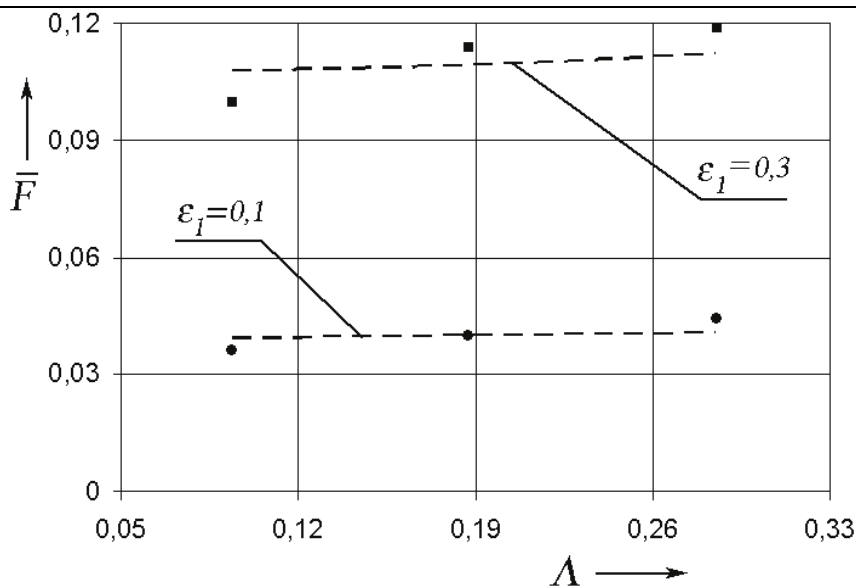


Рис. 3. Зависимость относительной нагрузки $\bar{F}$ от числа сжимаемости Λ и относительного эксцентриситета ϵ_1 : ● – эксперимент ($\epsilon_1 = 0,1$); ■ – эксперимент ($\epsilon_1 = 0,3$); — — — — теория

Наибольшее расхождение теоретических и экспериментальных значений коэффициента угловой жёсткости в функции числа сжимаемости и относительного эксцентриситета $k_{\bar{F}} = f(\Lambda, \epsilon_1)$ наблюдается при числе сжимаемости $\Lambda = 0,094$ и доходит до значений: при $\epsilon_1 = 0,1$ – 8 %, при $\epsilon_1 = 0,3$ – 13 %. Причем при увеличении частоты вращения вала наблюдается тенденция к снижению относительной ошибки в расчёте жёсткости на консоли шпинделя.

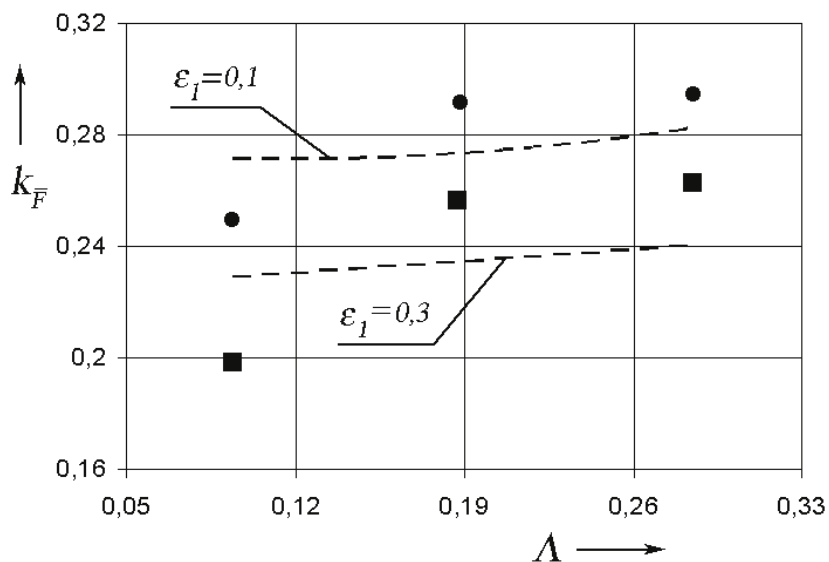


Рис. 4. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от числа сжимаемости Λ и относительного эксцентриситета ϵ_1 : ■ – эксперимент ($\epsilon_1 = 0,3$); ● – эксперимент ($\epsilon_1 = 0,1$); — — — — теория

Так, при числе сжимаемости $\Lambda = 0,285$ относительная погрешность уже составляет 4,4 % при $\epsilon_1 = 0,1$ и 8 % при $\epsilon_1 = 0,3$.

Сопоставление результатов расчета и экспериментальных данных выходных характеристик ШУ в зависимости от числа сжимаемости Λ при различных значениях относительного давления наддува $\bar{p}_s$ показано на рис. 5 и 6.

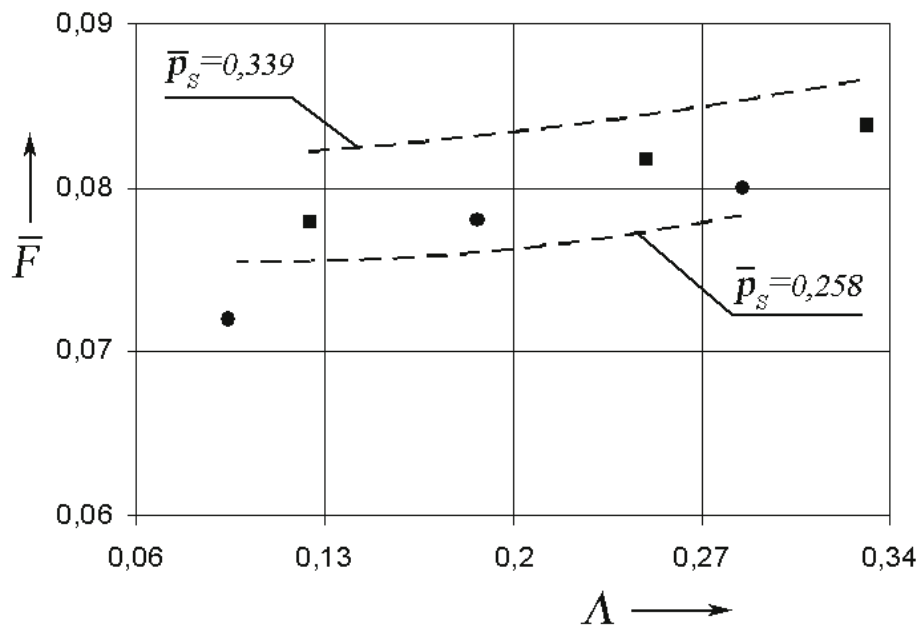


Рис. 5. Зависимость относительной нагрузки $\bar{F}$ от числа сжимаемости Λ и относительного давления наддува $\bar{p}_s$: $\varepsilon_1 = 0,2$; ● – эксперимент ($\bar{p}_s = 0,258$);

■ – эксперимент ($\bar{p}_s = 0,339$); — — — – теория

Результаты испытаний показывают, что расчетные значения относительной нагрузки на консоли вала $\bar{F}$ с достаточной точностью согласуются с экспериментальными данными.

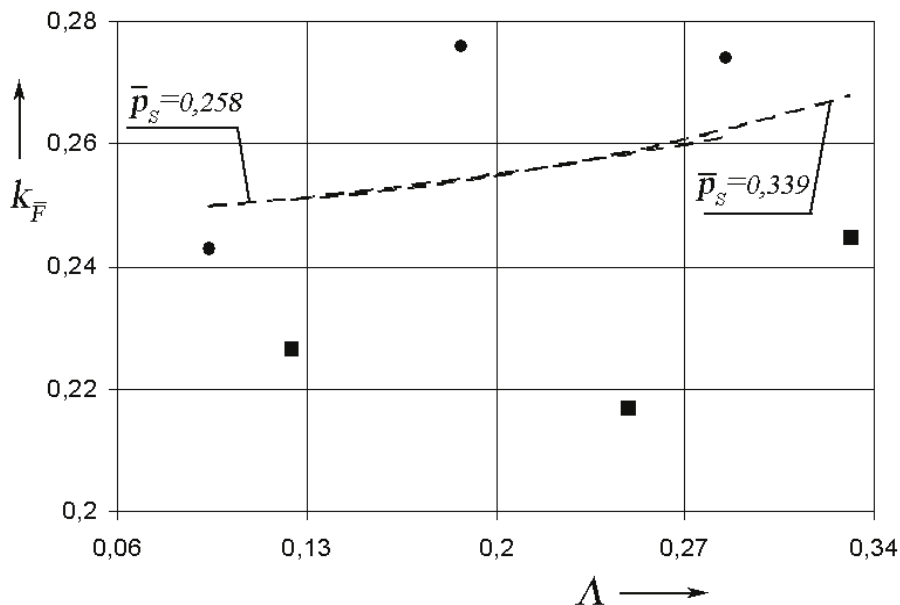


Рис. 6. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от числа сжимаемости Λ и относительного давления наддува $\bar{p}_s$: $\varepsilon_1 = 0,2$; ● – эксперимент ($\bar{p}_s = 0,258$);

■ – эксперимент ($\bar{p}_s = 0,339$); — — — – теория

Шаломов В. И.

**ИТОГИ ОПЫТНОЙ ПРОВЕРКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ**

Установлено, что максимальное расхождение теоретических и опытных зависимостей $\bar{F} = f(\Lambda, \bar{p}_s)$ составляет не более 6 %. На графике также просматривается, что с увеличением числа сжимаемости (частоты вращения шпинделя) относительная погрешность расчёта нагрузки на шлифовальном круге снижается при всех значениях относительного давления наддува.

Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей коэффициента жёсткости в функции числа сжимаемости и относительного давления наддува $k_{\bar{F}} = f(\Lambda, \bar{p}_s)$ (см. рис. 6) позволяет заключить, что максимальная относительная погрешность теоретического расчёта жёсткости на консоли шпинделя не превосходит 16 %. Такой результат для практики можно считать вполне приемлемым.

В целом полученные результаты говорят о достаточно качественном и количественном согласовании экспериментальных и расчетных выходных характеристик, что позволяет надежно использовать разработанную методику в инженерной практике проектирования ШУ на газостатических опорах с частично пористой стенкой вкладыша.

ЛИТЕРАТУРА

1. Космынин, А. В. Газовые подшипники высокоскоростных турбоприводов металлообрабатывающего оборудования / А. В. Космынин, В. С. Виноградов. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 327с.
2. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А. В. Космынин, Ю. Г. Кабалдин, В. С. Виноградов, С. П. Чернобай. – М.: Академия естествознания, 2006. – 219 с.
3. Шаломов, В. И. Экспериментальный стенд для исследования выходных характеристик высокоскоростных шпиндельных узлов / В. И. Шаломов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности инвестиционной и инновационной деятельности в Дальневосточном регионе и странах АТР». – Комсомольск-на-Амуре, 2005. – С. 52-56.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ METALLURGY AND MATERIALS TECHNOLOGY

Муравьев В. И., Евстигнеев А. А., Бахматов П. В., Бутин А. В.
V. I. Muravyev, A. A. Yevstigneev, P. V. Bakhmatov, A. V. Butin

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

ANALYTICAL STUDY AND DEVELOPMENT OF NEW METHODS FOR INCREASING CORROSION RESISTANCE OF STRUCTURAL STEELS USED FOR OIL REFINERY PIPELINE SYSTEMS

Муравьев Василий Илларионович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: VMuravyev@mail.ru.

Mr. Vassily I. Muravyev – Doctor of Engineering, Professor, Chief Researcher, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: VMuravyev@mail.ru.

Евстигнеев Алексей Алексеевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Mr. Alexey A. Yevstigneev – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bp_1@mail.ru.

Mr. Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bp_1@mail.ru.

Бутин Антон Витальевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела технического надзора по сварке «ООО Комсомольский-на-Амуре нефтеперерабатывающий завод» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Mr. Anton V. Butin – PhD in Engineering, Deputy Head of the Engineering Supervision Department for Welding Processes, Limited Liability Company "Komsomolsk-on-Amur Oil Refinery Plant" (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Аннотация. Исследованиями установлено, что эксплуатационные повреждения трубопроводных систем переработки нефтепродуктов (ТСПН) происходят из-за турбулизации потока головного продукта, вызванной конструктивными особенностями, которая приводит к кавитации в локализованной зоне в условиях, благоприятных для развития кавитационно-эрозионного охрупчивания и разрушения. Непрерывный контроль толщины стенки опасных зон патрубков и переходников и восстановление их из высококачественного материала позволили исключить аварийные ситуации и повысить их коррозионную стойкость.

Summary. It has been established that operating damages in oil-refining pipelines is the result of the main product flow turbulence. Pipeline construction features cause the emergence of local zone cavitations. It creates conditions for cavitation/erosion-produced brittleness and cracking. Ongoing pipeline-side thickness control in pipe connections and adapters combined with pipeline repair using high-quality materials allows to eliminate failures and emergencies and increase corrosion resistance of the pipes.

Ключевые слова: патрубки, переходники, трубопровод, переработка нефтепродуктов, турбулизация потока, кавитационно-эрозионное разрушение, сероводородное охрупчивание, состояние металла, локальное разрушение, нормализация, закалка с отпуском, акустическая эмиссия.

Key words: pipeline, pipe connection, pipe adapter, oil-refining, flow turbulentening, cavitation/erosion fracture, hydrogen-sulfide corrosion cracking, metal condition, local fracture, normalizing, temper hardening, acoustic emission.

Введение

Природные катаклизмы (землетрясения, цунами) равно как и техногенные катастрофы требуют постоянного совершенствования существующих и разработку новых конструкционных материалов, обеспечивающих высокую надежность изделий и, в особенности, трубопроводных систем переработки нефтепродуктов (ТСПН) и их транспортировки.

Незащищенные железо и сталь подвержены коррозии в большинстве сред, но степень коррозионного разрушения зависит от ряда факторов, наиболее важными из которых являются состав и состояние поверхности металла, свойства самой коррозионной среды и локальные условия [1].

В настоящее время до 40 % аварий на трубопроводных системах связано с коррозионными разрушениями. В общем технологическом цикле переработки продуктов наиболее часто встречаются случаи коррозионного разрушения переходников в трубопроводных системах. В работе проводился анализ наиболее характерных участков разрушенных трубопроводов ТСПН и исследования и разработка методов повышения их коррозионной стойкости.

Методика проведения исследований

Всесторонним исследованиям подвергались разрушенные переходники теплообменного аппарата ТСПН на установке первичной переработки нефти (см. рис. 1, а) и элементы змеевика печи П-2 вакуумного блока установки ЭЛОУ-АВТ-2 (см. рис. 1, б).

Теплообменный аппарат предназначен для регенерации тепла отводимого головного продукта атмосферной колонны (фракция НК – 160 °С – прямогонный бензин) сырой нефтью. Продукт, поступающий в аппарат, находится в полужидком состоянии, его характеристики приведены в работе [2].

Фракция НК – 160 °С (прямогонный бензин) является продуктом атмосферной перегонки нефти и имеет следующие характеристики:

1. Фракционный состав: $T_{н.к.} = 30$, $T_{10\%} = 80$, $T_{50\%} = 80$, $T_{90\%} = 155$, $T_{к.к.} = 180$.
2. Компонентный состав:
 - олефины – до 0,5 %;
 - бензол – до 1 %;
 - нафтеновые углеводороды – 35 %;
 - парафиновые углеводороды – 60 %;
 - ароматические углеводороды – до 5 %.
3. Содержание сероорганики – 20-35 ppm (объем 1 ppm = 1/10⁶).
4. Содержание азота – 0,5 – 1 ppm.

Головной продукт (прямогонный бензин) из атмосферной колонны поступает в аппарат воздушного охлаждения с температурой (133,44 °С расчетное) ~ 140 °С под давлением $P = 0,7$ кгс/см². Один из характерных разрушенных участков ТСПН приведен на рис. 2.

Установка ЭЛОУ-АВТ-2 предназначена для первичной переработки нефти. Сырьем вакуумного блока установки является мазут – фракции свыше 350 °С, поступающие с низа колонны К-1, работающей под давлением 1,7-3,0 кгс/см². Назначение вакуумного блока – перегонка мазута с получением вакуумного газойля и гудрона в вакуумной колонне К-3. Мазут из куба колонны К-1 с температурой не более 360 °С поступает в насосы Н12/1,2, с которых четырьмя нитками с объемным расходом 25-35 м³/ч (на каждую нитку) и давлением не менее 0,5 кгс/см², что обусловлено влиянием вакуумной системы колонны К-3, поступает в змеевики сначала конвекционной (Ду80), а затем радиантной зон печи П-2 (см. рис. 1, б).

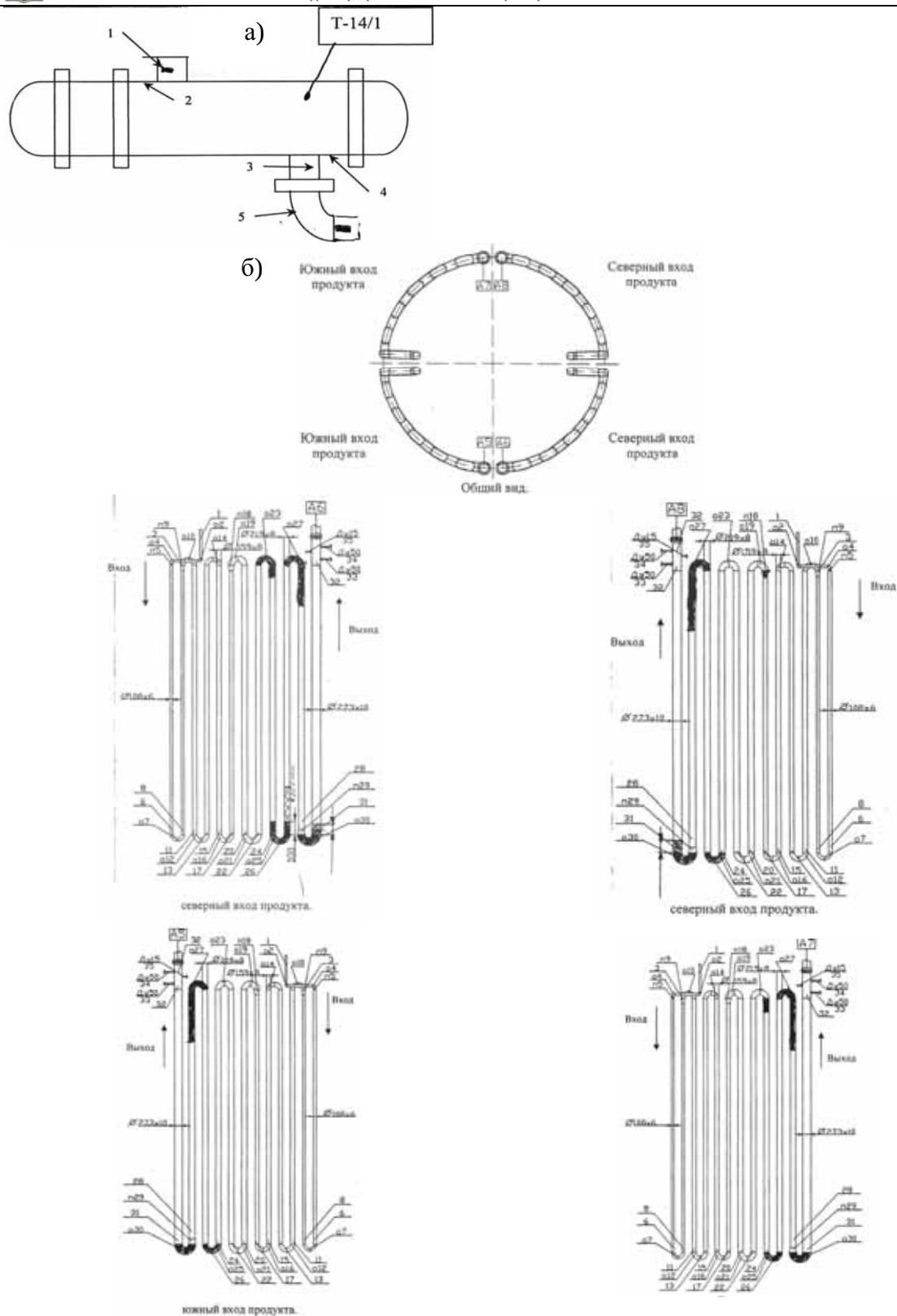


Рис. 1. Схема установки первичной переработки нефти (а) и змеевика (б)
П-2 ЭЛОУ АВТ-2 и места разрушения трубопровода

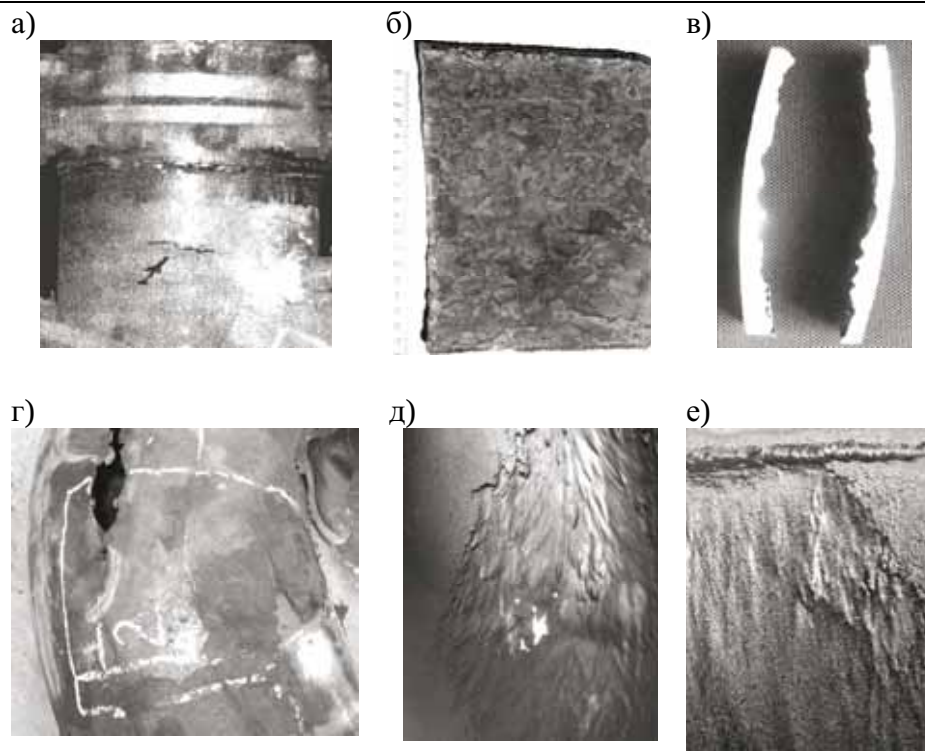


Рис. 2. Вид разрушения патрубков из Ст. 20 (а – в)
и отводов печного змеевика из Ст. 15Х5М (г – е)

Макрофрактографию разрушения переходника исследовали на растровом электронном микроскопе «JEOL» JSM 5600 с энергодисперсионным микроанализатором «ENERGY», макро- и микроструктуру – на оптическом микроскопе «Neophot-21» и металлографическом комплексе фирмы «Карл Цейс». Химический состав образцов определяли на мобильном эмиссионном анализаторе «ARK-met» фирмы «PPM-System».

Содержание водорода определяли на газоанализаторе ONH-2000 «ELTRA», углерода – на экспрессанализаторе «АН-8012».

Результаты исследований

Как видно из данных рис. 1, коррозионное разрушение характеризуется локальностью на входном и выходном патрубках прохождения головного отводного продукта и отвода печного змеевика.

Локально неравномерное разрушение наблюдается и в самих пораженных коррозией участках (см. рис. 2). Неравномерное коррозионное разрушение в виде сферических лунок, образующих цепочки, распространяется в направлении движения рабочей жидкости (см. рис. 2, б, в, д, е).

Глубина и размеры сферических лунок различны и могут быть как поверхностными, так и сквозными, последние являются зародышами образования трещины (см. рис. 3, табл. 1).

Общая зона повышенного коррозионного износа неравномерна и по окружности патрубка, т.е. сохранение исходной толщины патрубка с одной стороны и утонение с другой стороны вплоть до разрушения стенки.

На внутренней поверхности отводов змеевика четко видны черные отложения, характерные для сульфидного металла. Толщина пленки незначительна, она хорошо сцеплена с основным металлом и не имеет рыхлости.

Таблица 1

Коррозионное разрушение выходного патрубка в различных зонах

Номер сечения	Параметры коррозионного разрушения	
	Диаметр сферической лунки (Д), мм	Толщина стенки (h), мм
1	$\frac{0,65 - 17,6}{5,2}$	$\frac{3,6 - 6,4}{4,15}$
2	$\frac{1,6 - 12,8}{5,9}$	$\frac{2,4 - 6,4}{4,45}$
3	$\frac{1,6 - 15,2}{6,1}$	$\frac{1,2 - 4,8}{3,0}$
4	$\frac{1,2 - 15,2}{6,3}$	$\frac{1,45 - 4,0}{2,5}$

Примечание: в числителе минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средне-арифметические

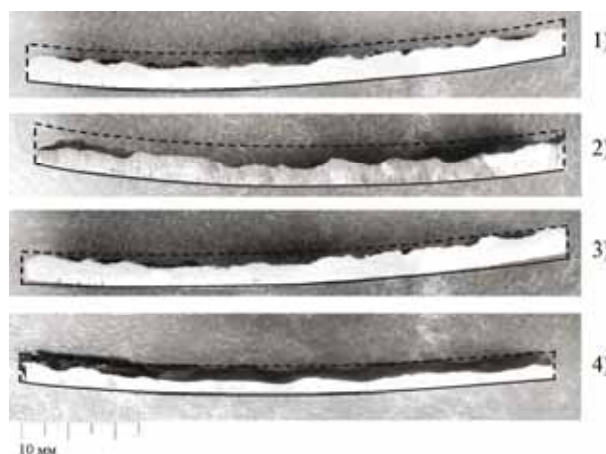


Рис. 3. Локальное коррозионное разрушение выходного патрубка в сечениях 1, 2, 3, 4

Локальные участки коррозионного повреждения характеризуются неравномерным распределением вдоль оси патрубков вытянутых лунок диаметром 5-7 мм и глубиной от 0,1 до 2,0 мм, образующих как бы вытянутые бороздки. Характер распределения глубины поражений на исследуемых образцах виден на профилограммах толщины стенки, полученных методом ультразвукового сканирования с наружной стороны трубы (см. рис. 4).

Результаты ультразвуковой толщинометрии методом сплошного сканирования (см. рис. 4) по трем сечениям отвода показали, что в сечении I толщина остается практически одинаковой во всех точках (на уровне 10 мм), а в местах изменения направления потока (сечения II и III) наблюдается интенсивный местный коррозионный износ. Если для сечения I вне зоны турбулизации потока расчетная скорость коррозии за 7-летний период эксплуатации составила около 0,3 мм/год, то в зоне турбулизации (сечения II и III) – 1,7 мм/год.

Монтажные сварные кольцевые швы по концам отвода, выполненные, согласно технической документации, аустенитными электродами марки ЭА-395/9, в том числе то соединение, которое попало в зону воздействия турбулентных потоков, не имеют следов коррозии, что указывает на их высокую коррозионную стойкость.

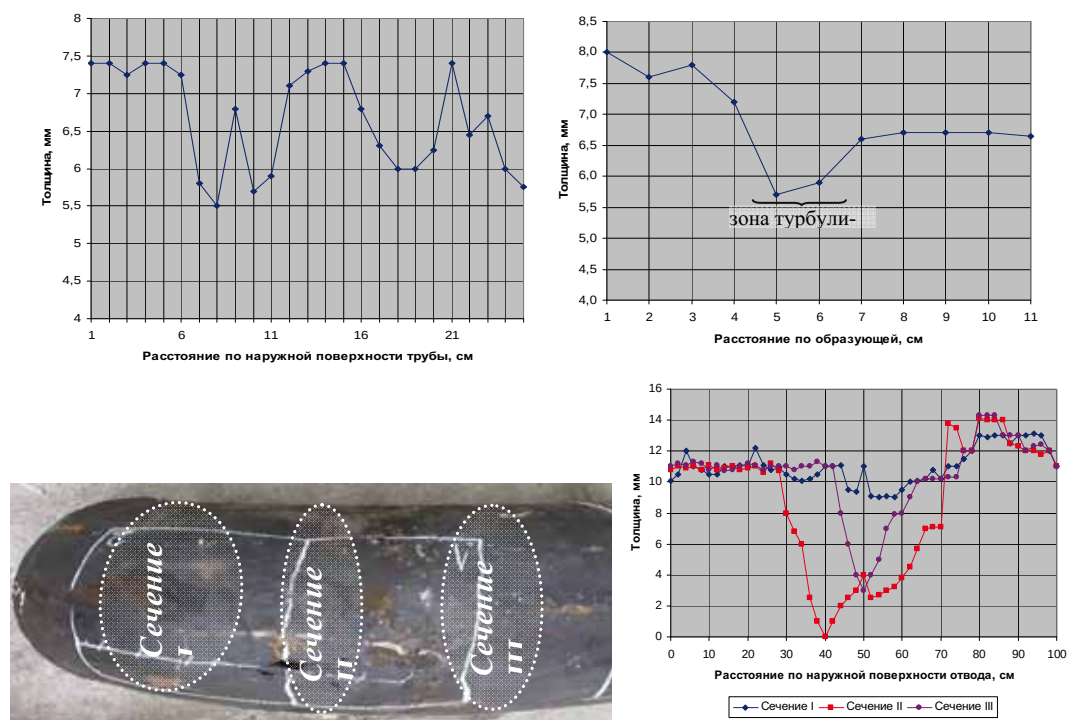


Рис. 4. Результаты ультразвуковой толщинометрии методом сплошного сканирования

Результаты химического анализа дефектных патрубков (см. табл. 2) показывают, что содержание углерода соответствует норме, кремния и серы – несколько завышено, а концентрация водорода, особенно подвижного, существенно превышает допустимое значение.

Таблица 2

Химический состав патрубков ТСПН

Легир. элемент	Содержание, %	Легир. элемент	Содержание, %
C	0,26	V	0,022
Si	0,21	Al	0,02
Mn	0,43	H ₂ подвижный	0,06
Cr	0,12	Co	0,007
Ni	0,12	Nb	0,001
Cu	0,22	S	0,09
Mo	0,02	P	≤0,15
Ti	0,015		

Микротвердость основного металла составляет $H_v = 197-217$ МПа, а в зоне, подверженной питтингу, – $H_v = 265-370$ МПа.

Микроструктура материала патрубков (см. рис. 5) характеризуется ферритно-перлитной полосчатостью, нестабильностью и аномальностью величины зерна (крупные конгломераты и отдельные зерна). По центру ферритной полосчатости видны продолговатые остrokонечные сульфидные включения. Перлитные зерна формируются по границам ферритных, это наиболее выражено просматривается в зонах схождения трех границ ферритных кристаллитов.

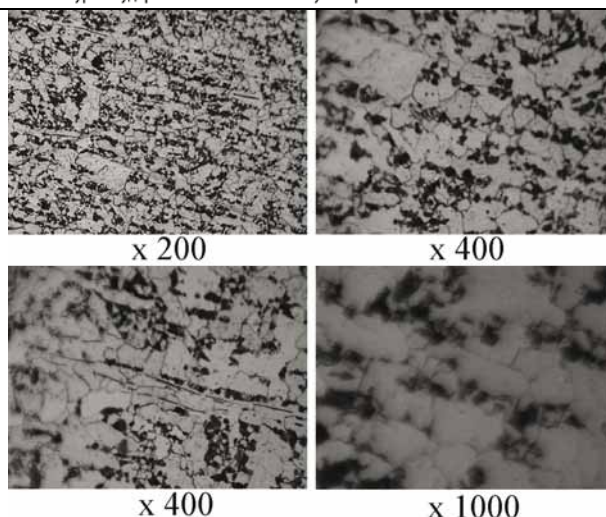


Рис. 5. Микроструктура материала патрубков

По внешнему виду атмосферная коррозия трубопроводных систем не приводит к существенному изменению макрорельефа поверхности (см. рис. 2, а, в), на которой сохраняются следы механической обработки и опескоструивания. Однако по микроструктуре (см. рис. 6) следы коррозионного процесса четко проявляются в виде оксидной пленки, равномерно распределенной по всей поверхности в соответствии с рельефом, сформированном при изготовлении трубопровода. Распространение коррозии осуществляется по границам преимущественно перлитных зерен, и практически отсутствует локализация коррозионного разрушения.

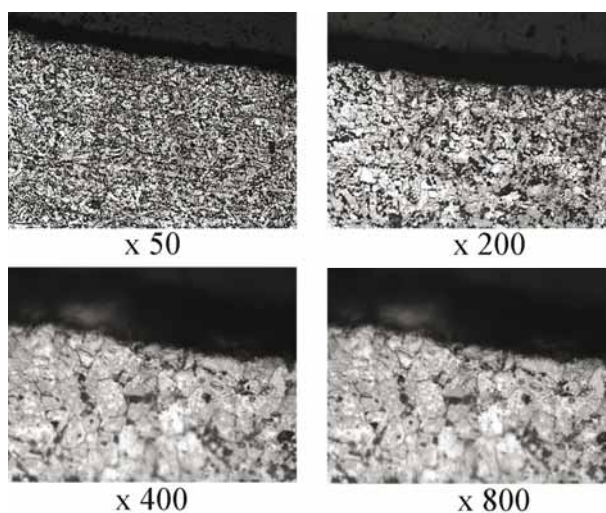


Рис. 6. Микроструктура атмосферного коррозионного разрушения наружной стороны патрубков

Из данных табл. 2 – 3 следует, что основной металл элементов трубопровода и печного змеевика, а также металл наплавов, подвергшиеся коррозионным разрушениям, в наибольшей степени соответствуют указанным в технической документации стали марки 15X5М и сварочным материалам марки ЦЛ-17.

Таблица 3

Химический состав стали и сварных соединений

Наименование	Содержание элементов, % масс.			
	С	Cr	Mo	Ni
Химический анализ основного металла				
Образец № 2-1 (основной металл штампосварного отвода Ду300 из трубопровода)	0,082	5,0	0,63	-
Образец № 8 (основной металл штампосварного отвода Ду200 из змеевика печи)	0,096	4,9	0,64	-
Сталь марки 15X5М по ГОСТ 20072-74	не более 0,15	4,5-6,0	0,45-0,60	-
Химический анализ сварного шва				
Образец № 2-1 (продольный сварной шов отвода Ду300 из трубопровода)	0,12	4,7	0,50	-
Образец № 8 (продольный сварной шов отвода Ду200 из змеевика печи)	0,12	4,24	0,50	-
Состав наплавки электрода марки ЦЛ-17 (тип Э-10Х5МФ) по ГОСТ 9467-75	0,07-0,13	4,0-5,0	0,35-0,55	0,10-0,35
Стилоскопирование монтажного сварного шва				
Образец № 1 (монтажный кольцевой сварной шов отвода из трубопровода)	-	16-20	более 4	20-25

Из данных табл. 4 следует, что микроструктуры в различных зонах сварных соединений характерны как для основного металла стали 15Х5М, так и для сварных соединений, сваренных электродом марки ЦЛ-17 с последующей термообработкой, и удовлетворяют нормативным требованиям. Специфические коррозионные воздействия, наблюдаемые на образцах, не связаны с особенностями микроструктуры различных зон образцов.

Таблица 4

Результаты металлографического анализа и измерений твердости печного змеевика и трубопровода

Наименование образца	Участки сварного соединения	Микроструктура участков	Балл зерна	Твердость, НВ
1	2	3	4	5
Образец № 8 штампосварной отвод Ду200 из печного змеевика: - участки 1 и 2 – одна половинка отвода (шлиф 8-1); - участки 4 и 5 – другая половинка отвода (шлиф 8-2)	1. Основной металл	Ферритокарбидная смесь с формой зерна феррита, близкой к равноосной, и неравномерным распределением карбидов	9-10	119-122
	2. ЗТВ ¹⁾ вне линии сплавления	Ферритокарбидная смесь с формой зерна феррита, близкой к равноосной, игольчатой с равномерным распределением карбидов	10	130-132
	2. ЗТВ ¹⁾ у линии сплавления	Отпущенный бейнит с равномерным распределением карбидов	5-6 ³⁾	153-169
	3. Сварной шов	Игольчатая ферритокарбидная смесь с сохранением дендритной структуры	7-8 ²⁾	186-200



1	2	3	4	5
	4. ЗТВ у линии сплавления	Отпущенный бейнит с равномерным распределением карбидов	5-6 ³⁾	142-143
	4. ЗТВ вне линии сплавления	Ферритокарбидная смесь с формой зерна феррита, близкой к равноосной, и равномерным распределением карбидов	10	134-138
	5. Основной металл	Ферритокарбидная смесь с формой зерна феррита, близкой к равноосной, игольчатой с равномерным распределением карбидов	9-10	137-138
Образец № 2-1 штампосварной отвод Ду-300 из трубопровода - участки 1 и 2 – одна половинка отвода; - участки 4 и 5 – другая половинка отвода	1. Основной металл	Ферритокарбидная смесь	8-9	124-130
	2. ЗТВ	Ферритокарбидная смесь	9	113-119
	3. Сварной шов ²⁾	Игольчатая ферритокарбидная смесь	7-8	121-156
	4. ЗТВ	Ферритокарбидная смесь	9	125-132
	5. Основной металл	Ферритокарбидная смесь	8-9	113-125

Примечания:

1) зона термического влияния с повышенным коррозионным износом;

2) корень сварного шва с повышенным коррозионным износом;

3) балл зерна дан по первичному аустениту

По результатам химического анализа (см. табл. 5) установлено, что отложения представляют собой продукты сульфидной коррозии металла (прежде всего железа), остатки соединений серы, большая часть которых разложилась вследствие гидролиза и окисления кислородом воздуха в процессе хранения образцов, кокс и примеси нерастворимых в кислотах механических загрязнений.

Таблица 5

Результаты химического анализа отложений

Показатель	Образцы печного змеевика	Образец отвода трубопровода
Общая сера в исходном отложении (% масс.)	2,19-2,39	2,5-3,9
Остаток после прокаливания (% масс.)	89,0	56,4
Железо (% масс.)	54,88	23,17
Остаток после промывки ацетоном (% масс.)	-	66,4
Общая сера в промытом ацетоном остатке (% масс.)	-	5,96-5,99
Сульфид-ион (качественно)	Присутствует	Присутствует

Из рассмотрения данных следует, что железо-сульфидная составляющая является непосредственным продуктом коррозионных реакций.

Обсуждение результатов исследований

Внутренняя рабочая сторона ТСПН за исключением отдельных участков покрыта равномерной оксидной и сульфидной пленкой, повторяющей макрорельеф поверхности и обеспечивающей определенную защиту от коррозионного разрушения. Участки повышенного износа локализуются вблизи конструктивных элементов, которые создают гидравлические условия для развития турбулентных потоков.

Высокие скорости движения жидкостного потока, завихрения, местная турбулизация и кавитация потока могут, с одной стороны, вызвать механический срыв образующихся непрочных и обладающих невысокой адгезией к металлу продуктов коррозии, с другой – при наличии влаги вызвать кавитационно-эрозионное разрушение.

Конструктивные особенности трубопроводной системы оказывают существенное влияние на активность и характер коррозионного разрушения, и это убедительно подтверждается сравнительным анализом скорости коррозии в различных зонах. Так, сильное коррозионное повреждение входных и выходных патрубков происходит за короткий промежуток времени от двух до восьми месяцев эксплуатации, а ответственная часть трубопровода за фланцевым соединением может сохранять свои эксплуатационные свойства десятки лет, хотя эти конструктивные элементы изготовлены из одного и того же материала и по ним транспортируется среда одного состава с одинаковой температурой.

Незначительное повышение микротвердости в поверхностной зоне вызвано кавитационным воздействием потока головного продукта, содержащего влагу, и особенно в температурном интервале 40-60 °С. По данным [1], деформационные волны, возникающие в материалах вследствие захлопывания каверн, вызывают удар, равный давлению ~ 1,5 ГПа.

Известно, что во влажных сероводородных средах создаются условия для наводораживания металла. Все стали с ферритной, ферритно-перлитной, бейнитной и мартенситной структурами могут подвергаться водородному охрупчиванию (ВО). Особенно активно это происходит при наличии так называемого легкоподвижного (диффузионного) водорода. Водород снижает силы взаимного притяжения атомов железа в кристаллической решетке, создает высокие давления при моляризации в микропорах и микротрещинах, что вызывает разрушение металла. Повышенное содержание серы в углеродистых и низколегированных сталях приводит в первую очередь к ВО. Холодная пластическая деформация стали более чем на 20 % заметно повышает чувствительность к ВО [1].

Электронная микроскопия поверхности коррозионного разрушения показывает (см. рис. 7), что характер разрушения металла под продуктами коррозии (см. рис. 7, а) и самих продуктов коррозии (см. рис. 7, б) различается размерами трещин и микротрещин на несколько порядков. Отделение продуктов коррозии происходит целыми конгломератами (см. рис. 7, (2, 3б)). На поверхности металла в первоначальный момент формируются вздутия величиной в 15-25 мкм с последующим образованием микротрещин (см. рис. 7, (1а)).

Как видно из рис. 8, разрушение происходит как вдоль, так и поперек ферритно-перлитных полос, совпадающих с направлением прессования. Максимальная глубина трещин, заполненных продуктами коррозии, наблюдается в зонах углублений. Разрушение носит межкристаллитный и транскристаллитный характер. Четко прослеживается образование: локальных коррозионных разрушений и субмикротрещин по границам перлитных зерен (см. рис. 8, а, б, в); отслаивающихся коррозионных разрушений вдоль полосчатой структуры по границам ферритных скоплений (см. рис. 8, г); субмикробузырей, вздутий, предшествующих разрушению (см. рис. 8, д). Наблюдаются характерные участки продуктов локальной коррозии с формированием коксовых отложений (см. рис. 8, е, ж).

Присутствие в составе продуктов коррозии сернистых соединений свидетельствует об участии сероводорода в коррозионном процессе. Таким образом, можно утверждать, что одной из причин разрушения металла труб является высокотемпературная сероводородная коррозия (см. табл. 4).

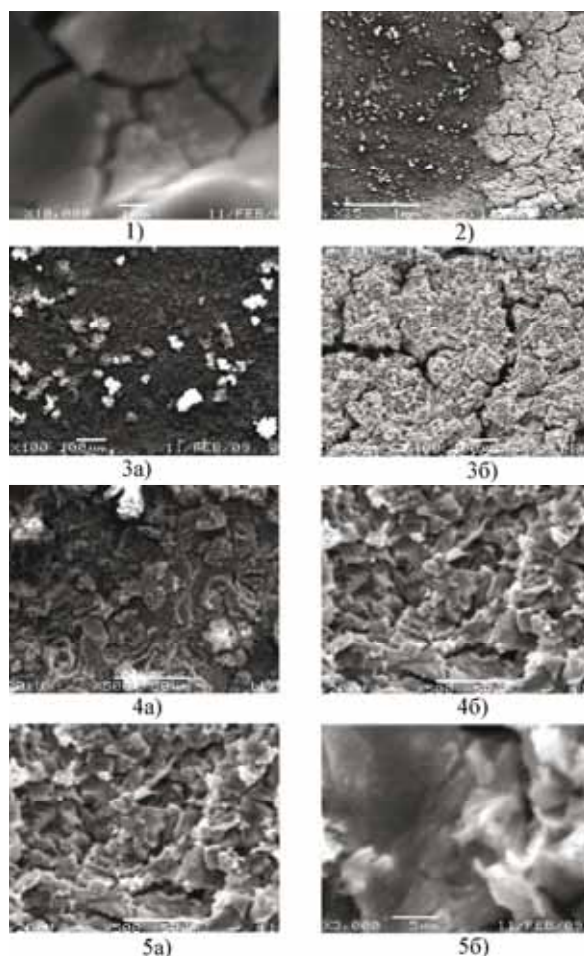


Рис. 7. Фрактограмма поверхности разрушения патрубка ТСПН:
а – с удаленной основной массой продуктов;
б – с продуктами коррозии

Исследование полученных образцов металла показало, что, наряду с признаками высокотемпературной сероводородной коррозии, образцы имеют специфические коррозионные повреждения, обусловленные как эрозийным воздействием потока мазута на защитные сульфидные пленки, так и наличием других коррозионных агентов, также нарушающих защитные свойства сульфидных пленок.

Измерения толщины полученных образцов вне зон турбулизации потока мазута показывают, что изменение толщины (по расчетной оценке от номинальных значений) незначительно и скорость коррозии за 7-летний период эксплуатации можно оценить на уровне 0,1-0,3 мм/год. В то же время в зонах турбулизации потока глубина повреждений велика и на представленных образцах печного змеевика, относительно неповрежденной поверхности, составила около 2 мм, а на отводах трубопровода – 4-5 мм и 12 мм.

Ультразвуковая толщинометрия элементов трубопровода показывает местный износ стенок отводов на уровне 4-5 мм, что указывает на участие, наряду с сероводородом, дополнительных коррозионных агентов. Характер коррозионных повреждений элементов печного змеевика и трубопровода в местах турбулизации потока мазута свидетельствует, по-видимому, об интенсификации процесса, вызванной воздействием нефтяных кислот и кавитационно-эрозийных процессов.

В ходе исследования выяснилось, что аустенитный сварной шов, соответствующий по составу основным легирующим компонентам стали марки X17H15M3T, не имеет коррозионных повреждений, хотя и эксплуатировался в жестких условиях воздействия турбулентных

потоков. В связи с этим следует ожидать столь же высокой коррозионной стойкости основного металла элементов, изготовленных из аналогичных материалов.

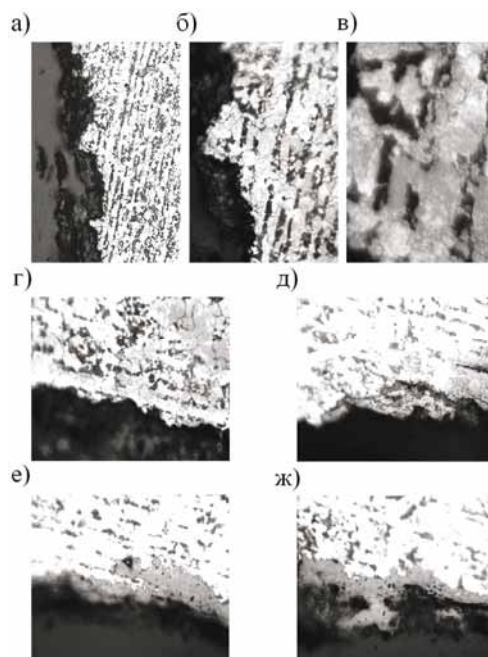


Рис. 8. Микроструктура в зоне локально-катастрофического разрушения ТСПН:

а, б, в – субмикротрещины по границам перлитных зерен (x200, x400, x1000);

г – отслаивающиеся разрушения (x400); д – субмикропузыри (x400);

е, ж – коксовые отложения (x400)

Как известно, под действием вакуума температура кипения всех фракций мазута значительно снижается и в объеме потока мазута начинается интенсивное парообразование с образованием парожидкостной смеси, у которой плотность и вязкость отличаются от мазута, что ведет к увеличению скорости потока и в конечном итоге к увеличению коррозионного износа. Для уменьшения коррозионного износа снижают линейную скорость потока увеличением диаметра труб в радиантной зоне печи. Повышенный коррозионный износ вплоть до сквозного повреждения наблюдается в центральной части наружного диаметрагиба, причем на последних стадиях, где самая высокая температура. Таким образом, высокие скорости движения парожидкостного потока в зонах конструктивных элементов, создающих гидравлические условия для развития местных турбулентных жидкостных потоков и завихрения, могут вызвать разрушение защитных сульфидных пленок и кавитационно-эрозионное повреждение ТСПН.

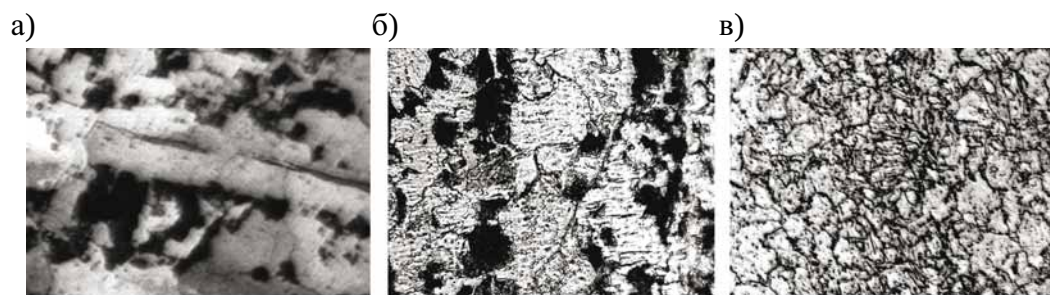


Рис. 9. Изменение микроструктуры Ст. 20 после термообработки:

а – исходная после прокатки; б – после нормализации с 900 °С,

в – после закалки с 900 °С в воде и отпуска 650 °С, 1 ч



Из данных рис. 9 видно, что термическая обработка Ст. 20 после прокатки приводит к существенному изменению структуры металла, нормализация – к уменьшению балла зерна и полосчатости перлитных зёрен (см. рис. 9, б), закалка с отпуском – к созданию гомогенной структуры отпущенного мартенсита (см. рис. 9, в).

Термическая обработка Ст. 20 после прокатки приводит как к гомогенизации структуры, так и к уменьшению балла зерна и полосчатости перлитных зёрен, также должна привести и к существенному повышению стойкости ТСПН. Действительно, замена разрушенных патрубков и переходников ТСПН из материала обычной выплавки, прошедшего термическую обработку, нормализацию и, в особенности, закалку с отпуском, повысила коррозионную стойкость более чем на порядок.

В работе [1] указывается, что металл, полученный электрошлаковым способом, имеет высокую чистоту и однородность структуры, а также равномерное распределение неметаллических включений малых размеров, что обеспечивает его высокую стойкость к коррозионному разрушению.

Монтажные сварные кольцевые швы по концам отвода, выполненные, согласно технической документации, аустенитными электродами марки ЭА-395/9, в том числе то соединение, которое попало в зону воздействия турбулентных потоков, не имеют следов коррозии, что указывает на их высокую коррозионную стойкость. Металл шва по химическому составу близок к стали марки Х17Н15МЗТ. Таким образом, для снижения скоростей коррозии целесообразно заменить быстро изнашиваемые элементы трубопроводов и печных змеевиков на элементы из аустенитных молибденсодержащих сталей типа Х17Н15МЗТ.

Существенное влияние на коррозионную стойкость элементов ТСПН оказывает поверхностное диффузионное легирование. Так, например, [3] кислотостойкость в концентрированной соляной кислоте образцов из стали 12Х18Р9Т после диффузионного легирования (борирование, бороалитирование) более чем в 7 раз по сравнению с исходным состоянием, а абразивный износ более чем на порядок.

Выводы

1. Турбулизация потока вакуумного газойля и гудрона (перегонка мазута) и прямогонного бензина, вызванная конструктивными особенностями, приводит к кавитации в локализованной зоне в условиях, благоприятных для развития кавитационно-эрозионного и сероводородного охрупчивания и разрушения. Состав и состояние металла ТСПН, т.е. повышенное содержание кремния, серы, водорода, а также высокий балл полосчатости перлитных зёрен, характерные для состояния металла после прокатки, наличие большого количества сульфидных включений, а также отсутствие соответствующего количества элементов, повышающих жаропрочность, способствуют интенсификации кавитационно-эрозионного и сероводородного охрупчивания и разрушения.

2. Контроль качества сварных соединений при монтаже ТСПН, особенно путем анализа сигналов АЭ в процессе термообработки, а также постоянный коррозионный мониторинг позволяют на ранних стадиях выявлять зоны критического размера коррозионного повреждения и предотвращать аварийные ситуации.

3. Восстановление патрубков и переходников, а также зон с локальным катастрофическим коррозионным повреждением ТСПН из высококачественного и жаропрочного материала, например сталь марки Х17Н15МЗТ, либо применение коррозионностойких покрытий позволит в значительной степени повысить их коррозионную стойкость.

4. Разработка новых конструктивных решений, исключающих турбулизацию потока в ТСПН, позволит в значительной степени повысить ресурс- и энергосбережение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коррозия / под ред. Л. А. Шрайера. – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.
2. Влияние структурных изменений металла труб на работоспособность ТСПН / А. А. Евстигнеев, В. И. Муравьев, П. В. Бахматов [и др.] // Материалы междунар. НТК «Современное материаловедение и нанотехнологии». Т. 1. Комсомольск-на-Амуре, 27-30 сентября 2010 г. – С. 404-411.
3. Интенсификация процессов диффузионного легирования металлами и металлоидами поверхностных слоев деталей из конструкционных материалов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, А. А. Евстигнеев, А. А. Дебеляк // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 6. – С. 28-38.

Перевалов А. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГИБА В РОЛИКАХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ В СИСТЕМЕ MSC MARC

Перевалов А. А.

A. A. Perevalov

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГИБА В РОЛИКАХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ В СИСТЕМЕ MSC MARC

MODELLING OF BENDING ROLLS OF EXTRUDED ASYMMETRIC BENDING PROFILES IN THE MSC MARC



Перевалов Анатолий Анатольевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 89242278373. E-mail: Anatoly84@rambler.ru.

Mr. Anatoly A. Perevalov – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 89242278373. E-mail: Anatoly84@rambler.ru.

Аннотация. В статье описаны особенности изгиба несимметричных профилей, связанные с ним проблемы и перспективность решения данной задачи. Описана целесообразность применения системы конечно-элементного анализа MSC MARC при расчете изгиба с закручиванием несимметричных профилей. Также приведены особенности построения модели процесса и физических свойств материала.

Summary. The paper describes the features of asymmetric bending sections, related problems and prospects of solving this task. We describe the usefulness of the system, application of the finite element analysis of MSC MARC to calculation of bending with twisting of asymmetric sections. Just shows the features of model building process, and physical properties of the material.

Ключевые слова: MSC MARC, гибка, профиль, несимметричный, ролики.

Key words: MSC MARC, bending, section, asymmetric, rollers.

УДК 629.73.002.2

Детали, получаемые гибкой прессованных и гнутых из листа профилей, используются во многих элементах конструкции планера летательного аппарата. Объясняется это тем, что при относительно небольших размерах поперечного сечения, а следовательно, незначительной массе профили обладают весьма высокой удельной сопротивляемостью к действию внешних нагрузок.

Одним из перспективных способов формообразования длинномерных профилей является гибка в роликах. Данный вид гибки обладает рядом преимуществ:

- широкие возможности по формоизменению длинномерных заготовок при относительно малых габаритах оборудования;
- возможность формоизменения широкой номенклатуры профилей без замены формообразующих элементов;
- высокая возможность автоматизации процесса.

Наряду с этим существуют некоторые трудности, связанные с формообразованием несимметричных профилей. Вследствие несовпадения главных осей поперечного сечения несимметричных профилей с плоскостью изгиба происходит закручивание и изгиб профиля в плоскости, перпендикулярной плоскости изгиба. Решение задачи определения угла закручивания и изгиба несимметричных профилей позволит разработать схему гибки с компенса-

ей нежелательных отклонений. С целью определения углов закручивания и силовых факторов гибки было проведено моделирование изгиба несимметричного профиля уголкового сечения в роликах в системе MSC MARC (см. рис. 1).

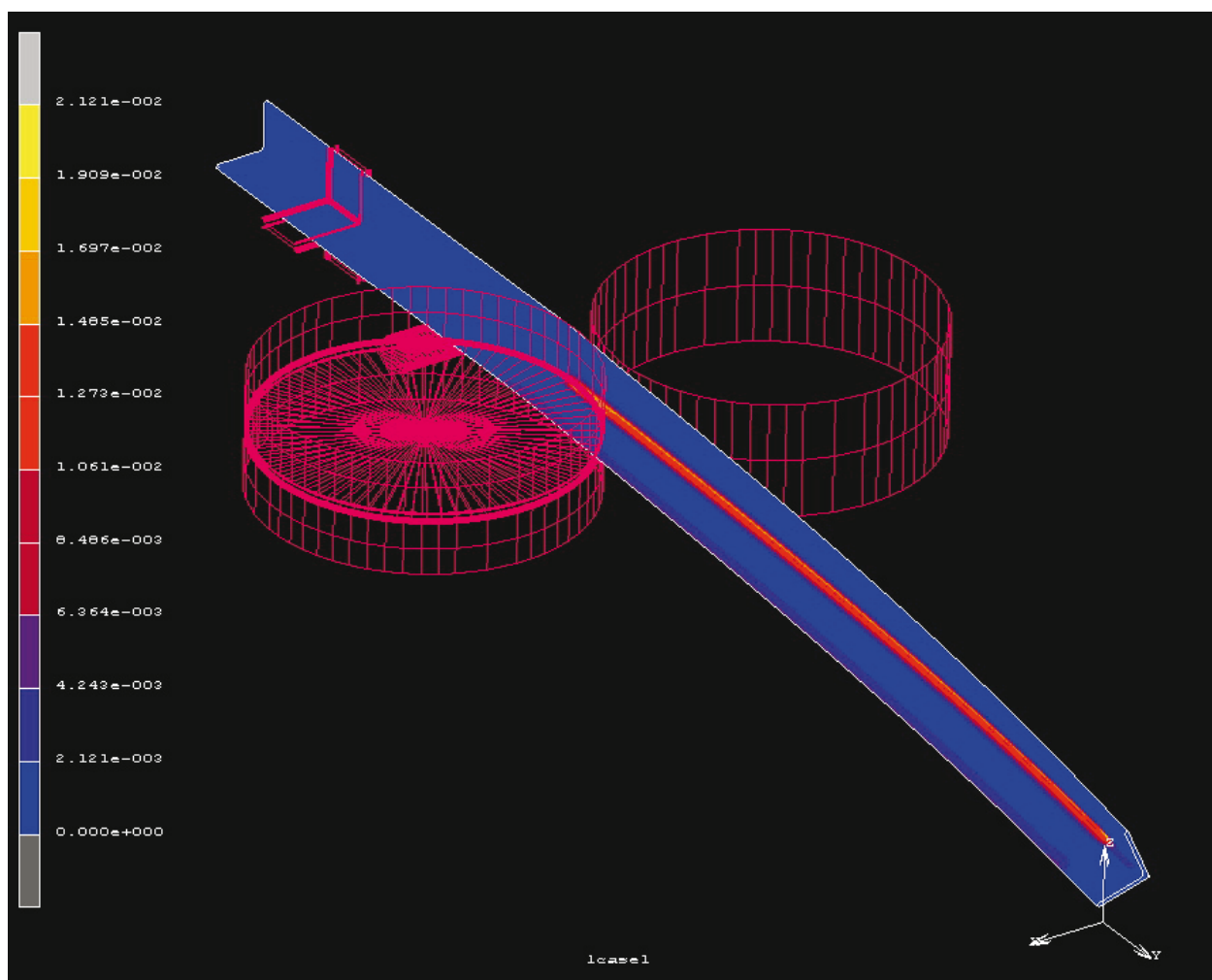


Рис. 1. Результат расчета деформаций несимметричного профиля в MSC MARC

Схема изгиба и все геометрические соотношения взяты идентичными экспериментальной установке для гибки профилей (см. рис. 2).



Рис. 2. Экспериментальная установка для гибки профилей

Моделирование рабочих элементов установки производилось непосредственно в системе MSC MARC. Фильера и ролики выполнены поверхностями. Профиль разбит на конечные элементы (см. рис. 3). Данная схема разбиения профиля на элементы была принята с целью упрощения расчета. Суммарное количество элементов для профиля 15x15x450 составило 13 960.

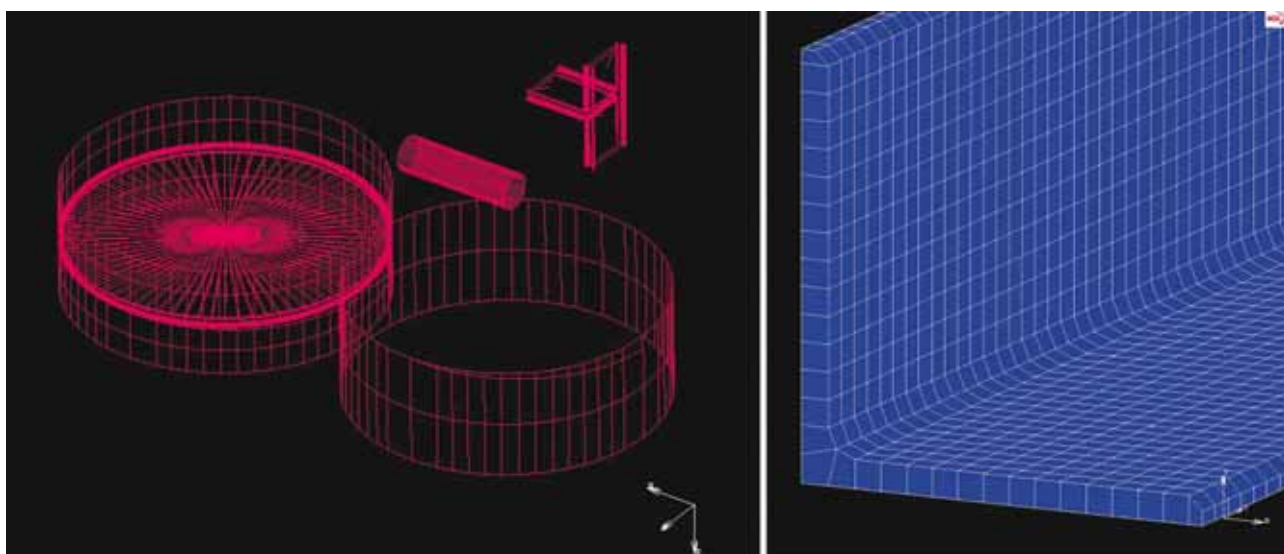


Рис. 3. Модель рабочих элементов установки и конечно-элементная модель профиля в системе MSC MARC

На рис. 4 представлена модель установки в начальном положении. Все элементы модели, за исключением профиля, недеформируемые. Коэффициент трения принят равным нулю.

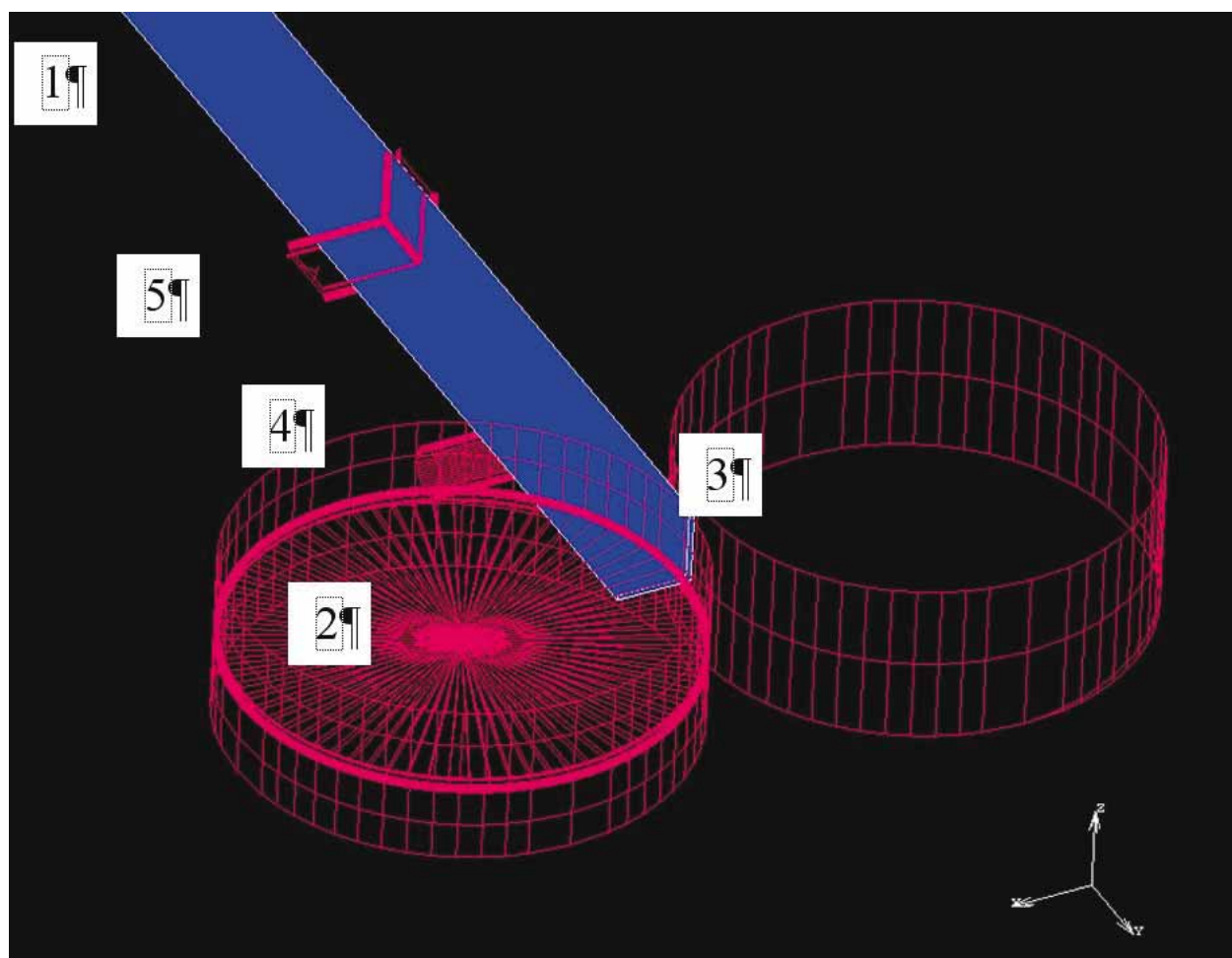


Рис. 4. Модель установки для гибки профилей: 1 – профиль уголкового сечения 15x15x450; 2 – ролик разрезной; 3 – ролик прижимной; 4 – поддерживающий вал; 5 – фильера

Материал Д-16АТ задан графически (см. рис. 5). Необходимо обратить внимание на особенность задания материала в системе MSC MARC – при задании материала линейный участок не задается. Первая точка графика обозначает момент перехода линейной зависимости к нелинейной. Задание всех перемещений производится графически. При этом сначала происходит выборка зазоров, а потом переход в рабочий режим.

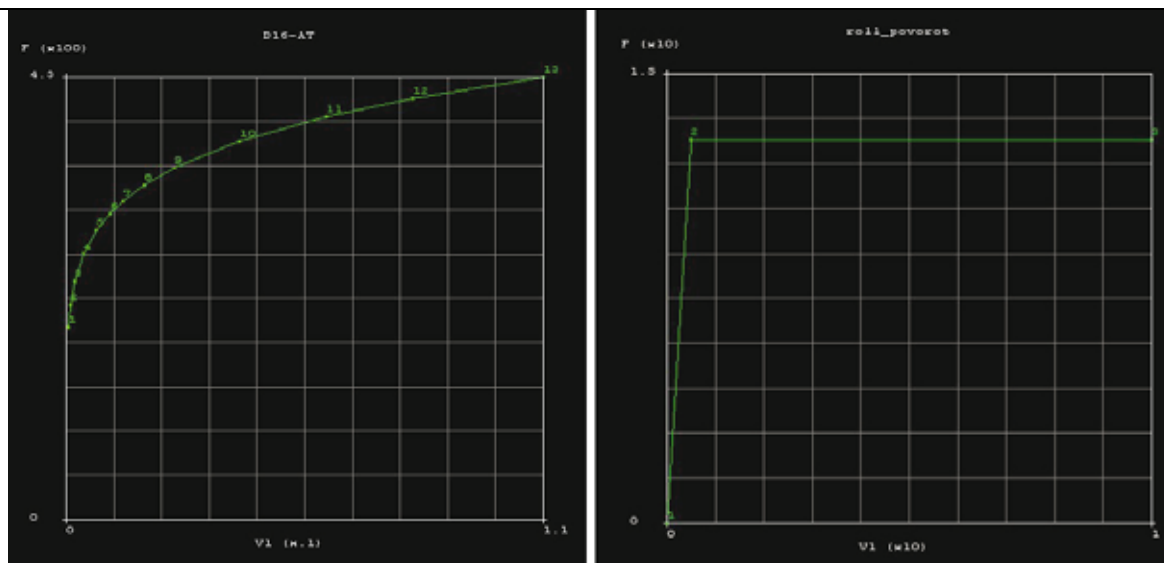


Рис. 5. Графическое задание свойств материала и перемещений в MSC MARC

Моделирование процесса изгиба несимметричных прессованных профилей позволяет определить технологические параметры процесса, такие как предельные углы закручивания и изгиба профиля. Дальнейшая обработка результатов с целью получения радиусов кривизны и углов закручивания производится в системе MS Excel.

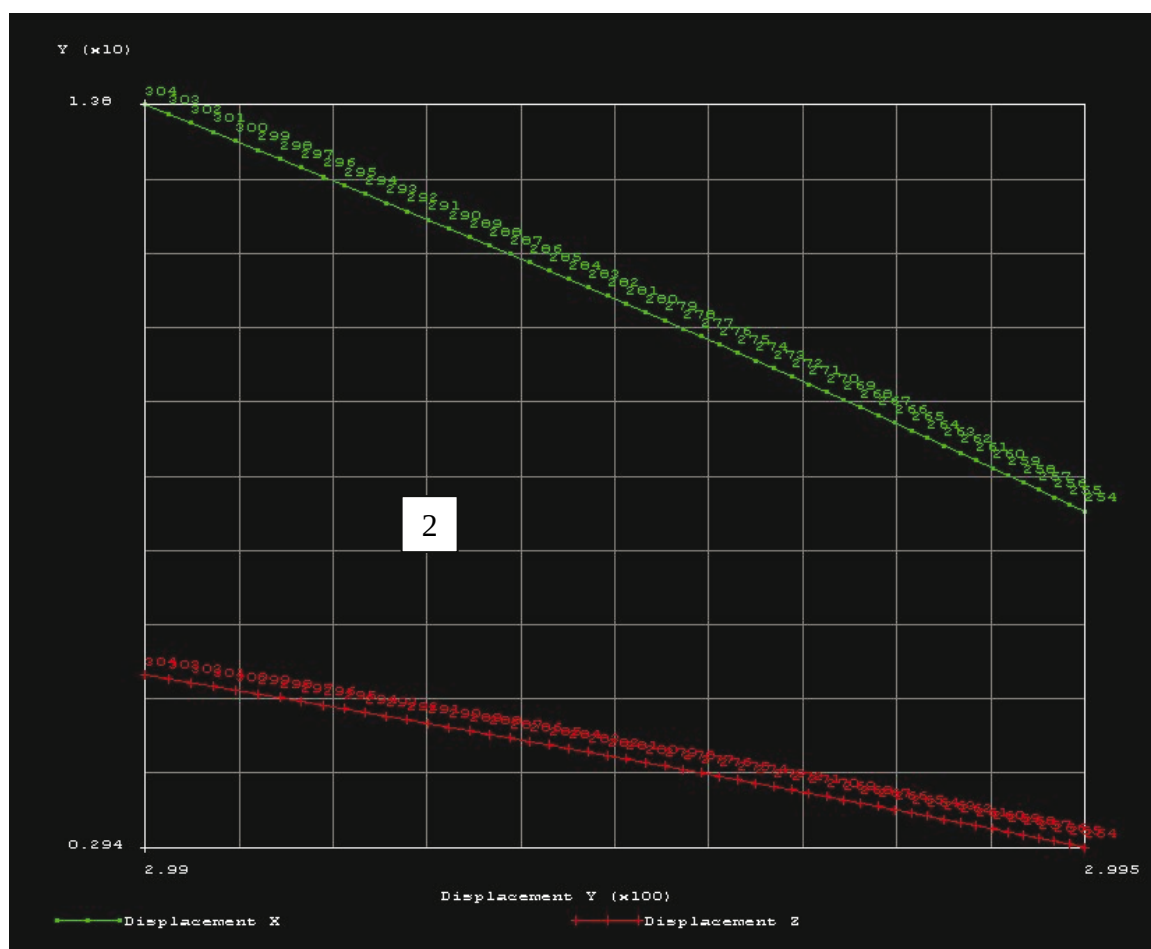


Рис. 6. Графики перемещений узлов в плоскостях: 1 – Y0X; 2 – Y0Z

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:

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

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

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

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

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

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

При превышении максимально допустимых углов закручивания и изгиба наблюдалась потеря устойчивости модели профиля при расчете в MSC MARC аналогично потери устойчивости профиля при натурном эксперименте (см. рис. 7).

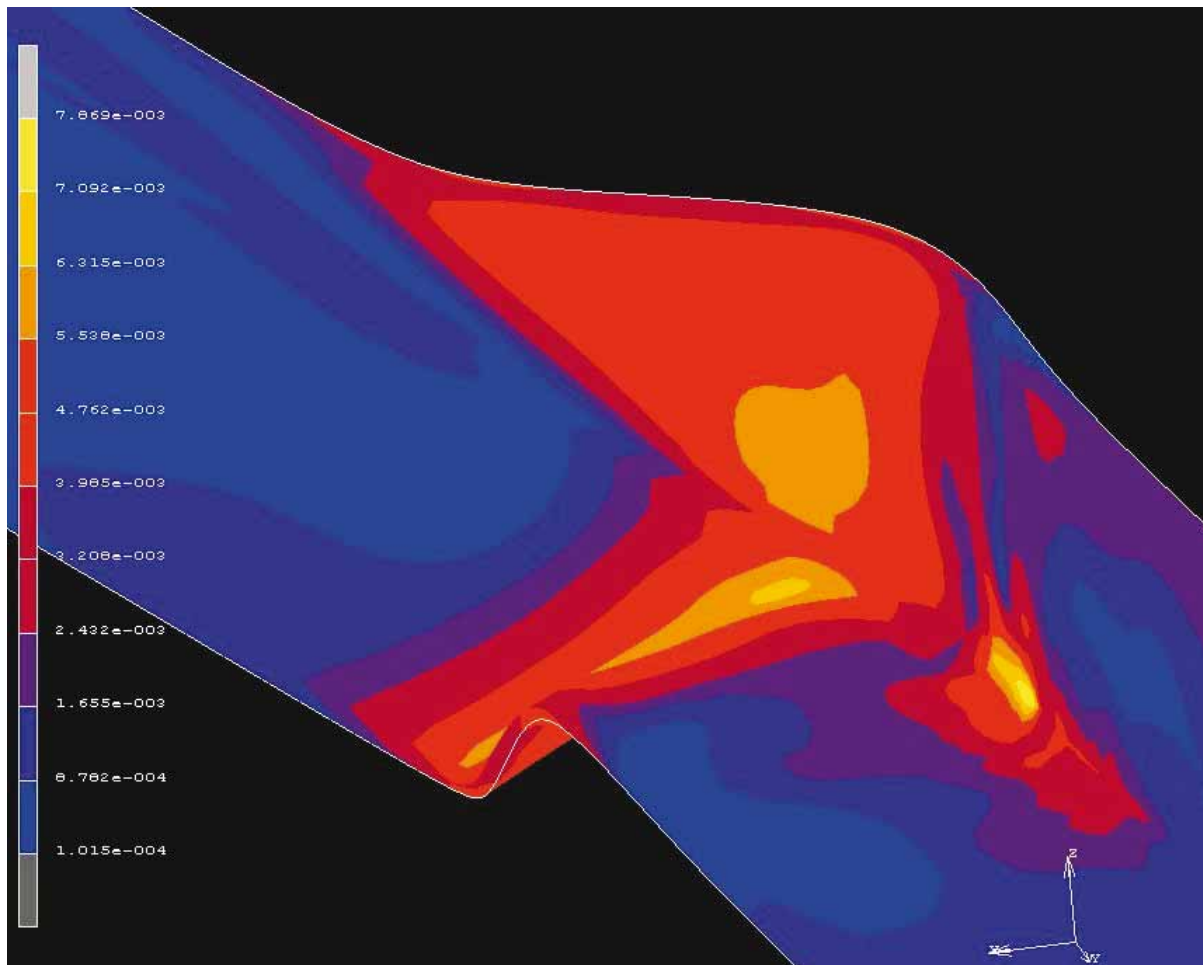


Рис. 7. Потеря устойчивости профиля (эпюра деформаций)

Перевалов А. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГИБА В РОЛИКАХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ В СИСТЕМЕ MSC MARC

Анализ результатов расчета процесса гибки профиля позволил определить оптимальные геометрические параметры положения рабочих органов установки, максимальные допустимые углы изгиба и закручивания профилей. Также в результате моделирования получены данные об оптимальных углах изгиба и закрутки профиля для минимизации конечного закручивания профиля. Все это позволяет провести натурные эксперименты с ограниченным набором установочных параметров установки, тем самым добиться экономии как временных, так и материальных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вдовин, С. И. Методы расчета и проектирования на ЭВМ процессов штамповки листовых и профильных заготовок / С. И. Вдовин. – М.: Машиностроение, 1988. – 160 с.
2. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М.: Наука, 1965. – 872 с.
3. Феокистов, С. И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности / С. И. Феокистов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 183 с.



Колыхалов Д. Г., Марьин Б. Н., Феоктистов С. И., Шпорт Р. В.

D. G. Kolykhalov, B. N. Maryin, S. I. Feoktistov, R. V. Shport

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИМА ПОЛЫХ И ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛЕДЯНЫХ СТЕРЖНЕЙ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА

MODELLING OF THE PROCESS OF PRESSING HOLLOW/PIPE BILLETS USING ICE CORES AS THE WORKING MEDIUM

Колыхалов Дмитрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: dgk@mail.knastu.ru.

Mr. Dmitry G. Kolykhalov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Aviation technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: dgk@mail.knastu.ru

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Mr. Boris N. Maryin – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Феоктистов Сергей Иванович – доктор технических наук, декан самолетостроительного факультета, заведующий кафедрой «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ssf@knastu.ru.

Mr. Sergey I. Feoktistov – Doctor of Engineering, Dean of the Aircraft Engineering Faculty, Head of the Aviation Technology Department (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ssf@knastu.ru.

Шпорт Роман Вячеславович – кандидат технических наук, начальник бюро АХК «Сухой».

Mr. Roman V. Shport – PhD in Engineering, Head of the Design Engineering Department, Aviation Holding Company "Sukhoi".

Аннотация. Рассмотрены возможности моделирования процесса обжима полых и трубчатых заготовок с использованием в качестве рабочего тела ледяных стержней

Summary. The paper explores possible ways of modeling the process of pressing/crimping hollow and pipe billets with the help of ice rods as a working medium.

Ключевые слова: деформирование заготовок; рабочие тела; замораживание воды; штамповая оснастка.

Key words: deformation of billets, working medium, water freezing, metal forming tools.

УДК 621.983.7.001.573

Важной проблемой в авиационной промышленности является изготовление высоко-ресурсных, надежных трубопроводов, которые работают в условиях комплексного нагружения. Они испытывают действия высоких давлений, сверхвысоких и низких температур, 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 эл-

липкость и волнистость стенок, т.е. явления, сопровождающие процессы изготовления трубопроводов. Большое влияние на работоспособность трубопроводов оказывает качество заготовки 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 кроме жидкостных, легкоплавких и сыпучих материалов может использоваться лёд.

В работе рассмотрена задача использования в качестве рабочего тела ледяного стержня. Основной вопрос, ставившийся перед авторами, был связан с расширением технологических возможностей операций обжима полых и трубчатых заготовок при минимальных затратах на изготовление рабочего тела.

Это достигается тем, что внутри заготовки размещают рабочее тело из ледяного стержня. Технически получить ледяной стержень проще и дешевле, чем рабочее тело из других материалов (резины, полиуретана, снега).

Были использованы заготовки труб с техническими характеристиками:

- марка металла: Д16;
- внутренний диаметр 42 мм;
- толщина стенки 1,5 мм;
- длина заготовки 100 мм.

Схема процесса показана на рис. 1. Штамп состоит из неразъемной матрицы 1 и основания 2. В матрицу 1 снизу вставлена трубчатая заготовка 3, внутри которой находится рабочее тело 4, выполненное из стержня льда.

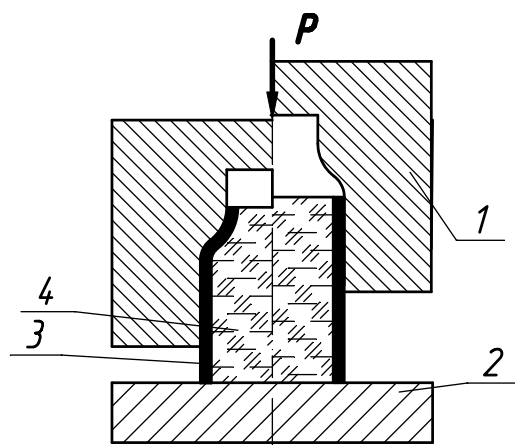


Рис. 1. Штамп для обжима трубчатой заготовки

Штамп работает следующим образом. На основание 2 устанавливают трубчатую заготовку 3, внутрь которой закладывают рабочее тело 4, выполненное из ледяного стержня. По средством перемещения ползуна прессы с усилием P (на рис. 1 не показан) перемещается матрица 1, в результате чего происходит обжим трубы. Затем матрицу 1 поднимают вверх, производят выемку готовой детали с рабочим телом 4, которое впоследствии растает за счет положительной температуры рабочего помещения. В результате решается поставленная задача.

Данная схема может быть использована в авиационной, судостроительной и смежных с ними отраслях промышленности. Рабочее тело для передачи усилия при обжиге полых и трубчатых заготовок по жесткой матрице представляет собой ледяной стержень, расположенный во внутреннем объеме заготовки. Достигается расширение технологических возможностей операций обжима полых и трубчатых заготовок при минимальных затратах.

В листовой штамповке формоизменение заготовки наиболее часто осуществляется в условиях осевой симметрии деформирования.

Как установлено в работе [3], при величине отношения толщины заготовки к максимальному ее габариту 0,02 и менее, температура по толщине листа меняется незначительно, следовательно, ее можно считать постоянной. Переносом тепла по толщине материала с движущимися частицами также можно пренебречь. В нашем случае соотношение габаритов заготовки значительно меньше, чем 0,02. Температурный режим соблюдался $-3...-12^\circ\text{C}$.

В этом случае радиальные и тангенциальные напряжения, действующие в очаге деформаций, можно считать главными напряжениями, которые усредняются по толщине и относятся к срединной поверхности как в безмоментной теории оболочек [5].

Силы трения и изгиба на ребре матрицы учитываются после получения окончательного решения по методике, изложенной в работе Е.А. Попова [4]. К числу допущений относятся также основные гипотезы деформационной теории.

При формоизменении осесимметричных оболочек, имеющих двойную кривизну (см. рис. 2), с учетом характера изменения толщины заготовки уравнения равновесия сил в проекциях на нормаль и касательную к срединной поверхности удобно представить в виде [6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\rho} [\rho S(\rho) \sigma_\rho \sin \psi] &= -(q_n + q_\tau \operatorname{tg} \psi) \rho + (a_n + a_\tau \operatorname{tg} \psi) \frac{\gamma}{g} \rho \cdot S(\rho); \\ \frac{d}{d\rho} [\rho S(\rho) \sigma_\varphi] &= S(\rho) \sigma_\varphi - \frac{q_\tau}{\cos \psi} \rho + \frac{a_\tau}{\cos \psi} \frac{\gamma}{g} \rho \cdot S(\rho), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ψ - угол наклона касательной к образующей, отсчитываемый против часовой стрелки от горизонтали; q_n - проекция удельного давления на нормаль, направленную к центру кривизны; q_τ - проекция удельного давления на касательную, направленную в сторону увеличения ρ ; a_n - проекция ускорения на нормаль; a_τ - проекция ускорения на касательную; γ - удельный вес материала; g - ускорение свободного падения.

Уравнения равновесия получены для положительных направлений удельных давлений и ускорений, указанных на рис. 2.

Данные уравнения описывают все процессы формоизменяющих операций плоской заготовки. В табл. 1 показано, как изменяются величины, входящие в уравнения, в зависимости от характера процесса, а также в зависимости от того, какой участок заготовки анализируется.

Так, для процессов формовки жидкостью или газом, а также для пневмотермической формовки в режиме сверхпластичности эти уравнения после несложных преобразований можно представить в виде:

$$\sigma_\rho = \frac{q\rho}{2S(\rho)\sin\psi};$$

$$\frac{d}{d\rho}[\sigma_\rho S(\rho)] = \frac{\sigma_\varphi - \sigma_\rho}{\rho} S(\rho). \quad (1a)$$

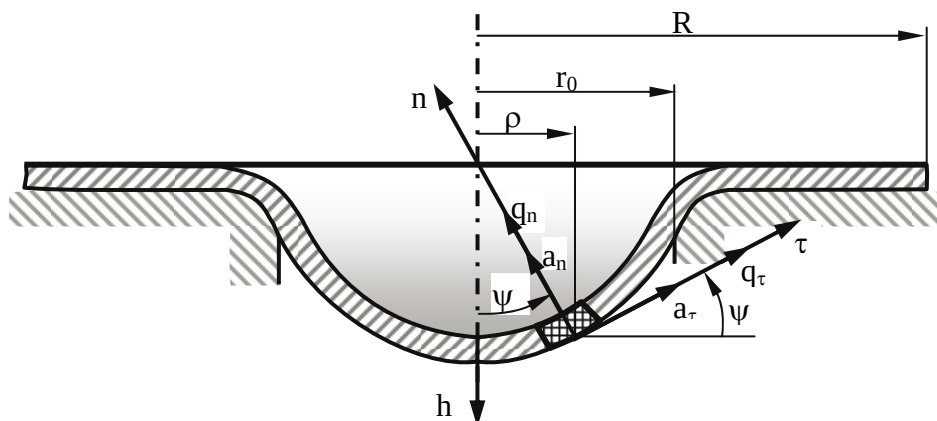


Рис. 2. Схема деформирования плоской заготовки

При рассмотрении внешнего участка, если трением на плоской части заготовки и на ребре матрицы пренебречь, равновесие элемента заготовки для всех процессов описывается одним последним уравнением системы (1a). Заметим, что при принятых допущениях, т.е. $\mu_{TP} = 0$, это уравнение справедливо и для торообразного участка на ребре матрицы.

Таблица 1

Значения коэффициентов, входящих в уравнения (1a),
 для различных технологических процессов

Процесс	Внутренний участок ($r_0 \geq \rho > 0$)	Внешний участок (фланец) ($R \geq \rho > r_0$)
Высокоскоростная формовка	$\psi = f_1(\rho); q_n = -f_2(\rho);$ $q_\tau = f_3(\rho); a_n = f_4(\rho);$ $a_\tau = f_5(\rho).$	$\psi = 0;$ $q_n = 0;$ $q_\tau = 0;$ $a_n = 0;$ $a_\tau = 0.$
Формовка резиной	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -q = const; q_\tau = -\mu_{TP} q;$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	
Формовка жестким пуансоном	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -f_2(\rho); q_\tau = -\mu_{TP} f_2(\rho);$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	
Вытяжка	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -f_2(\rho); q_\tau = -\mu_{TP} f_2(\rho);$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	
Формовка жидкостью и газом	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -q = const; q_\tau = 0;$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	
Пневмотермическая формовка в режиме сверхпластичности	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -q = const; q_\tau = 0;$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	

В случае формоизменения трубчатой заготовки (см. рис. 3), учитывая, что при обжиме и вывороте внутрь $q_n = q(\rho)$, $q_\tau = \mu_{TP} q(\rho)$, $\psi = 90^\circ - \alpha$, а при раздаче и вывороте наружу $q_n = q(\rho)$, $q_\tau = -\mu_{TP} q(\rho)$, $\psi = 270^\circ - \alpha$, можно получить уравнение равновесия в виде:

$$\frac{d}{d\rho} [\sigma_\rho S(\rho)] = \frac{\sigma_\varphi (1 + \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha) - \sigma_\rho \left(1 + \mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho} \right)}{\rho} S(\rho). \quad (16)$$

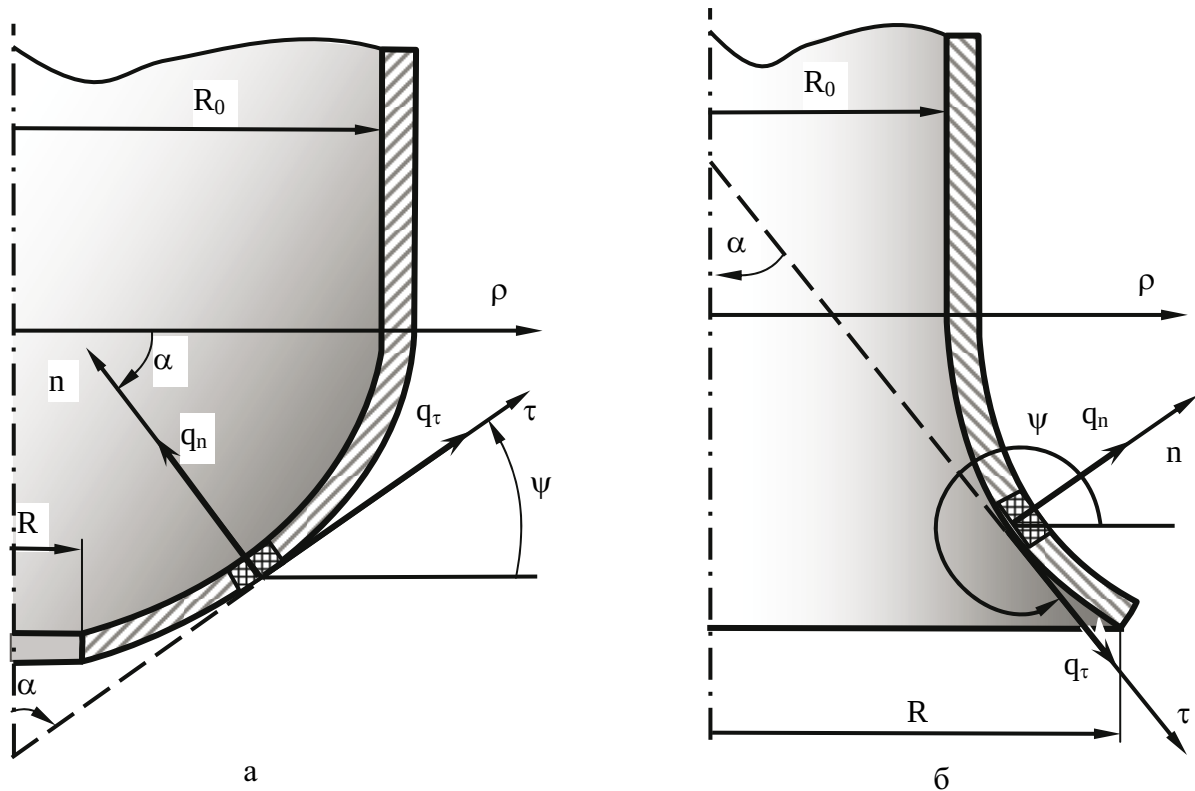


Рис. 3. Схема деформирования трубчатой заготовки:
а – обжим; б – раздача

Это уравнение справедливо для всех перечисленных процессов формоизменения трубчатой заготовки.

Используя уравнения равновесия (16) и уравнения связи напряжений с деформациями

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{4}{3} E_{сек} \left(e_\rho + \frac{1}{2} e_\varphi \right); \\ \sigma_\varphi &= \frac{4}{3} E_{сек} \left(e_\varphi + \frac{1}{2} e_\rho \right); \\ e_\rho + e_\varphi + e_z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

для случая несжимаемости материала отсутствия температурных деформаций, получим интегральное уравнение равновесия в истинных деформациях:

$$e_\rho = -\frac{1}{2} \cdot e_\varphi + \frac{3}{4} \cdot \frac{U(\rho)}{S(\rho) \cdot E_{cek}} \cdot \int_R^\rho \frac{S(\rho) E_{cek} e_\varphi (1 + \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha)}{\rho \cdot U(\rho)} d\rho +$$

$$+ \frac{E_{cekR} \cdot S(R)}{E_{cek} \cdot S(\rho)} \cdot \left(e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R} \right) \cdot U(\rho), \quad (3)$$

где

$$U(\rho) = \exp \left[- \int_R^\rho \frac{1 - \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha + 2 \mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho}}{2\rho} d\rho \right]. \quad (4)$$

При анализе формоизменения трубчатой заготовки можно считать тангенциальные деформации известными:

$$e_\varphi = \ln \frac{\rho}{R_0}, \quad (5)$$

где R_0 – радиус заготовки (трубы).

Для определения граничных условий (см. рис. 3) необходимо учесть, что

$$E_{cekR} \cdot \left(e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R} \right) = \frac{3}{4} \sigma_{\rho R}.$$

В случае обжима и раздачи без подпора ($\sigma_{\rho R} = 0$) последнее слагаемое в уравнении (3) обращается в нуль.

При рассмотрении обжима и раздачи в конической матрице угол α равен углу конусности α_κ . Тогда уравнение (4) упрощается:

$$U(\rho) = \exp \left[\frac{1 - \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha_\kappa}{2} \cdot \ln \frac{R}{\rho} \right]. \quad (6)$$

Остановимся более подробно на случае обжима и раздачи в тороидальной матрице. При определенных условиях эти процессы можно рассматривать как выворот внутрь или наружу (см. рис. 4).

Выражая ρ через угол α , приведем уравнения (3) и (4) к виду:

$$e_\rho = -\frac{1}{2} e_\rho - \frac{3}{4} \frac{U(\alpha)}{E_{cek} S(\alpha)} \cdot \int_{\alpha_0}^\alpha \frac{S(\alpha) E_{cek} e_\varphi r_0 (\sin \alpha + \mu_{TP} \cos \alpha)}{(r_0 \cos \alpha + a) \cdot U(\alpha)} d\alpha +$$

$$+ \frac{E_{cek\alpha_0} S(\alpha_0)}{E_{cek} S(\alpha)} \cdot \left(e_{\rho\alpha_0} + \frac{1}{2} e_{\varphi\alpha_0} \right) \cdot U(\alpha), \quad (7)$$

где

$$U(\alpha) = \exp \left[\int_{\alpha_0}^\alpha \frac{r_0 \sin \alpha - 3 \mu_{TP} r_0 \cos \alpha - 2 \mu_{TP} a}{2(r_0 \cos \alpha + a)} d\alpha \right]. \quad (8)$$

Для обжима (выворота внутрь):

$$a = (R_0 - r_0),$$

$$e_\varphi = \ln \left[\frac{R_0 - r_0 (1 - \cos \alpha)}{R_0} \right];$$

для раздачи (выворота наружу):

$$a = -(R_0 - r_0),$$

$$e_{\varphi} = \ln \left[\frac{R_0 + r_0(1 - \cos \alpha)}{R_0} \right].$$

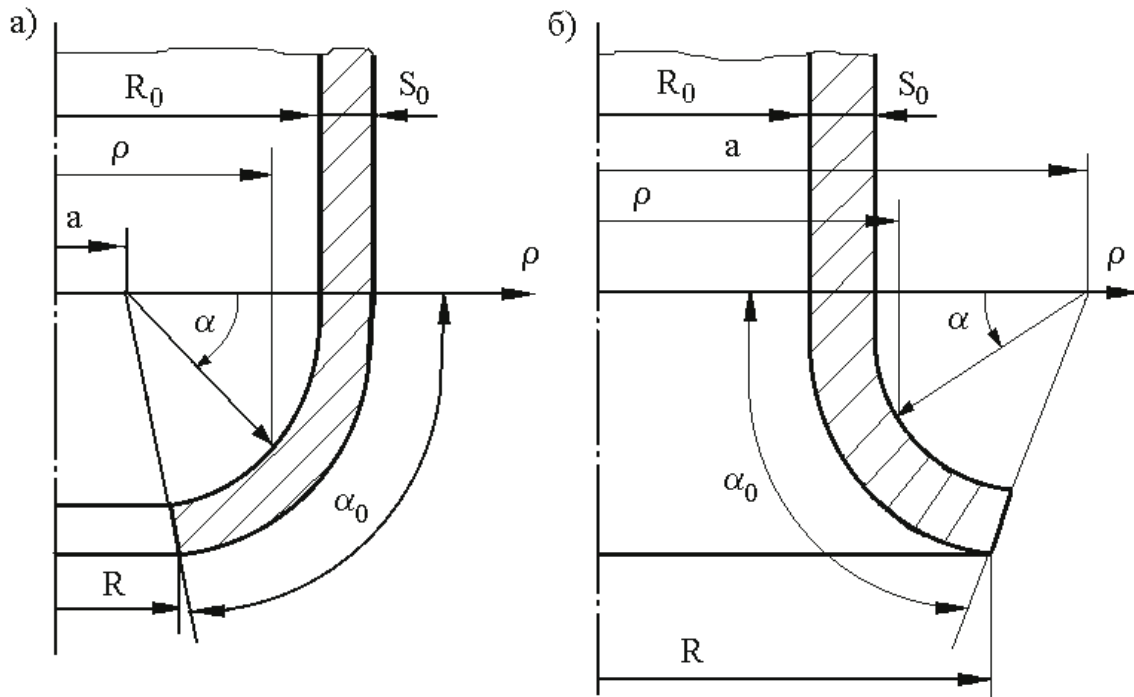


Рис. 4. Схема процессов обжима (а) и раздачи (б) в тороидальной матрице

Выражение (8) можно упростить:

$$U(\alpha) = \exp \left[\frac{1}{2} \ln \frac{r_0 \cos \alpha_0 + a}{r_0 \cos \alpha + a} + \frac{3}{2} \mu_{TP} (\alpha_0 - \alpha) + F(\alpha) \right], \quad (9)$$

где

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} a}{2} \cdot \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{r_0 \cos \alpha + a}.$$

В зависимости от соотношения между r_0 и a выражение $F(\alpha)$ будет иметь различный вид. Рассмотрим все случаи:

1) обжим в сферической матрице – $a = 0$:

$$F(\alpha) = 0;$$

2) обжим при $a^2 = r_0^2$, обжим при $a = r_0 = \frac{R_0}{2}$:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP}}{2} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right);$$

3) обжим при $a^2 < r_0^2$:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} \cdot a}{2\sqrt{r_0^2 - a^2}} \times \ln \left[\frac{\left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + a + r_0 \right) \left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} - a - r_0 \right)}{\left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - a - r_0 \right) \left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} + a + r_0 \right)} \right];$$

4) $a^2 > r_0^2$, выворот внутрь и наружу, все случаи раздачи:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{тр} a}{\sqrt{a^2 - r_0^2}} \times \left[\arctg \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) - \arctg \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right) \right].$$

При решении задач на выворот необходимо учесть, что для значений

$$\arctg \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \right) = \begin{cases} \pi/2, & \text{при } (a + r_0) > 0 \\ -\pi/2, & \text{при } (a + r_0) < 0 \end{cases}.$$

При формоизменении трубчатых заготовок расчет значительно упрощается, так как тангенциальные деформации известны (5). Весь расчет деформированного состояния проводят с помощью уравнений (3) или (7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидрогазовые системы летательных аппаратов / Д. Г. Колыхалов, Б. Н. Марьин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 459 с.
2. Феоктистов, С. И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности / С. И. Феоктистов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 183 с.
3. Галкин, М. Н. Основы теплообмена: учеб. пособие / М. Н. Галкин. – М.: Изд-во МАТИ, 1970. – 159 с.
4. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
5. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М.: Высш. шк., 1969. – 608 с.
6. Григорьев, А. С. Большие деформации неоднородных осесимметричных оболочек / А. С. Григорьев // Тр. VIII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. – Ростов-на-Дону, 1971. – С. 119-125.

Куриный В. В., Свиридов А. В.

V. V. Kuriny, A. V. Sviridov

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

APPLICATION OF RAPID PROTOTYPING METHODS IN FOUNDRY PRODUCTION



Куриный Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Vladislav V. Kuriny – PhD in Engineering, Assistant Professor at the Department of Foundry Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.



Свиридов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: magistr010@rambler.ru.

Mr. Andrey V. Sviridov – PhD in Engineering, Assistant Professor at the Department of Foundry Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: magistr010@rambler.ru.

Аннотация. Кратко рассмотрены методы быстрого прототипирования и возможность их применения в литейном производстве.

Summary. Methods for rapid prototyping and their possible application in foundry are briefly overviewed.

Ключевые слова: методы быстрого прототипирования, форма, модель, отливка.

Key words: rapid prototyping methods, mould, pattern, casting.

УДК 621.74

Использование в литейном производстве технологий быстрого прототипирования (RP – rapid prototyping) может привести к существенному сокращению времени технологического цикла производства литья, расширению сортамента тонкостенных отливок; возможности изготовления более точных моделей; к повышению прочности и термостабильности моделей; достижению высокой экономической эффективности в условиях серийного и мелкосерийного производства [1]. Для достижения вышеперечисленных целей необходимо выполнение одного основного условия, а именно правильно выбрать метод быстрого прототипирования исходя из условий конкретного производства.

В настоящее время известно более 80 разновидностей технологий быстрого прототипирования [2]. Все разработанные технологии быстрого прототипирования можно подразделить по нескольким основным направлениям.

1 Технологии, основанные на отверждении жидкостей.

Отверждение светом по маске (Curing by light through masks). Из них наиболее известны технология DESCAF фирмы Light Sculpting Inc., технология RMPD фирмы MicroTEC,

технология Microstereolithography – разработка лаборатории микросистем политехнического института Лозанны.

Отверждение УФ лазером (SINGLE BEAM) включает двенадцать разновидностей, из которых наиболее известны Стереолитография ИПЛИТ РАН, Stereolithography фирмы Aaroflex, Inc. технология (SOUP) фирмы Mitsubishi/CMET.

Отверждение двумя лазерами (CURING WITH TWO LASER BEAMS SIMULTANEOUSLY). Три технологии находятся в стадии разработки.

Отверждение УФ лампами: технология PolyJet компании Objet Geometries, технология (DLP) компании Envisiontec, технология FTI фирмы 3D Systems, технология MJM фирмы Stratasys.

Гибридный композиционный материал. Комбинация инжекционной технологии с УФ отверждением. Технология Objet 3D-printer фирмы Objet Geometries Ltd.

2 Порошковые технологии. Сплавление порошков (MELTING OF POWDER). Технологии спекания порошков включают шесть технологий, из которых наиболее известны технология DMLS фирмы EOS, технологии SLS, SLP, SLM фирмы 3D Systems, технология (SLRS) – разработка Техасского университета.

Технологии сплавления порошков включают восемь разновидностей, из которых самые известные технология (DMD) – разработка Мичиганского университета, технология (DLF) – разработка Лос-Аламаской национальной лаборатории.

Склеивание порошков (BINDING POWDER BY ADHESIVES). Технологии, разработанные на основе метода 3D печати, Массачусетского технологического института. Наиболее известны технология 3-DP-печати системы ZPrint от ZCorporation, технология DSPC фирмы Soligen.

Прессование керамики с оплавлением связующего вещества давлением (EXTRUSION OF CERAMICS WITH MELTED BINDER).

3 Изготовление моделей из твёрдых материалов (EXTRUSION OF MELTED MATERIAL).

Способы экструзии пластмасс включают в себя три технологии. Наиболее известная из них технология FDM фирмы Stratasys.

4 Методы, основанные на резке листовых материалов. Резка материалов лазером (CUTTING MATERIAL WITH A LASER). Наиболее известны LOM технологии фирм Helisys Inc, Ceramic Composite Inc, Landfoam Topographics. Резка материалов ножом (CUTTING MATERIAL WITH A KNIFE) представлена технологией PLT фирмы Kira Corporation.

Менее известны методы, основанные на сваривании (METHODS BASED ON WELDING) и напылении металла (SPRAYING OF METAL).

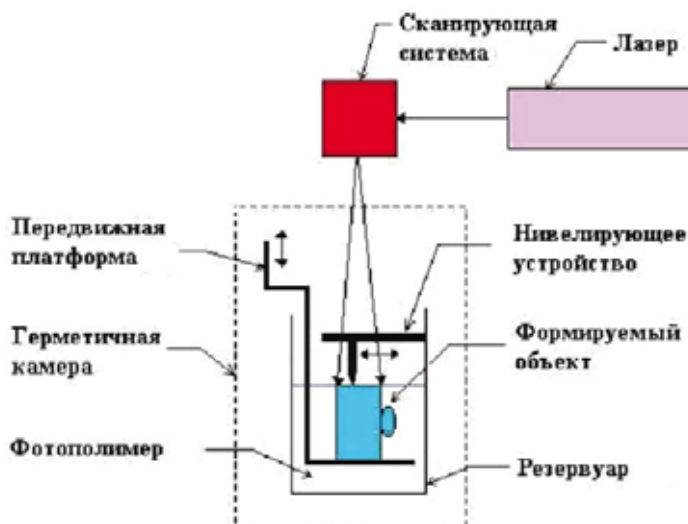
В литейном производстве методы быстрого прототипирования применяются для изготовления моделей и форм.

Известно, что для изготовления моделей многие предприятия используют модельные мастерские. Как правило, в них модели изготавливаются из твердых сортов древесины, пластмассы и мягких металлов. Изготавливают модели по-разному: на одних предприятиях детали фрезеруют на станках с ЧПУ, на других – полагаются на модельщиков. Необходимость наличия специально обученного персонала и утилизации отходов, трудоёмкость процесса изготовления, выделение пыли – это неполный перечень недостатков традиционного способа изготовления моделей. Для изготовления моделей можно применять методы быстрого прототипирования, которые автоматизируют процесс изготовления и позволяют значительно ускорить его.

Как правило, модели для литейного производства изготавливают из пластика ABS, ABS Plus, ABS-M30 и ABS-M30i, поликарбоната PC, пластика из смеси PC и ABS, полифенилсульфона PPSF. Для этого используются технологии быстрого прототипирования, основанные на световом отверждении жидкости. Наиболее широко применяются технологии SLA компании 3D Systems (установки SLA-5000, SLA-7000) и PolyJet компании Objet Geometries (установки Eden330 Connex500).

Исторически технология SLA – первая технология быстрого прототипирования. Существует целый ряд компаний, развивающих это направление. Родоначальником и лидером на рынке SLA систем является компания 3D Systems (США). Принципиальная схема технологии стереолитографии приведена на рис. 1.

Рис. 1. Принципиальная схема стереолитографии



ёмкость на двойную толщину готового слоя и создаётся новый слой. Процесс повторяется до полного изготовления детали. ABS в качестве материала для построения модели имеет несколько недостатков: из-за специфики технологии построения создается несколько грубая поверхность модели и стоимость полученной модели достаточно высокая. Только стоимость материала от 8000 до 9600 р. за 1 кг.

Компания Objet Geometries (Израиль) появилась на рынке RP с технологией PolyJet – основным конкурентом SLA – сравнительно недавно [5]. Первая система Eden330 была запущена в середине 2003 г. На сегодняшний момент по всему миру установлено более 1000 систем Objet. Темпы развития систем 3D печати Eden и расходных материалов FullCure наиболее прогрессивные. Процесс печати заключается в следующем. На плоскость построения блоком печатающих головок наносится жидкий фотополимер. На печатающей головке размещены две ультрафиолетовые (УФ) лампы, которые заменяют лазер, применяемый в SLA-установках. После нанесения слоя фотополимер полимеризуется под воздействием УФ света. Этим завершается построение одного слоя. Далее плоскость построения опускается на очень малый уровень и головки наносят следующий слой.

Толщина слоя – 16 микрон, что приводит к гладкости криволинейных поверхностей. Точность изготовления моделей до 0,1 мм. При высокой стоимости основного материала от 8000 до 9600 р. за 1 кг материал поддержки стоит в два раза дешевле, что удешевляет модель в целом. Аналогична технологии PolyJet технология MJM компании Stratasys с отверждаемым УФ фотополимером.

Работа 3D принтеров FDM (Fused Deposition Modeling) осуществляется за счёт наложения и отверждения полимерной нити на плоскость построения. Нить подаётся с катушки на экструзионную головку. Температура головки и скорость вращения подающих роликов настраиваются таким образом, чтобы в каждый момент времени наносилось одинаковое количество материала. В качестве поддержки, в паре используются дополнительная головка и дополнительная катушка с материалом поддержки [6].

Применение методов быстрого прототипирования для изготовления литейных форм в настоящее время ограничивается литьем в песчаные, гипсовые, керамические формы, литьем по выплавляемым и выжигаемым моделям [7].

В настоящее время для изготовления форм на гипсовой основе широко применяется технология 3-DP, реализованная в системе ZPrint компании ZCorporation. На плоскости построения равномерным слоем с заданной толщиной распределяется порошок на гипсовой ос-

нове [8]. Печатающая головка распыляет на порошок клеящее вещество. Затем плоскость построения опускается на малый уровень, соответствующий толщине слоя, и процесс повторяется. По окончании печати остаётся извлечь полученную модель и провести процедуру очистки от порошка, не покрытого клеящим составом.

Главными преимуществами принтеров ZCorp являются возможность печатать полноцветные модели, дешевизна расходных материалов и высокая скорость процесса печати.

В качестве расходных материалов используются различные типы порошков и клеящих составов производства ZCorp. Все порошки на гипсовой основе отличаются химическим составом, который определяет их физико-механические свойства. Кроме порошка и клея используются различные типы пропиток. Порошок на гипсовой основе хрупок. Основным недостатком является то, что в качестве основы для порошков применяется гипс, что ограничивает температуру заливаемых сплавов.

Этих недостатков лишен способ прямого изготовления керамических форм (DSPC), запатентованный Массачусетским технологическим институтом, исключительную лицензию на который имеет фирма Soligen [9].

Форма изготавливается послойно, и процесс создания каждого слоя включает в себя три этапа. Сначала виртуальная модель керамической формы "разрезается", создавая поперечное сечение в одной области. Затем валковым механизмом порошок раскатывается тонким слоем. После этого область поперечного сечения формы обрабатывается струйной головкой, наносящей связующее вещество. Просачиваясь в поры между частицами порошка, связующее вещество склеивает его. По завершении одного слоя модель керамической формы снова разрезается, теперь уже несколько выше, и процессы нанесения и склеивания повторяются. Этапы повторяются до тех пор, пока керамическая форма не будет изготовлена полностью. Затем форма очищается от избыточного порошка и обжигается. После чего форму можно заливать. Для литья в DSPC-формы можно использовать практически любые металлы. С помощью этой технологии изготавливают детали из алюминия, магния, мягкого железа и нержавеющей стали.

Развитием технологии PolyJet является технология "Lost-PolyJet", которую разработала венгерская компания Varinex Inc. совместно с литейной компанией Magyarmet [9].

Метод "Lost-PolyJet" является более точным, в нем нет необходимости учитывать усадку модели. Вместо всей модели на 3D принтере Objet изготавливают оболочку, состоящую из двух половинок, которые склеивают, формируя модель. Затем модель покрывают тонким слоем воска. К модели подпаивают восковую литниковую систему. Наносят суспензию. После чего наносят первый слой обсыпки из кварцевого песка и затем высушивают. В общей сложности наносится 12-16 слоёв. Затем при температуре 100-120 °С выплавляется восковая литниковая система. Саму модель выжигают при температуре 800-950 °С. Затем оболочку прокаливают и заливают металл. При всей внешней сложности технологии Lost-PolyJet она значительно ускоряет процесс производства методом ЛВМ и делает его рентабельным при единичном и мелкосерийном производстве.

Главная особенность технологий быстрого прототипирования, на которую стоит обратить особое внимание, – это сокращение временных и финансовых затрат на ранних стадиях разработки новых изделий и, как следствие, конкурентное преимущество на современном рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстрое прототипирование из ABS в современном литейном производстве точных изделий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.umpro.ru/index.php>; <http://wiki.laser.ru/index.php>; <http://www.cad.dp.ua/obzors/SLA.php>; <http://www.print3d.by/Technology.html>; <http://www.cad.dp.ua/obzors/obzor3Dprint.php>.
2. Бирбраер, Р. А. Технология быстрого прототипирования в современном литейном производстве точных заготовок / Р. А. Бирбраер, А. Е. Колмаков, В. В. Столповский // Литейное производство. – 2004. – № 4. – С. 11-14.
3. Васильев, В. А. Теория и технология изготовления отливок методом RP / В. А. Васильев, В. В. Морозов, Н. М. Максимов // Литейное производство. – 2004. – № 4. – С. 5-8.
4. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
5. Артемьев, А. Ю. Технология быстрого прототипирования в литейной индустрии (ООО с ИИ "БИ-БУС Украина", г. Киев) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lityo.com.ua/li/s_218.html.

Тарануха Н. А., Журбин О. В., Журбина И. Н.
N. A. Taranukha, O. V. Zhurbin, I. N. Zhurbina

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**EXPERIMENTAL STUDY OF INTERNAL AND EXTERNAL RESISTANCE DURING
VIBRATION OF SHIP STRUCTURES**



Тарануха Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; (4217) 54-30-74. E-mail: taranukha@knastu.ru.
Mr. Nikolay A. Taranukha – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av.; (4217) 54-30-74. E-mail: taranukha@knastu.ru.



Журбин Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент, докторант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; (4217) 54-30-74. E-mail: zhurbin@pochta.ru.
Mr. Oleg V. Zhurbin – PhD in Engineering, Associate Professor, Doctoral Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur, Russia); Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av.; (4217) 54-30-74. E-mail: zhurbin@pochta.ru.



Журбина Ирина Николаевна – аспирантка Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск на Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; (4217) 54-30-74.
Ms. Irina N. Zhurbina – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur, Russia); Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av.; (4217) 54-30-74.

Аннотация. Данная работа посвящена вопросам, связанным с решением задач динамики колеблющихся судовых конструкций. Рассмотрены присоединенные массы жидкости. Значительное внимание уделено учету сопротивления внешней и внутренней среды. Важное место в работе уделено экспериментально-численному моделированию задач по определению сопротивления внешней и внутренней среды. В частности здесь рассмотрено определение коэффициентов сопротивления для судовых систем, колеблющихся в воздухе, в воде, в дизельном топливе и в машинном масле.

Summary. The paper is concerned with the problems arising from the solution of tasks of the dynamics of vibrating ship structures. Added liquid masses are considered. Significant attention is given to the account of resistance of external and internal environment. An important place in the paper is given to experimental and numerical modeling of tasks of defining resistance of external and internal environments. In particular, definition of resistance coefficients for ship structures vibrating in the air, in water, in diesel fuel and in lubricating oil is considered.

Ключевые слова: кораблестроение, колебания, внутреннее и внешнее сопротивление, присоединённые массы, численное моделирование.

Key words: shipbuilding, vibration, internal and external resistance, added masses, numerical modeling.

Введение

Исследование колебаний механических систем с учетом влияния сопротивления среды (внешней и внутренней) требует знания коэффициентов затухания и коэффициентов сопротивления этих сред. В данной работе в качестве внешних сред были выбраны четыре разные среды: воздух, вода, дизельное топливо, машинное масло. Эти среды выбраны в качестве основных для колеблющихся судовых конструкций.

По природе своего возникновения и механизму воздействия [11, 12, 15] следует различать два вида неупругого сопротивления среды: неупругое сопротивление внутренней среды (внутри материала) и неупругое сопротивление внешней среды (например, сопротивления неупругого основания или окружающей вязкой жидкости).

О природе внутреннего и внешнего сопротивления

Общепринятая мера внутреннего трения [2, 8, 11, 14] определяется из энергетических соображений и представляет отношение

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (1)$$

где ΔW – необратимо поглощенная телом за один цикл часть энергии циклических деформаций; W – потенциальная энергия тела, отвечающая амплитуде деформаций за тот же цикл.

Величину ψ называют коэффициентом поглощения.

При учёте динамических процессов удобнее оперировать величиной

$$\gamma = \frac{\psi}{2\pi}, \quad (2)$$

называемой коэффициентом внутреннего трения (внутреннего сопротивления).

Очень часто коэффициент поглощения ψ определяют по развертке свободных затухающих колебаний образца изучаемого материала через логарифмический декремент затухания:

$$\ln D = \ln \frac{w(t_1)}{w(t_1 + T)}. \quad (3)$$

Между ψ , $\ln D$ и γ существуют отношения:

$$\psi = 2 \ln D = 2\pi\gamma. \quad (4)$$

Для интереса и более глубокого понимания доли внутреннего поглощения энергии в материале укажем в табл. 1 численные значения коэффициента поглощения ψ_σ , приведенные в работе [7], а также численные значения коэффициента γ_σ для некоторых материалов и конструкций, с учетом [1, 3] и выражения (2). В этой же табл. 1 приведены коэффициенты γ_σ для различных сред, полученные экспериментально в данной работе.

Таблица 1

Значения коэффициентов поглощения энергии ψ и внутреннего сопротивления γ для некоторых материалов и конструкций и внешнего сопротивления γ для некоторых сред

Материал, конструкция, среда	ψ_σ , [7]	γ_σ , [1, 3, 11]
1	2	3
Материалы		
Алюминий	0,02-0,04	0,003-0,006
Бетон	0,26	0,041
Дуб	0,11	0,017
Железобетон	0,25	0,040



Продолжение табл. 1

1	2	3
Латунь	0,01	0,002
Медь	0,33	0,053
Никель	0,03	0,005
Резина	0,20-1,20	0,032-0,190
Сосна	0,07	0,011
Сталь	0,01-0,03	0,002-0,005
Стеклопластик	0,20-0,40	0,032-0,064
Чугун серый	0,23	0,036
Конструкции		
Кирпичная кладка	0,25	0,040
Конструкция деревянная	0,30-0,35	0,048-0,056
Конструкция железобетонная	0,50	0,060-0,090
Конструкция стальная	0,16-0,18	0,025-0,028
Конструкция из стеклопластика	0,60-0,80	0,095-0,127
Стальные мосты	0,04-0,31	0,006-0,050
Судовые стальные днищевые перекрытия	0,40-0,60	0,064-0,095
Судовые стальные мачты	0,20-0,45	0,032-0,072
Среды ($\gamma_{\sigma} = \gamma_{\text{экс.}}$, получен в данной работе)		
Внутреннее сопротивление стали $\gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}}$ (колебания консольной балки в вакууме)	-	0,003
Внешнее сопротивление воздуха $\gamma_{\text{экс}}^{\text{воздух}}$ (колебания консольной балки в воздухе)	-	0,001-0,002
Внешнее сопротивление воды $\gamma_{\text{экс}}^{\text{вода}}$ (колебания консольной балки в воде)	-	0,017-0,027
Внешнее сопротивление дизельного топлива $\gamma_{\text{экс}}^{\text{диз.топливо}}$ (колебания консольной балки в дизельном топливе)	-	0,027-0,042
Внешнее сопротивление машинного масла $\gamma_{\text{экс}}^{\text{маш.масло}}$ (колебания консольной балки в машинном масле)	-	0,039-0,061

При этом важно было получить коэффициенты сопротивления именно среды (внутренней или внешней), а не коэффициенты сопротивления конкретной конструкции. Основная идея разделения коэффициентов сопротивления внутренней и внешней среды приведена ниже.

Внешнее сопротивление среды, например для судна – это сопротивление заборной воды или жидких нефтепродуктов [11] в отсеках танкеров и топливных цистернах судов других типов. Считается, что этот коэффициент зависит от свойств внешней среды и может быть определен только экспериментально.

Экспериментальное моделирование задачи по определению коэффициентов сопротивления внутренней и внешней среды

В качестве внешних сред, которые являются основными для судовых конструкций в процессе эксплуатации и которые оказывают наибольшее сопротивление, были выбраны: воздух, вода, дизельное топливо, машинное масло [11, 15].

Воздух – среда, не оказывающая существенного сопротивления колеблющейся системе. Однако, как показывают экспериментальные исследования, это влияние всё же есть и зависит оно в основном от площади "парусности" колеблющейся системы.

Вода – основная внешняя среда для всех объектов морской и речной техники.

Дизельное топливо – среда, с которой взаимодействуют колеблющиеся конструкции топливных танков большинства судов и танкеров, перевозящих легкие нефтепродукты.

Машинное масло – среда, с которой взаимодействуют колеблющиеся конструкции масляных танков обычных судов и танкеров, перевозящих тяжелые нефтепродукты.

На рис. 1 изображена экспериментальная установка, которая предназначена для определения параметров сопротивления при свободных гидроупругих колебаниях консоли, с точечной массой на свободном конце. Установка позволяет произвести определение амплитудно-частотных характеристик, коэффициентов затухания и коэффициентов сопротивления внешней и внутренней среды колеблющейся системы.

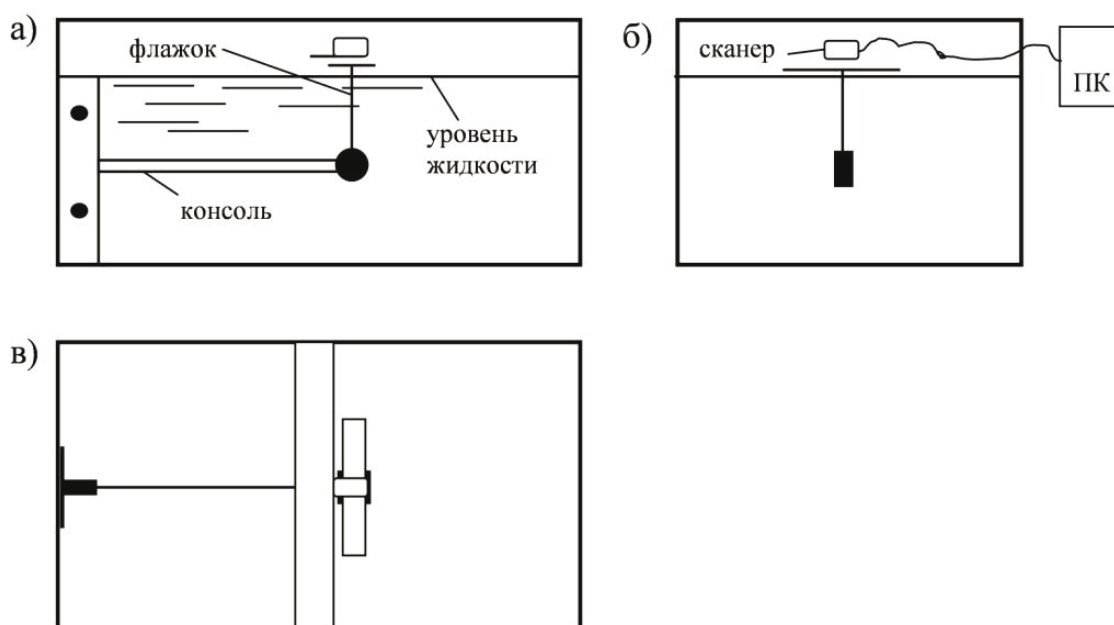


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
а – вид справа; б – вид спереди; в – вид сверху

Рассмотрим свободные колебания консольной балки, имеющей прямоугольное сечение $b \times h$ (см. рис. 2).

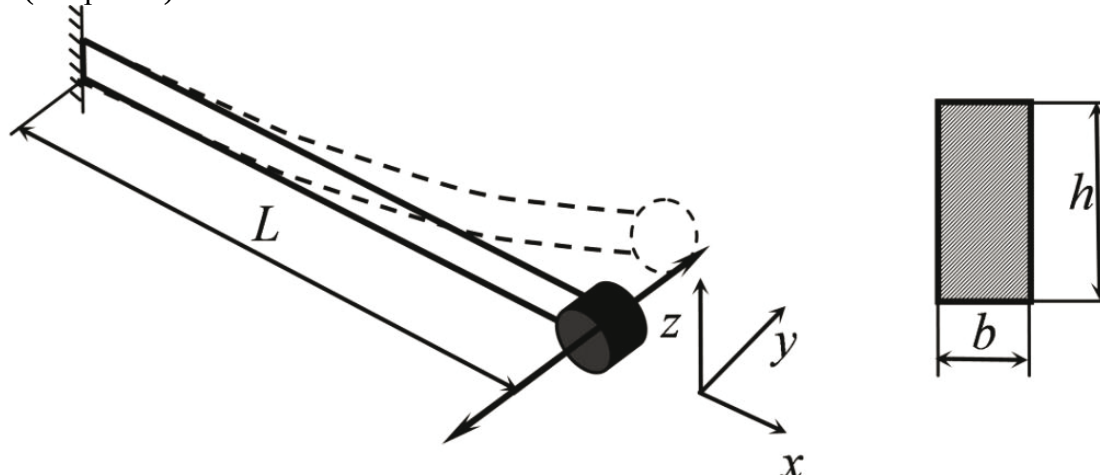


Рис. 2. Расчётная схема балки-консоли

Параметры балки и материала следующие: $L = 0,335$ м, $b = 0,0023$ м, $h = 0,012$ м, $\rho = 7800$ кг/м³, $m_{гр} = 0,421$ кг, $m_{блк} = 0,072 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot \text{с}^2$, $m = m_{гр} + m_{блк} = 0,493$ кг, $E = 2,0 \cdot 10^{11}$ Н/м.

Левый торец балки жёстко закреплён, правый – свободен и имеет сосредоточенную массу в виде груза. Балка совершает колебательные движения в направлении оси y .

Для проведения эксперимента были выбраны грузы с одной массой (0,421 кг), но разными площадями парусности (см. рис. 3 и табл. 2). В общую площадь парусности входит также и площадь парусности самой балки без учёта перекрываемой части грузом (см. табл. 2).

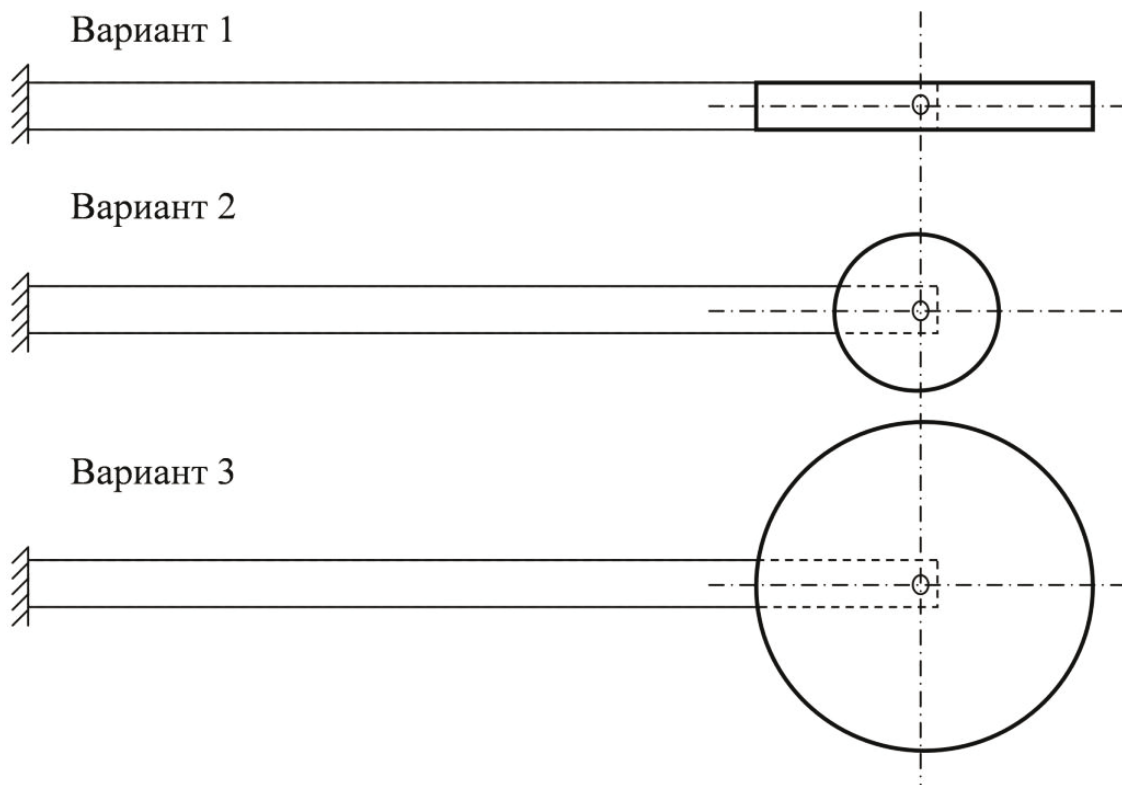


Рис. 3. Варианты схем балки-консоли

Таблица 2

Вычисления общей площади парусности

Вариант	Диаметр поверхности груза $d_{гр}, \text{м}$	Площадь парусности груза $S_{гр}, \text{м}^2$	Площадь парусности балки $S_{блк}, \text{м}^2$	Перекрываемая площадь $S_{пер}, \text{м}^2$	Общая площадь парусности $S, \text{м}^2$
1	66·E-3	0.792·E-3	4.020·E-3	0.516·E-3	4.296·E-3
2	35·E-3	0.962·E-3	4.020·E-3	0.330·E-3	4.652·E-3
3	66·E-3	3.421·E-3	4.020·E-3	0.516·E-3	6.925·E-3

Для определённости перечислим коэффициенты и некоторые их зависимости для дальнейшего использования:

$$n = \frac{\ln D}{T} \cdot \left(\frac{1}{c} \right) - \text{затухания};$$

$$\beta = 2 \cdot m \cdot n, \left(\frac{H}{m} \cdot c \right) - \text{сопротивления, используемый в ММЭ};$$

$\psi = 2 \ln D$ – поглощения;

$\gamma = \frac{\psi}{2\pi}$ – внутреннего сопротивления (трения).

Для определения перечисленных коэффициентов необходимо экспериментально определить период T и декремент D . Декремент D определим через отношение амплитуд двух соседних колебаний $w_{\text{экс}}(t_1)$ и $w_{\text{экс}}(t_1+T)$.

На рисунке 4 изображён экспериментально полученный график затухающих колебаний.

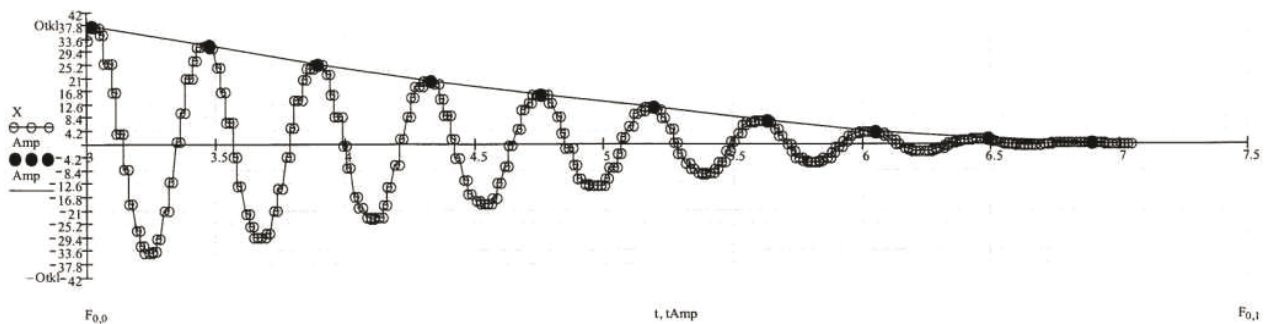


Рис. 4. График затухающих колебаний консольной балки с концевым грузом в воздухе

В результате экспериментов были получены коэффициенты ($n_{\text{экс}}$, $\beta_{\text{экс}}$, $\psi_{\text{экс}}$, $\gamma_{\text{экс}}$) приведенные в табл. 3. На рис. 5 – 10 показаны графики зависимостей периода T , декремента D , коэффициента затухания $n_{\text{экс}}$, коэффициент сопротивления $\beta_{\text{экс}}$, коэффициент поглощения $\psi_{\text{экс}}$ и коэффициент внутреннего трения $\gamma_{\text{экс}}$ в зависимости от площади парусности в четырёх различных средах (воздух, вода, дизельное топливо, машинное масло). Графики позволяют проследить тенденцию изменения указанных выше показателей в зависимости от площади парусности и дают возможность выйти на "нулевую парусность", т.е. колебание в вакууме. Значения экспериментальных точек на графиках (см. рис. 5 – 10) соответствуют вариантам с рис. 3 и приведены в табл. 3.

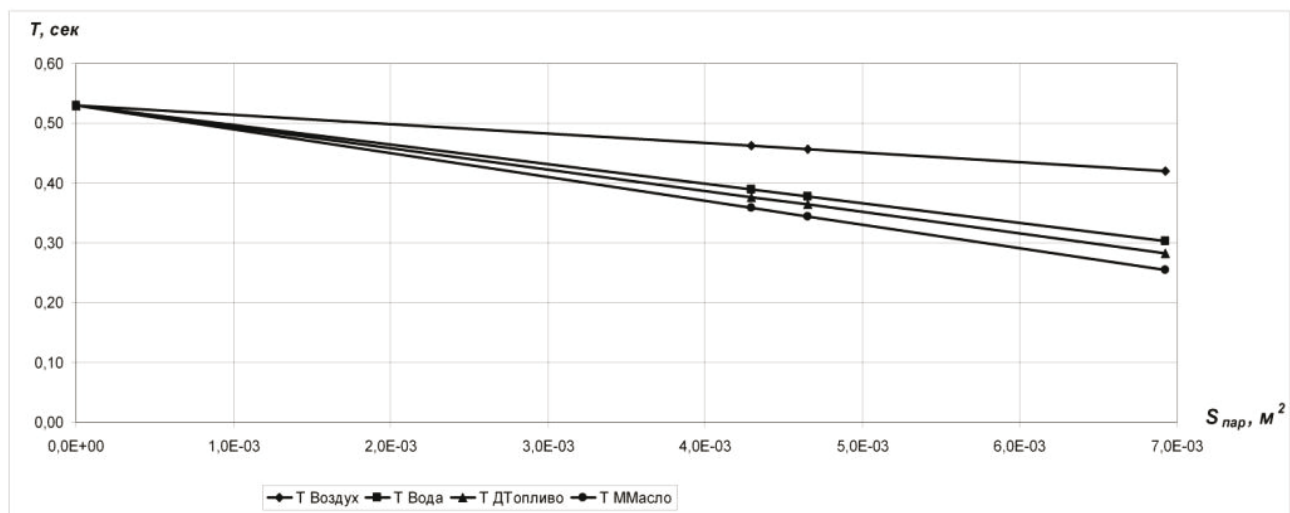


Рис. 5. График зависимости периода T от площади парусности

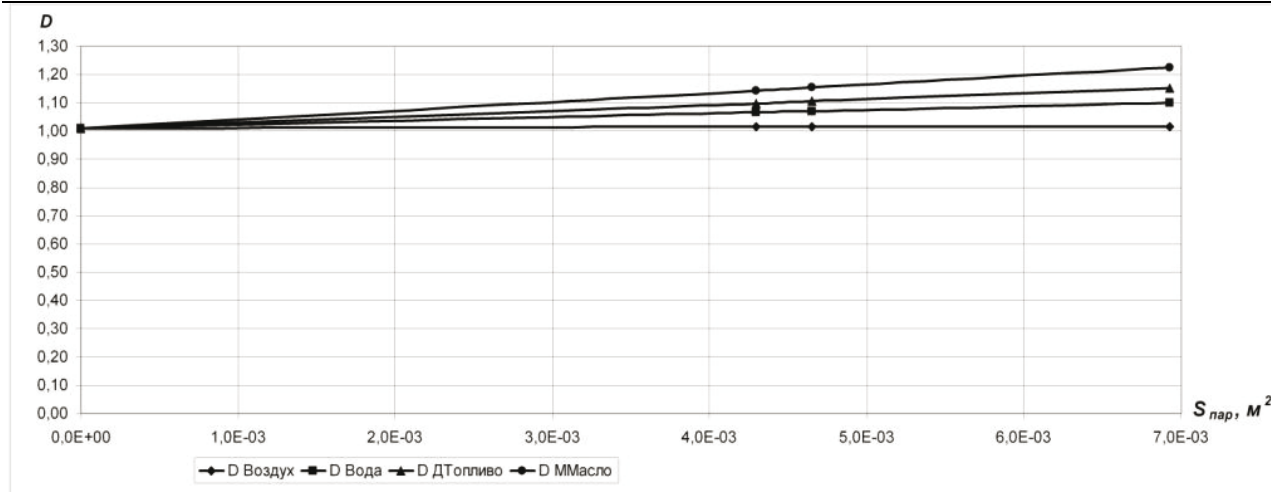


Рис. 6. График зависимости декремента D от площади парусности

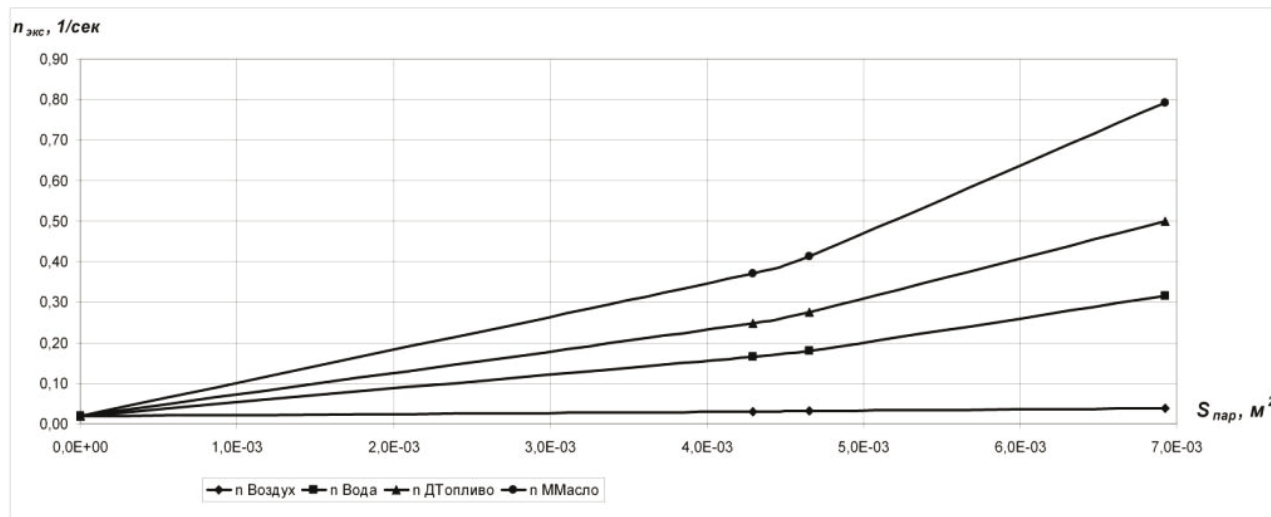


Рис. 7. График зависимости коэффициента затухания $n_{\text{экc}}$ от площади парусности

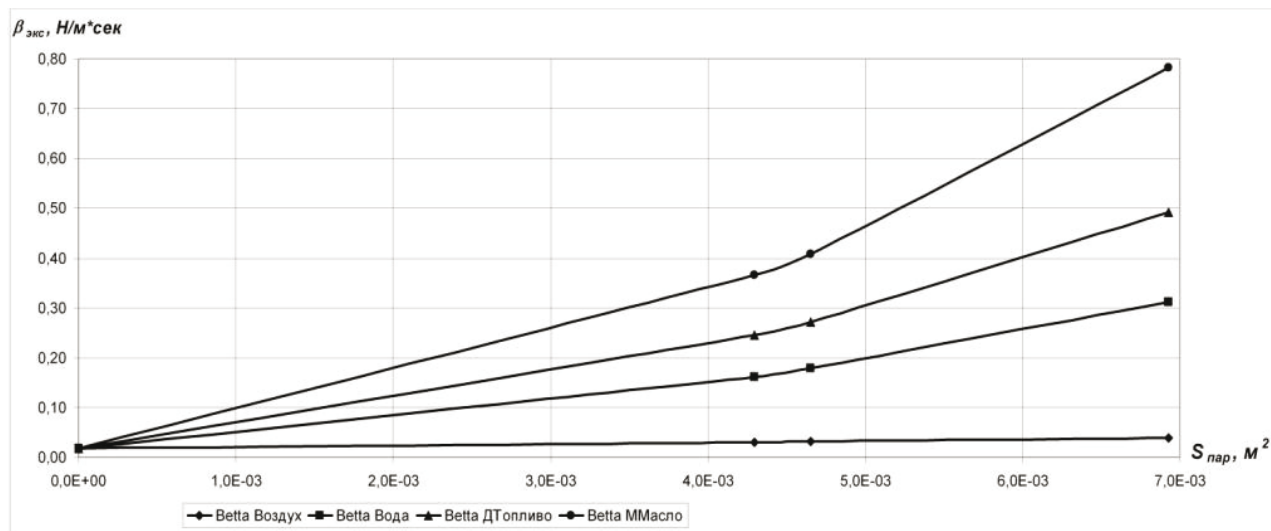


Рис. 8. График зависимости коэффициента сопротивления $\beta_{\text{экc}}$ от площади парусности

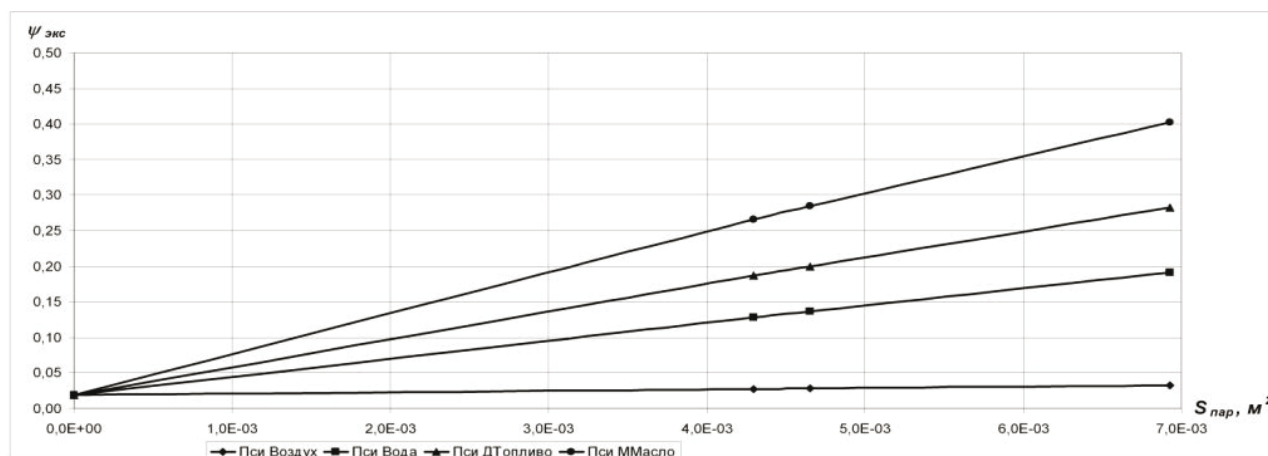


Рис. 9. График зависимости коэффициента поглощения $\psi_{экс}$ от площади парусности

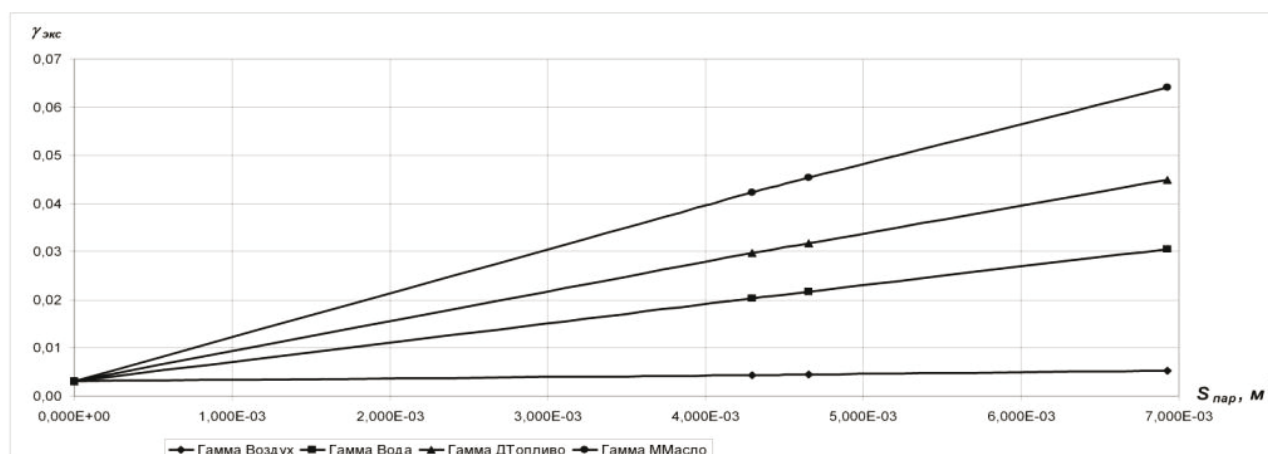


Рис. 10. График зависимости коэффициента внутреннего сопротивления $\gamma_{экс}$ от площади парусности

В графе "Вариант" (см. табл. 3) указаны варианты расположения груза на конце консоли (см. рис. 3) и соответствующие им (вариантам) площади парусности в графе "Площадь парусности".

Поясним основную идею выхода на "нулевую парусность".

Для получения величины периода T и декремента D при нулевой парусности (см. вариант 0 из табл. 3) была проведена аппроксимация трёх экспериментальных точек. Независимо от типа внешней среды, период и декремент, при нулевой парусности, явно сошлись к одной величине, а именно 0,52932 с и 1,00966 соответственно (см. табл. 3, вариант 0).

Численное значение коэффициента сопротивления $\gamma_{экс}^{нуль} = 0,00306$, полученного при нулевой парусности, попадает в известный табличный диапазон (см. табл. 1). Это, в свою очередь, подтверждает правильность экспериментальных данных, корректность проведённого эксперимента и справедливость идеи выхода на "нулевую парусность", а также указывает на тот факт, что коэффициент сопротивления (при нулевой парусности) найден именно для внутренней среды, а не для конструкции.



Таблица 3

Значения экспериментальных коэффициентов ($n_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\beta_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\psi_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$), полученных при колебаниях стальной консольной балки в воздухе, воде, дизельном топливе и машинном масле

Вариант	Площадь парусности S , м ²	Период T , с	Декремент D	Коэф. затухания $n_{\text{экс}}^{\Sigma}$, 1/с	Коэф. сопротивления в ММЭ $\beta_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\frac{\text{Н}}{\text{М}} \cdot \text{с}$	Коэф. поглощения $\psi_{\text{экс}}^{\Sigma}$	Коэф. сопротивления $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$
Колебания в вакууме							
0	0	0,52932	1,00966	0,01816	0,01790	0,01922	0,00306
Колебания в воздухе							
1	4,296E-3	0,46176	1,01394	0,02997	0,02955	0,02768	0,00441
2	4,652E-3	0,45616	1,01429	0,03110	0,03067	0,02838	0,00452
3	6,925E-3	0,42042	1,01655	0,03905	0,03851	0,03284	0,00523
Колебания в воде							
1	4,296E-3	0,38875	1,06590	0,16417	0,16188	0,12765	0,02032
2	4,652E-3	0,37710	1,07057	0,18082	0,17829	0,13637	0,02171
3	6,925E-3	0,30272	1,10033	0,31583	0,31141	0,19121	0,03043
Колебания в дизельном топливе							
1	4,296E-3	0,37636	1,09778	0,24789	0,24442	0,18659	0,02970
2	4,652E-3	0,36368	1,10509	0,27477	0,27092	0,19985	0,03181
3	6,925E-3	0,28274	1,15172	0,49960	0,49260	0,28251	0,04496
Колебания в машинном масле							
1	4,296E-3	0,35853	1,14206	0,37050	0,36531	0,26567	0,04228
2	4,652E-3	0,34437	1,15304	0,41350	0,40772	0,28480	0,04533
3	6,925E-3	0,25400	1,22309	0,79284	0,78174	0,40276	0,06410

Здесь в табл. 3 коэффициенты $n_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\beta_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\psi_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$ являются суммарными коэффициентами, содержащими в себе сопротивление внутренней среды (стали) и сопротивление внешней среды (или вакуума, или воздуха, или воды, или дизельного топлива, или машинного масла). Задача дальнейшего исследования заключается в разделении всех указанных составляющих сопротивления. Делается это следующим образом. Если считать, что внешнее сопротивление вакуума равно нулю, то тогда суммарные коэффициенты в строке "0" фактически являются коэффициентами только внутренней среды балки, т.е. в данном случае стали.

Разобьём коэффициенты на составляющие от внутреннего и внешнего сопротивления по примеру разбиения коэффициента сопротивления $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$ воздуха:

$\gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = \gamma_{\text{экс.вариант 0}}^{\Sigma} = 0,00306$ – коэффициент сопротивления от неупругого сопротивления внутренней среды балки (стали), считая, что вакуум не оказывает внешнего сопротивления;

$\gamma_{\text{экс.вариант 1}}^{\text{воздух}} = \gamma_{\text{экс.вариант 1}}^{\Sigma \text{воздух}} - \gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = 0,00441 - 0,00306 = 0,00135$ – коэффициент сопротивления от неупругого сопротивления воздушной среды (см. рис. 3, вариант 1 боковой поверхности балки и груза);

$\gamma_{\text{экс.вариант 2}}^{\text{воздух}} = \gamma_{\text{экс.вариант 2}}^{\Sigma \text{воздух}} - \gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = 0,00452 - 0,00306 = 0,00146$ – коэффициент сопротивления от неупругого сопротивления воздушной среды (см. рис. 3, вариант 2 боковой поверхности балки и груза);

$\gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\text{воздух}} = \gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\Sigma \text{воздух}} - \gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = 0,00523 - 0,00306 = 0,00217$ – коэффициент сопротивления от неупругого сопротивления воздушной среды (см. рис. 3, вариант 3 боковой поверхности балки и груза).

Поясним вычисления на рис. 11.

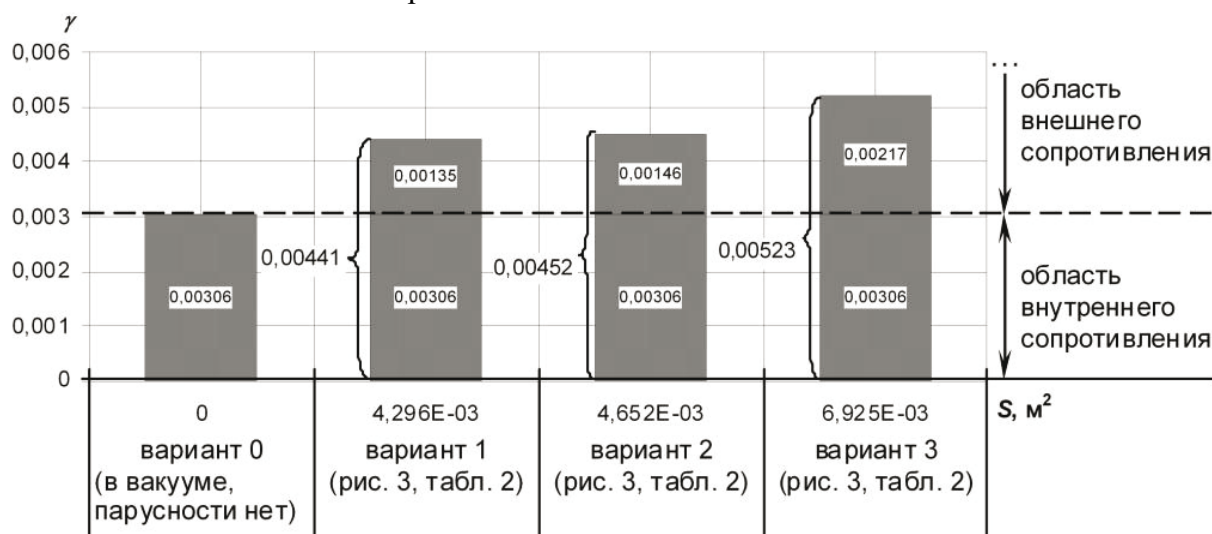


Рис. 11. К вычислению составляющих коэффициента сопротивления $\gamma_{\text{экс}}^{\text{воздух}}$

Если выполнить аналогичные вычисления для всех коэффициентов ($n_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\beta_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\psi_{\text{экс}}^{\Sigma}$, $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$) и всех внешних сред (вакуум, воздух, вода, дизельное топливо, машинное масло), то получим, таким образом, разделенные коэффициенты (например $\gamma_{\text{экс}}^{\text{вакуум}}$, $\gamma_{\text{экс}}^{\text{воздух}}$, $\gamma_{\text{экс}}^{\text{вода}}$, $\gamma_{\text{экс}}^{\text{диз.топливо}}$, $\gamma_{\text{экс}}^{\text{маш.масло}}$) отдельно для всех внешних сред без учета внутреннего сопротивления. Эти коэффициенты приведены в табл. 1. Коэффициент внутреннего сопротивления стали $\gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = \gamma_{\text{экс}}^{\text{вакуум}} = 0,00306$, также приведен в табл. 1. Отметим, что полученный коэффициент сопротивления для стали полностью совпадает со значениями этого коэффициента, полученными другими авторами [1, 3, 11].

Рассчитаем удельный коэффициент сопротивления в воздухе (по отношению к площади парусности):

$$\gamma_{\text{экс.вариант 1}}^{\text{уд.воздух}} = \frac{\gamma_{\text{экс.вариант 1}}^{\text{воздух}}}{S_{\text{вариант 1}}} = 0,31294 \frac{1}{\text{м}^2};$$

$$\gamma_{\text{экс.вариант 2}}^{\text{уд.воздух}} = \frac{\gamma_{\text{экс.вариант 2}}^{\text{воздух}}}{S_{\text{вариант 2}}} = 0,31329 \frac{1}{\text{м}^2};$$

$$\gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\text{уд.воздух}} = \frac{\gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\text{воздух}}}{S_{\text{вариант 3}}} = 0,31334 \frac{1}{\text{м}^2}.$$

Близость удельных коэффициентов позволяет заключить, что удельные коэффициенты не зависят от площади парусности. Это обстоятельство позволит в дальнейшем, не прибегая к эксперименту, использовать в расчетных моделях коэффициенты сопротивления внешней среды – домножая удельные коэффициенты на площадь парусности конструкции.

Возьмем среднее значение удельного коэффициента сопротивления:

$$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} = \frac{\gamma_{\text{экс.вариант 1}}^{\text{уд.воздух}} + \gamma_{\text{экс.вариант 2}}^{\text{уд.воздух}} + \gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\text{уд.воздух}}}{3} = 0,31319 \frac{1}{\text{м}^2}.$$



Проведём аналогичные вычисления для всех коэффициентов и всех внешних сред. Сведём эти показания в табл. 4. При этом для приведения удельных коэффициентов к одной размерности с самими коэффициентами, а также для удобства дальнейшего использования домножим их на площадь парусности S .

Например: $\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S = 0,31319 \cdot S$. А это, в свою очередь, и есть коэффициент сопротивления внешней среды, т.е. $\gamma_{\text{экс}}^{\text{воздух}} = \gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S = 0,31319 \cdot S$.

Таблица 4

Значения экспериментальных составляющих коэффициентов ($n_{\text{экс}}^{\text{внеш}} , \beta_{\text{экс}}^{\text{внеш}} , \psi_{\text{экс}}^{\text{внеш}} , \gamma_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$) от влияния внешней среды, полученных при колебаниях стальной консольной балки в воздухе, воде, дизельном топливе и машинном масле

Вариант	Площадь парусности $S, \text{м}^2$	Коэф. затухания $n_{\text{экс}}^{\text{внеш}}, \frac{1}{\text{с}}$	Коэф. сопротивления в ММЭ $\beta_{\text{экс}}^{\text{внеш}}, \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot \text{с}$	Коэф. поглощения $\psi_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$	Коэф. сопротивления $\gamma_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$
Воздух					
1	4,296E-3	0,01181	0,01165	0,00846	0,00135
2	4,652E-3	0,01294	0,01277	0,00916	0,00146
3	6,925E-3	0,02089	0,02060	0,01362	0,00217
Осреднённый удельный коэффициент, умноженный на площадь парусности S :		$n_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S$	$\beta_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S$	$\psi_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S$	$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S$
		$2,85026 \cdot S$	$2,81036 \cdot S$	$1,96776 \cdot S$	$0,31319 \cdot S$
Вода					
1	4,296E-3	0,14602	0,14397	0,10842	0,01726
2	4,652E-3	0,16267	0,16039	0,11715	0,01865
3	6,925E-3	0,29767	0,29350	0,17199	0,02737
Осреднённый удельный коэффициент, умноженный на площадь парусности S :		$n_{\text{экс}}^{\text{уд.вода}} \cdot S$	$\beta_{\text{экс}}^{\text{уд.вода}} \cdot S$	$\psi_{\text{экс}}^{\text{уд.вода}} \cdot S$	$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.вода}} \cdot S$
		$37,31305 \cdot S$	$36,79067 \cdot S$	$25,08588 \cdot S$	$3,99266 \cdot S$
Дизельное топливо					
1	4,296E-3	0,22973	0,22652	0,16737	0,02664
2	4,652E-3	0,25661	0,25302	0,18063	0,02875
3	6,925E-3	0,48144	0,47470	0,26329	0,04191
Осреднённый удельный коэффициент, умноженный на площадь парусности S :		$n_{\text{экс}}^{\text{уд.диз.топ}} \cdot S$	$\beta_{\text{экс}}^{\text{уд.диз.топ}} \cdot S$	$\psi_{\text{экс}}^{\text{уд.диз.топ}} \cdot S$	$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.диз.топ}} \cdot S$
		$59,38559 \cdot S$	$58,55419 \cdot S$	$38,60229 \cdot S$	$6,14393 \cdot S$
Машинное масло					
1	4,296E-3	0,35234	0,76384	0,24645	0,03922
2	4,652E-3	0,39535	0,38981	0,26558	0,04227
3	6,925E-3	0,77469	0,34741	0,38354	0,06104
Осреднённый удельный коэффициент, умноженный на площадь парусности S :		$n_{\text{экс}}^{\text{уд.м.масло}} \cdot S$	$\beta_{\text{экс}}^{\text{уд.м.масло}} \cdot S$	$\psi_{\text{экс}}^{\text{уд.м.масло}} \cdot S$	$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.м.масло}} \cdot S$
		$92,95475 \cdot S$	$91,65338 \cdot S$	$56,61249 \cdot S$	$9,01042 \cdot S$

Выводы

• В ходе экспериментальных исследований, кроме коэффициентов внутреннего сопротивления, были получены коэффициенты внешнего сопротивления для некоторых видов

внешних сред (воздух, вода, дизельное топливо и машинное масло). Выбор указанных сред связан с тем, что они встречаются в задачах о колебаниях судовых конструкций.

- Получены удельные коэффициенты, позволяющие в дальнейшем, не прибегая к эксперименту, использовать в расчетных моделях коэффициенты сопротивления внешней среды – домножая удельные коэффициенты на площадь парусности конструкции.

- Полученный экспериментальный коэффициент сопротивления для стали полностью совпадает со значениями этого коэффициента, полученными другими авторами [1, 3, 11]. Это подтверждает корректность проведенных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антоненко, С. В. Вибрация судов: учеб. пособие / С. В. Антоненко – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 148 с.
2. Пановко, Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я. Г. Пановко – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 196 с.
3. Постнов, В. А. Вибрация корабля / В. А. Постнов, В. С. Калинин, Д. М. Ростовцев – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
4. Постнов, В. А. Метод модуль-элементов в расчетах судовых конструкций / В. А. Постнов, Н. А. Тарануха – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.
5. Постнов, В. А. Оценка напряженно-деформированного состояния корпуса судна методом модуль-элементов / В. А. Постнов, Н. А. Тарануха // Судостроение. – 1983. – № 5. – С. 5-8.
6. Прочность, устойчивость, колебания: справочник. В 3 т. Т. 3 / под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 464 с.
7. Сборовский, А. К. Вибрация судов с корпусами из стеклопластиков / А. К. Сборовский, Ю. А. Никольский, В. Д. Попов – Л.: Судостроение, 1967 – 191 с.
8. Сорокин, Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е. С. Сорокин – М.: Госстройиздат, 1960. – 131 с.
9. Сорокин, Е. С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания / Е.С. Сорокин // Исследования по динамике сооружений. – М.: Госстройиздат, 1951. – С. 34-41.
10. Тарануха, Н. А. Динамика «неправильных» оболочек / Н. А. Тарануха, Г. С. Лейзерович. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 423 с.
11. Тарануха, Н. А. Математическое и экспериментальное моделирование колебаний стержневых судовых конструкций с учётом сопротивления внешней среды различной плотности / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин, И. Н. Журбина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. № IV-1(4). – С. 81-91.
12. Тарануха, Н. А. Математическое моделирование колебаний сложных оболочек. Гидроупругая постановка с учетом сопротивления / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 253 с.
13. Тарануха, Н. А. Метод модуль-элементов в расчетах прочности тонкостенных конструкций / Н.А. Тарануха // Труды ЛКИ: Механика и прочность судовых конструкций. – 1980. – С. 113-117.
14. Тарануха, Н. А. Новые решения в динамике "неправильных" оболочек / Н. А. Тарануха, Г. С. Лейзерович. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 203 с.
15. Тарануха, Н. А. Численное моделирование прочности и гидродинамики океанотехники / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин, С. Д. Чижиумов, И. Н. Журбина. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 340 с.
16. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко – М.: Наука, 1967. – 444 с.
17. Яблонский, А. А. Курс теории колебаний / А. А. Яблонский, С. С. Норейко – М.: Высшая школа, 1966. – 255 с.
18. <http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/MS-CNastran.aspx>

Афанасьева И. В., Анисимов В. В.
I. V. Afanaseva, V. V. Anisimov

**ОЦЕНКА КАНЦЕРОГЕННОГО РИСКА ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ГРУПП
ООО «РН-КОМСОМОЛЬСКОГО НПЗ»**

**CARCINOMA RISK ASSESSMENT FOR GROUPS OF WORKERS AT KOMSOMOLSKY
OIL REFINERY PLANT**



Афанасьева Ирина Викторовна – аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-909-845-38-95. E-mail: bgd4@mail.ru.

Ms. Irina V. Afanaseva – PhD candidate, Department of Health and Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, city of Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin avenue; 8-909-845-38-95. E-mail: bgd4@mail.ru.



Анисимов Виктор Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-909-860-17-36. E-mail: viktor_anisimov@mail.ru.

Mr. Viktor V. Anisimov – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Health and Safety, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, city of Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin avenue; 8-909-860-17-36. E-mail: viktor_anisimov@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрена процедура оценки канцерогенного риска для здоровья работников Комсомольского нефтеперерабатывающего завода; представлены три варианта сценариев поступления канцерогенных веществ в организм работников; рассчитаны значения суточных доз и канцерогенных рисков; на основе расчетных данных выделены профессиональные группы.

Summary. The paper considers a procedure for carcinoma risk assessment for workers' health at the Komsomolsk Oil Refinery Plant: three scenarios for oncogenic substances' entrance into human organism are offered; daily intake and oncorisks are estimated; groups of workers are identified on the basis of rated data.

Ключевые слова: оценка риска, канцерогенное вещество, среда, суточная доза, канцерогенный риск, персонал, профессиональная группа.

Key words: risk assessment, oncogenic substance, environment, daily intake, oncorisk, personnel, group of personnel.

УДК 613.630

Введение

Объект исследования – ООО «РН-Комсомольский НПЗ», крупный развивающийся нефтеперерабатывающий завод, является ведущим предприятием компании «РОСНЕФТЬ» и включает в себя 14 цехов с численностью персонала 1348 человек (из них 293 женщины или 22 % персонала завода и 1055 мужчин или 78 % персонала).

Целью данной статьи является оценка канцерогенного риска для профессиональных групп нефтеперерабатывающего завода.

Воздействию химических веществ на территории предприятия подвержены все работники: как персонал основного производства, так и вспомогательных цехов и подразделений, чья работа связана с кратковременным посещением технологических цехов.

Химические вещества могут поступать в организм работников несколькими путями: с вдыхаемым воздухом, через кожные покровы, с продуктами питания и питьевой водой. Для рассматриваемой нами группы, персонала завода, учтен только один путь поступления – ингаляционный. Предполагается, что значительное количество вредных веществ поступает в организм вследствие вдыхания загрязненного воздуха, а их количество зависит от того, какая среда окружает человека, т.е. от концентраций веществ в воздухе.

Среда обитания каждого сотрудника НПЗ была условно поделена на три подсреды: производственно-технологическую, производственную и городскую. Основным критерий деления – концентрация веществ в этих средах.

Производственно-технологическая среда является максимально загрязненной – это территории технологических цехов и установок. Производственная среда – менее загрязненная среда внутри и вне административных зданий, а также на территории завода. Городская среда, в свою очередь, представляет собой совмещение бытовой и окружающей сред на территории г. Комсомольска-на-Амуре.

Такое деление на среды сделано с целью уточнения доз, поступающих в организм веществ и соответственно более точной оценки риска для здоровья работников. Стоит отметить, что существующая система оценки условий труда по классам не позволяет проводить подобных оценок.

Подобные исследования ранее на Комсомольском НПЗ не проводились.

Методика проведения исследования

Исследование проведено в соответствии с требованиями Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду».

По данным городских постов наблюдений, аттестации рабочих мест по условиям труда [2] и проекта предельно-допустимых выбросов КНПЗ [3], из 66 веществ, присутствующих в воздушной среде рассматриваемых площадок, девять были отобраны как канцерогенные (относящиеся к группам 1, 2А и 2В по классификации МАИР): это три вещества с доказанным канцерогенным действием (хром шестивалентный, бензол, сажа) и шесть веществ с вероятно канцерогенным действием двух видов (бензо(а)пирен, формальдегид, свинец, трихлорэтилен, бензин, углерод черный).

Расчеты поступления веществ и оценки риска были проведены по трем сценариям. Сценарий № 1 предполагал рассмотрение только производственно-технологической среды, в его основе были заложены данные о концентрациях веществ из аттестации рабочих мест по условиям труда [2], предварительно осредненные для 8-часового рабочего дня.

В сценарии № 2 также рассматривается среда завода, но теперь она условно поделена на два временных промежутка: это время нахождения в производственно-технологической среде и время нахождения в других условиях. Под «другими условиями» следует понимать нахождение в кабинетах, на открытом воздухе и т.д. – в производственной среде, где в ходе аттестации рабочих мест замеры не проводились, поэтому сведения о концентрациях канцерогенных веществ в этих зонах были выбраны по результатам рассеивания проекта предельно-допустимых выбросов предприятия [3].

Вариант расчета № 2 создан для уточнения количества канцерогенных веществ, поступающих в организм работников за все время нахождения на территории завода.

Сценарий № 3 является, в свою очередь, уточнением ранее рассмотренного сценария № 2 и учитывает не только те дозы, которые получает персонал на территории завода, но и те, которые он получает в городской среде. Причем было сделано допущение, что городская среда для каждого работника приблизительно одна и та же. Это связано, прежде всего, с не-



достатком данных и невозможностью зонирования территории города по уровню загрязнения. Поэтому данные о концентрациях с городских постов наблюдения были усреднены.

Результаты исследования

Для оценки канцерогенных рисков использованы средние суточные дозы, усредненные с учетом ожидаемой средней продолжительности жизни человека в 70 лет. По данным формулам рассчитаны доза каждого вещества и соответствующий канцерогенный риск:

$$LADD = [C \cdot IR \cdot ED \cdot EF] / [BW \cdot AT \cdot 365], \quad (1)$$

$$CR = LADD \cdot SF, \quad (2)$$

где LADD – средняя суточная доза вещества, мг/(кг·день); C – концентрация вещества в загрязненной среде, мг/м³; IR – скорость поступления воздействующей среды (в данном случае воздуха), м³/день; ED – продолжительность воздействия, лет; EF – частота воздействия, дней/год; BW – масса тела человека, кг; AT – период усреднения экспозиции, лет; 365 – число дней в году; CR – индивидуальный канцерогенный риск; SF – фактор наклона, (кг·день)/мг.

Скорости экспозиции приняты как: IR = 0,018 м³/(кг·ч) – при активной деятельности для производственных сред и IR = 0,006 м³/(кг·ч) во время отдыха при нахождении в городской среде. Продолжительность воздействия (ED) условно принята за один год. Частота экспозиции для производственной среды – 250 дней в году, для городской – 350. Масса тела человека (BW) согласно рекомендациям ВОЗ принята равной 70 кг. Период усреднения (AT) для канцерогенных веществ составляет 70 лет. Значения факторов наклона (SF) для ингаляционного воздействия по каждому канцерогену выбраны по справочной таблице 2.4 Приложения № 2 Р 2.1.10.1920-04 [4].

Суммарный канцерогенный риск рассчитан по формуле

$$CR = \sum CR_j, \quad (3)$$

где CR_j – канцерогенный риск для j-го канцерогенного вещества.

В табл. 1-3 в качестве примера приведены результаты расчетов доз и рисков для рабочего места машиниста технологических насосов 4-го разряда блока изомеризации цеха № 1 (РМ 30-1) по каждому из трех сценариев.

Индексы 1, 2 и 3 отвечают за принадлежность показателей к производственно-технологической, производственной и городской средам соответственно.

Такие канцерогены, как углерод черный, сажа и свинец, в расчетах по данному рабочему месту не участвуют по причине отсутствия данных об их концентрациях в рассматриваемых средах.

Таблица 1

Пример расчета CR по сценарию № 1

Показатели		Канцерогенные вещества		
		Бензин	Трихлорэтилен	Бензол
C, мг/м ³	C1	118,910	11	0,100
t, ч	t1	7,2	0,8	7,2
LADD, мг/(кг·день)	LADD1	4,524·10 ⁻²	5,166·10 ⁻⁵	3,804·10 ⁻⁵
	ΣLADD	4,524·10 ⁻²	5,166·10 ⁻⁵	3,804·10 ⁻⁵
CR _j		1,583·10 ⁻³	3,255·10 ⁻⁷	1,027·10 ⁻⁶
CR		1,585·10 ⁻³		

Таблица 2

Пример расчета CR по сценарию № 2

Показатели		Канцерогенные вещества				
		Бензин	Бензол	Хром (VI)	Трихлорэтилен	Бензо(а)пирен
C, мг/м ³	C1	118,910	0,100	0	11	0
	C2	0,050	0,150	$1,845 \cdot 10^{-5}$	0	$6,000 \cdot 10^{-10}$
t, ч	t1	7,2	7,2	0	0,8	0
	t2	0,8	0,8	8	7,2	8
LADD, мг/(кг·день)	LADD1	$4,524 \cdot 10^{-2}$	$3,804 \cdot 10^{-5}$	0	$5,166 \cdot 10^{-5}$	0
	LADD2	$2,348 \cdot 10^{-7}$	$7,045 \cdot 10^{-7}$	$8,665 \cdot 10^{-9}$	0	$2,818 \cdot 10^{-13}$
	Σ LADD	$4,524 \cdot 10^{-2}$	$3,875 \cdot 10^{-5}$	$8,665 \cdot 10^{-9}$	$5,166 \cdot 10^{-5}$	$2,818 \cdot 10^{-13}$
CRj		$1,583 \cdot 10^{-3}$	$1,046 \cdot 10^{-6}$	$3,639 \cdot 10^{-7}$	$3,255 \cdot 10^{-7}$	$1,099 \cdot 10^{-12}$
CR		$1,585 \cdot 10^{-3}$				

Таблица 3

Пример расчета CR по сценарию № 3

Показатели		Канцерогенные вещества					
		Бензин	Формальдегид	Хром (VI)	Бензол	Трихлорэтилен	Бензо(а)пирен
C, мг/м ³	C1	118,910	0	0	0,100	11	0
	C2	0,050	0	$1,845 \cdot 10^{-5}$	0,150	0	$6,000 \cdot 10^{-10}$
	C3	0	$1,189 \cdot 10^{-2}$	$2,630 \cdot 10^{-4}$	0	0	$2,910 \cdot 10^{-6}$
t, ч	t1	7,2	0	0	7,2	0,8	0
	t2	0,8	8	8	0,8	7,2	8
	t3	16	16	16	16	16	16
LADD, мг/(кг·день)	LADD1	$4,524 \cdot 10^{-2}$	0	0	$3,804 \cdot 10^{-5}$	$5,166 \cdot 10^{-5}$	0
	LADD2	$2,348 \cdot 10^{-7}$	0	$8,665 \cdot 10^{-9}$	$7,045 \cdot 10^{-7}$	0	$2,818 \cdot 10^{-13}$
	LADD3	0	$7,445 \cdot 10^{-6}$	$1,647 \cdot 10^{-7}$	0	0	$1,822 \cdot 10^{-9}$
	Σ LADD	$4,524 \cdot 10^{-2}$	$7,445 \cdot 10^{-6}$	$1,734 \cdot 10^{-7}$	$3,875 \cdot 10^{-5}$	$5,166 \cdot 10^{-5}$	$1,823 \cdot 10^{-9}$
CRj		$1,583 \cdot 10^{-3}$	$2,903 \cdot 10^{-5}$	$7,281 \cdot 10^{-6}$	$1,046 \cdot 10^{-6}$	$3,255 \cdot 10^{-7}$	$7,108 \cdot 10^{-9}$
CR		$1,693 \cdot 10^{-3}$					

В качестве примера на рис. 1 представлено процентное соотношение вкладов веществ в итоговое значение CR по сценарию № 3.

Результаты расчетов показали, что суммарный риск повреждения здоровья для машиниста технологических насосов 4-го разряда блока изомеризации при стаже работы всего один год превышает $1 \cdot 10^{-3}$ при любом сценарии. Такой уровень риска считается неприемлемым для профессиональных групп.

Максимальный вклад в каждом случае вносит бензин, значение риска по которому также является неприемлемым. По остальным веществам расчетные значения рисков намного ниже и не попадают в область неприемлемых значений.

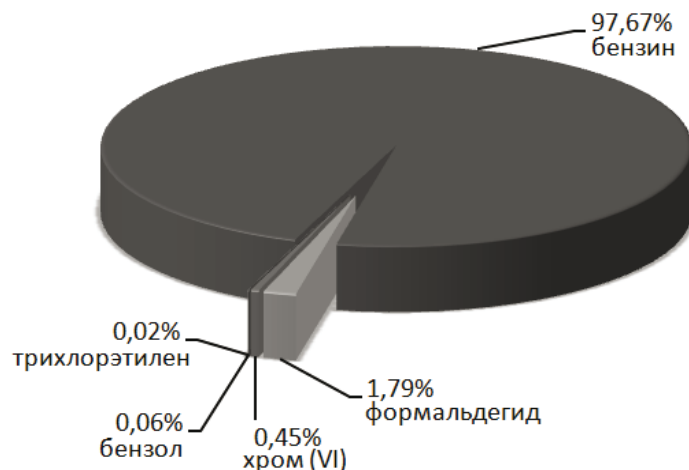


Рис. 1. Вклады в итоговое значение риска (сценарий № 3)

Сравнивая сценарии расчетов, можно сделать вывод, что первые два сценария дают приблизительно одинаковые результаты, но сценарий № 2 учитывает большее количество веществ и, следовательно, дает наиболее полное представление о дозах веществ, поступающих в организм работников за рабочую смену.

Второй сценарий, в отличие от сценария № 3, не учитывает те дозы веществ, которые люди получают в городской среде. Поэтому сценарий № 3 представляется наиболее адекватным, так как позволяет учесть влияние различных по своим характеристикам сред, в которых находится персонал предприятия в течение дня.

Исходя из полученных данных третьего варианта расчетов, внутри каждого цеха были отобраны рабочие места с приблизительно одинаковыми значениями риска. На основе некоторых выборок были сформированы отдельные профессиональные группы, остальные были объединены на уровне цехов или объединены с другими цехами в более крупные группы.

В табл. 4 представлены результаты расчетов канцерогенных рисков (их усредненные значения) по выделенным 20 профессиональным группам согласно сценарию № 3. Код каждой группы содержит цифру, определяющую принадлежность к определенному цеху. Буквенной аббревиатурой обозначены внутрицеховые подразделения или технологические установки.

Таким образом, в ходе исследования было выявлено, что максимальному риску повреждения здоровья от воздействия канцерогенных веществ и, значит, максимальному риску возникновения онкологических заболеваний подвергаются персонал установки изомеризации, каталитического риформинга (цех № 1), персонал цеха № 3 и отдельная профессиональная группа заводской лаборатории (цех № 5).

С учетом того, что расчеты проводились для стажа работы в один год, две группы людей оказались в области неприемлемого риска – G(И-1) и G(XA-5), что свидетельствует о недостаточности мер, принимаемых для обеспечения безопасности этих групп. Наличие канцерогенных веществ в воздухе рабочей зоны, в первую очередь, свидетельствует о несовершенстве технологического процесса, начиная с работы вентиляции и заканчивая самой технологией.

Обсуждение результатов

В качестве основных источников неопределенности этапа идентификации опасности можно выделить:

- неполные сведения о веществах, присутствующих в рабочей зоне, которые не были учтены и замерены при аттестации рабочих мест по условиям труда;

- отсутствие данных о потребляемых продуктах питания, накожном воздействии и, следовательно, невозможность комплексного рассмотрения всех путей поступления веществ в организм человека;

- использование в расчетах одинакового времени воздействия в один год из-за отсутствия точных данных о периоде взросления и стаже работы отдельно взятого сотрудника предприятия.

Таблица 4

Результаты расчета CR_{cp} по профгруппам

№ п/п	Код группы	Описание группы	CR_{cp}
1	G(И-1)	Персонал установки изомеризации цеха № 1	$1,434 \cdot 10^{-3}$
2	G(XA-5)	Персонал химического анализа цеха № 5	$1,065 \cdot 10^{-3}$
3	G(УКР-1)	Персонал установки УКР цеха № 1	$1,595 \cdot 10^{-4}$
4	G(3)	Персонал цеха № 3	$1,015 \cdot 10^{-4}$
5	G(4)	Персонал цеха № 4	$8,145 \cdot 10^{-5}$
6	G(P-1)	Персонал ремонтной группы цеха № 1	$7,060 \cdot 10^{-5}$
7	G(15)	Персонал цеха № 15	$5,087 \cdot 10^{-5}$
8	G(ЛЭБ-5)	Персонал лаборатории экологич. безопасности цеха № 5	$5,047 \cdot 10^{-5}$
9	G(8)	Персонал цеха № 8	$4,977 \cdot 10^{-5}$
10	G(9)	Персонал цеха № 9	$4,967 \cdot 10^{-5}$
11	G(Y-5)	Управление цеха № 5	$4,766 \cdot 10^{-5}$
12	G(Y-1)	Управление цеха № 1	$4,689 \cdot 10^{-5}$
13	G(ГСО-14)	Персонал газоспасательного отряда цеха № 14	$4,658 \cdot 10^{-5}$
14	G(11)	Персонал цеха № 11	$4,549 \cdot 10^{-5}$
15	G(12)	Персонал цеха № 12	$3,687 \cdot 10^{-5}$
16	G(АВТ-1,А)	Персонал установок ЭЛОУ-АВТ-2,3 цеха № 1, азотно-воздушной станции	$3,632 \cdot 10^{-5}$
17	G(7)	Персонал цеха № 7	$3,613 \cdot 10^{-5}$
18	G(ЗП-14)	Персонал здравпункта цеха № 14	$3,603 \cdot 10^{-5}$
19	G(2,6,22,33,46)	Персонал цехов № 2, 6, 22, 33, 46	$3,596 \cdot 10^{-5}$
20	G(УТЦ-14)	Персонал учебно-тренировочного центра цеха № 14	$3,370 \cdot 10^{-5}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду».
2. Р 2.2.2006-05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда».
3. ГН 1.1.725-98 «Перечень веществ, продуктов, производственных процессов, бытовых и природных факторов, канцерогенных для человека».
4. Проект аттестации рабочих мест по условиям труда в ООО «РН-Комсомольский НПЗ», 2009 г. В 46 т.
5. Проект предельно-допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух ООО «РН-Комсомольского НПЗ», 2009 г. В 2 т.



Рубцов Ю. В., Рудько С. В., Коннова Г. В.

Y. V. Rubtsov, S. V. Rudko, G. V. Konnova

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ НИЗКОКАЧЕСТВЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ НА ЩЕПУ РУБИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ В США И РОССИИ

TECHNOLOGY OF PROCESSING LOW QUALITY TIMBER FOR PRODUCTION OF PULPCHIPS USING WOODCHIPPER MACHINES – IN THE USA AND RUSSIA

Рубцов Юрий Васильевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры «ЭПиАПУ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vckgpmo@knastu.ru.

Mr. Yury V. Rubtsov – Applicant for PhD in Engineering, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), Department of Electric Drive and Automation of Industrial Plants. E-mail: vckgpmo@knastu.ru.

Коннова Галина Витальевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «МАХП» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vckgpmo@knastu.ru.

Ms. Galina V. Konnova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vckgpmo@knastu.ru.

Рудько Степан Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «ПЭ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: aureol@inbox.ru.

Mr. Stepan V. Rudko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Applied Economics, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: aureol@inbox.ru.

Аннотация. Апробированы методы и средства безотходного производственного процесса технологической щепы для целлюлозно-бумажного производства, усовершенствованы дисковые рубительные машины, получен значительный экономический эффект.

Summary. The methods and facilities for non-waste production of pulp chips for pulp-and-paper industry have been tested and approved; cutter-type chippers have been improved, and a significant economic effect attained.

Ключевые слова: отходы, технология, низкокачественная древесина, технологическая щепка, сколы, отщепы, окорочные барабаны, сортировки, рубительные машины.

Key words: cutting waste, technology, low-quality wood, pulp chips, sliverings, flakes, debarkers, cutter-type chipper, separators.

УДК 621. 891

Леса на территории России размещены неравномерно. Наибольшие запасы леса находятся в Восточной Сибири и северной части Забайкалья. Общий годичный прирост леса составляет около одного миллиарда кубометров, а производство лесной продукции – в десять раз меньше, чем в странах Европейского экономического сообщества, США, Канаде, Финляндии. Главной причиной этого является слабое развитие лесного машиностроения, отсутствие глубокой переработки низкокачественной древесины на плитное, целлюлозно-бумажное производство, использование древесных отходов и целых деревьев на технологическую щепу. За последние годы в России заготовка и переработка древесины сократилась на 65 % и составила 93,7 млн м³.

В этот период в США заготавливают около 400 млн м³ древесины в год, в том числе пиловочника 210 млн м³, балансового сырья более 120 млн м³ в круглом виде и еще 70 млн м³ в виде щепы из отходов лесопиления и деревообработки. В США одним из путей решения проблемы полного использования древесного сырья является измельчение целых деревьев в щепу с использованием ее для производства целлюлозы и других волокнистых полуфабрикатов. Технология переработки организуется следующим образом. Валка деревьев производится моторными пилами или валочно-пакетирующими машинами. При ручной валке на трелевке используют преимущественно чокерные тракторы, при механизированной – тракторы с пачковыми захватами. Передвижные установки барабанного типа Morbark Chipharvester со стрелой-манипулятором для переработки в щепу целых деревьев применяются в лесосеках, недоступных для освоения обычными методами трелевки. Щепу перевозят в закрытых щеповозах с длиной фургона 9...15 м. Толстомерная комлевая часть дерева разделяется на пиловочник и складывается в штабеля с перевозкой лесовозами. Основные преимущества заготовки щепы из целых деревьев следующие: увеличение объема заготовок древесины, возможность заготовки любого тонкомера, оставление вырубленной лесосеки в лучшем состоянии, подготовка почвы для лесохозяйственных работ, затраты на лесовозобновительные работы сокращаются на 30 %, снижается стоимость лесозаготовок и лесовозобновительных работ и механизмируется производственный процесс.

Основным фактором, сдерживающим использование щепы из целых деревьев, является ее низкое качество: повышенное содержание коры, тонких веточек, песка и других загрязнений. Это снижает качество вырабатываемой продукции и вызывает затруднения в целлюлозном производстве. Сортировки не очень пригодны для сортирования щепы из целых деревьев, содержащих гниль и кору. Они забивают отверстия сортировок и уменьшают их производительность. Нежелательными примесями в щепе из целых деревьев являются листья, хвоя, а также длинные тонкие веточки. Последние образуют сколы и отщепы, это приводит к зависанию щепы в бункерах, к движению щепы в пневмотранспортных системах и питателях варочных установок. При кучевом хранении щепы с листьями, корой и минеральными загрязнениями способствует интенсивному разогреву. При варке состав древесины ствольной части и веточек по структуре волокна и химическому составу существенно отличается. Длина волокна уменьшается, повышается содержание золы и экстрактивных веществ, наблюдается зависание щепы в бункерах и на выходе из питателя варочных котлов. После проведения испытаний был сделан вывод о том, что количество щепы из целых деревьев в общем объеме балансовой древесины должен составлять не более 30 % [1].

В России переработка низкокачественной древесины на щепу проводилась на целлюлозно-бумажном комбинате г. Красноярск Сибирского Федерального округа. Щепу была выработана из балансов низкокачественной древесины. Исходным сырьем являлись дрова хвойных пород длиной 4...6,5 м – 49 %, сплавные обломки – 11 %, отходы от раскряжевки хлыстов – 10 %, прошедшие разделку и окорку в барабанах и станках. Сырье распределялось на три самостоятельных потока: прямой поток, поток на базе окорочных барабанов и поток окорочного станка. Работа потоков независимая, но и не исключала заменяемость, так как подача сырья на все технологические потоки осуществлялась одним главным транспортером.

Технологические процессы по потокам осуществляются следующим образом. Вся низкокачественная древесина с главного транспортера автоматическими сбрасывателями подается на поперечный четырехцепной транспортер с механизмом поштучной выдачи. Поперечный транспортер обеспечивает межоперационный запас и поштучную выдачу бревен на продольный главный транспортер, с помощью которого производится распределение по потокам. На поперечный транспортер поступает также сырье, подвозимое пучковозом, который укладывает пачки бревен в механизм поштучной выдачи. Управление всеми механизмами для приема и распределения по технологическим потокам осуществляет оператор.

На прямом потоке бревна, не имеющие коры и гнили, подаются на главный транспортер. В потоке имеется автоматический раскряжевочный агрегат с диаметром пильного диска 1500 мм для распиловки кривых бревен на более короткие длины.

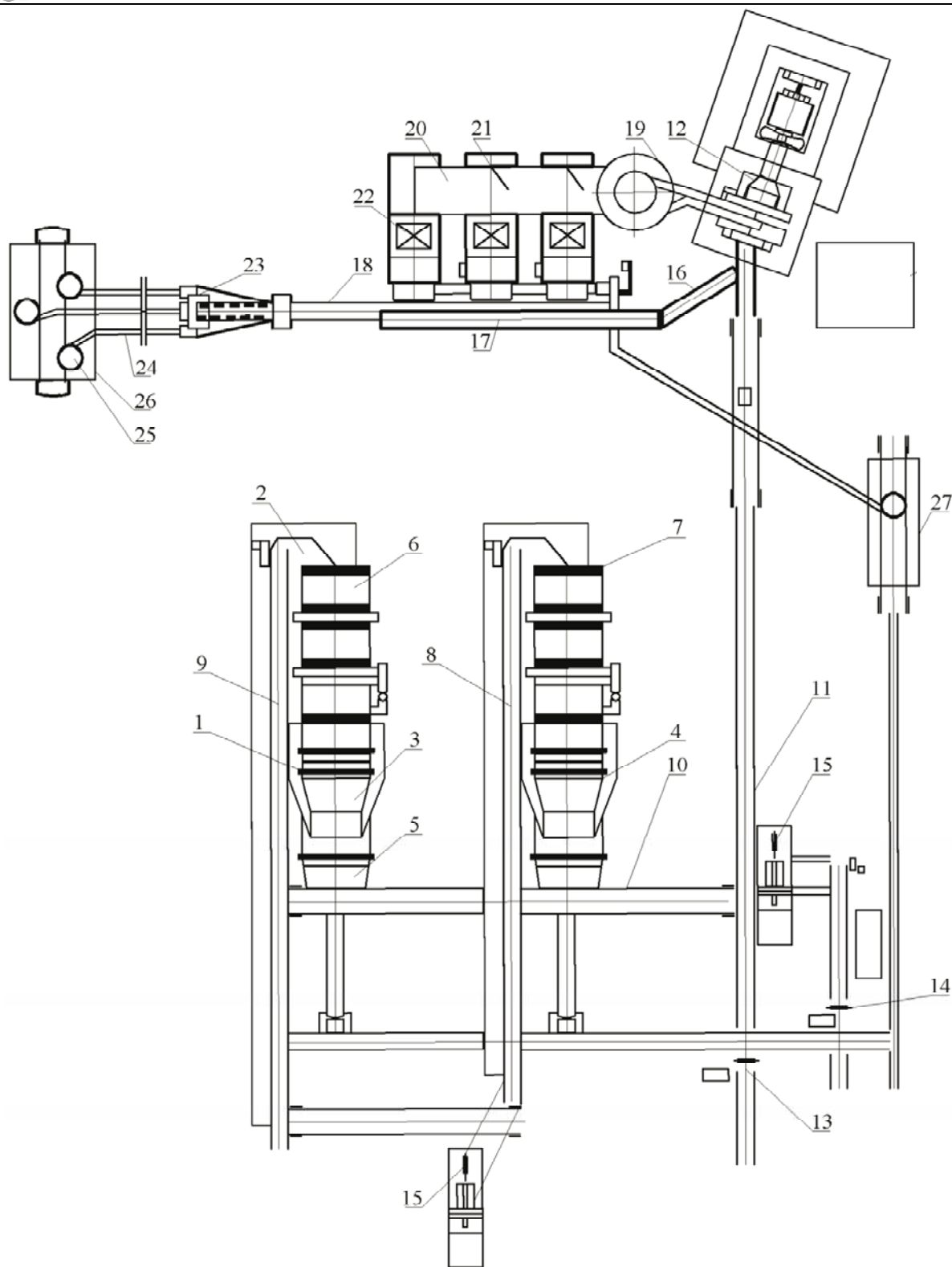


Рис. 1. Технология переработки низкокачественной древесины в щепу рубительной машиной

Технологический процесс на базе окорочных барабанов основан на принципе действия гравитационных сил. При вращении барабана 1 (рис. 1) поленья медленно перемещаются к разгрузочному окну 2. Окоренные поленья из барабана через выгрузочное окно 3, сечение которого регулируется подвижным шибером, ссыпаются по наклонной площадке 4 на

ленточный транспортер, а затем через площадку поступают на конвейер 5. Плохо окоренные поленья после выхода из барабанов 6 и 7 сбрасываются на транспортеры 8 и 9 для возврата их на повторную обработку в окорочный барабан. Окоренные поленья поступают на транспортер 10 и далее на главный цепной транспортер 11. После подачи поленьев на главный транспортер и резания поленьев в рубительной машине 12 на сортировках производится отсев измельченной гнили и коры, и мелкой фракции щепы. Помощник оператора следит за загрузкой окорочных барабанов, качеством окорки и выгрузкой колотых балансов.

Технологический процесс на базе окорочного станка. Неокоренные бревна диаметром до 40 см и кривизной до 3 % с необрубленными заподлицо сучьями сбрасывателем бревен подаются на поперечный транспортер, с которого направляются в окорочный станок. После окорки стволы с гнилью направляются по транспортеру к циркулярной автоматической пиле для разделки на чураки, а сплавные обломки подаются на прямой главный конвейер 11 в рубительную машину. На циркулярной пиле 13, 14 производится распиловка на чураки длиной 1,2 м, затем чураки транспортером подаются на линию, на которой производится раскалывание чураков 15 и выколка гнили. Колотый баланс по лотку поступает на главный транспортер 11 технологического процесса с прямой подачей в рубительную машину. Управление механизмами окорочного станка производится с пульта оператора, а управление автоматической пилой и раскалыванием чураков производится с линий разделки бревен.

Технология производства щепы включает: рубительную машину 12 по переработке низкокачественной древесины, ленточный конвейер сортировки щепы, ленточный конвейер кондиционной щепы, скребковый транспортер 16 для крупной щепы, скребковый транспортер 17 для подачи крупной фракции на доизмельчение, ленточный конвейер 18 кондиционной щепы. Щепы от рубительной машины 12 по щепопроводу через циклон-гаситель 19 поступает на распределительный ленточный конвейер 20. Распределение щепы по сортировкам осуществляется с помощью плужковых сбрасывателей 21, устанавливаемых над ленточным конвейером и равномерно распределяющих щепу на три сортировки 22. При необходимости распределение щепы по сортировкам можно изменить путем передвижения плужковых сбрасывателей, что позволит производить профилактический и мелкий ремонт сортировок поочередно.

Кондиционная щепа поступает на ленточный конвейер 18, который подает ее на транспортные средства склада готовой продукции. Крупная щепа скребковыми транспортерами подается в патрон рубительной машины для повторного измельчения. Отсев щепы скребковыми транспортерами направляется в пневмотранспортную систему для перемещения в бункер. Управление механизмами производства щепы осуществляется с пульта управления рубительной машины в операторском помещении. Обслуживают участок три человека: оператор рубительной машины, помощник оператора по подаче сырья в рубительную машину, оператор по сортировке щепы на фракции. Оператору на пульт управления вынесено управление транспортными средствами для подачи щепы в бункер и транспортировкой отходов.

Начало работы механизмов осуществляется от конечной фазы производства щепы: вентилятор подачи кондиционной щепы, шлюзовые затворы, ленточный конвейер, скребковый транспортер, заблокированный с рубительной машиной, скребковый транспортер, сортировки щепы, ленточный конвейер, рубительная машина, ленточный конвейер подачи баланса в рубительную машину. Остановка механизмов по выработке щепы осуществляется в обратной последовательности.

Технологический процесс готовой продукции состоит в следующем: кондиционная щепа распределяется на три шлюзовых затвора 23. Шлюзовые затворы производят равномерную загрузку щепопроводов 24, по которым с помощью мощных вентиляторов щепа через циклон 25 поступает в бункер 26 готовой продукции. Бункер оборудован вибраторами и ленточными питателями для выгрузки щепы из бункера. Щеповозами вместимостью 20 м³ поставляют готовую продукцию на местный целлюлозно-бумажный комбинат. Отходы от

всех станков и оборудования системой ленточных и скребковых транспортеров собираются в специальную бункерную галерею 27, где имеются емкости для мелкой фракции. Толстая стружка, снимаемая при окорке окорочными станками, измельченная кора и гниль из-под корообдирочных барабанов выносятся ленточным конвейером и перемещается в бункер. Управление комплексом осуществляется старшим оператором из помещения.

На рис. 2 показана принципиальная схема щепообразования механизма резания рубительной машины. Рубительная машина содержит основание, привод (на рисунке не показаны), ножевой диск 1, несущий на себе ножи 2 и транспортные лопатки 3. В области ножей в диске 1 выполнены подножевые отверстия 4. Диск размещен внутри кожуха 5, имеющего загрузочное устройство (патрон) 6 и щепоотводящий патрубок 7. Задняя стенка 8 кожуха 5 отстоит от задней поверхности 9 ножевого диска на расстоянии, достаточном для размещения криволинейной пластины 10. Пластина установлена на задней поверхности ножевого диска в зоне подножевого отверстия. Накладная пластина 10 образует с задней поверхностью ножевого диска угол α , обеспечивающий отражение щепы 11 после взаимодействия (движение щепы показано стрелкой) с пластиной в зоне 12 захвата щепы лопаткой 3.

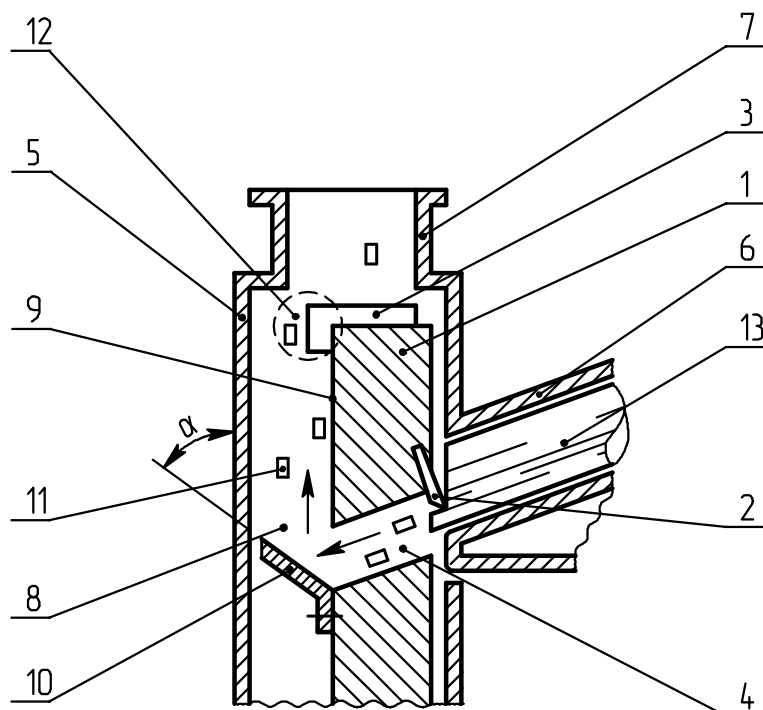


Рис. 2 Принципиальная схема щепообразования механизма резания дисковой рубительной машины

Рубительная машина работает следующим образом. Древесина 13 закладывается в загрузочное устройство 6, включается вращение ножевого диска 1. Ножи 2 срезают толстую стружку, из которой при сдвиге передней гранью режущего ножа образуется одиночный тонкий элемент, называемый технологической щепой. Щепы 11 пролетают через ножевое отверстие 4, взаимодействуют с накладной пластиной 10, отражаются в зону 12 захвата ее лопаткой 3 и выбрасываются в щепоотводящий патрубок 7.

Формой контактной поверхности накладной пластины 10 можно снизить степень повреждения щепы и более точно организовать ориентирование потока щепы из подножевой щели в зону захвата ее лопаткой. Поверхность накладной пластины, взаимодействующая со щепой, должна преобразовать энергию удара щепы о пластину в движение скольжения щепы в сторону зоны 12 захвата щепы лопаткой. Такое преобразование возможно при выполнении пластины параболической формы. Предложенные авторами решения позволили получить технический результат. При взаимодействии древесины с пластиной в подножевой щели

возникает краевой эффект, который выражается в образовании сколов и отщепов. Сами сколы и отщепы способствуют повышению сил трения на боковых участках подножевой щели, что приводит к интенсивному износу диска и возможным его разрывам. Подножевая щель превышает длину режущего ножа, в силу чего боковые грани режущего ножа скалывают и отщипывают ту часть перерабатываемого бревна, которая не опирается жестко на контрнож. Имеется акт внедрения устройства с ограничителем, устраняющего конструктивные недостатки существующих рубительных машин. Острые кромки выступа ограничителя подрезают стружку, что снижает вероятность образования сколов и отщепов. Безотходный процесс резания древесины характеризуется замкнутостью силового пространственного многоугольника, образуемого боковой кромкой режущего ножа и контрножа.

На рис. 3, а показано стружкообразующее устройство; на рис. 3, б – устройство ограничителя в сборе с режущим ножом; на рис. 3, в, г – работа устройства с ограничителем.

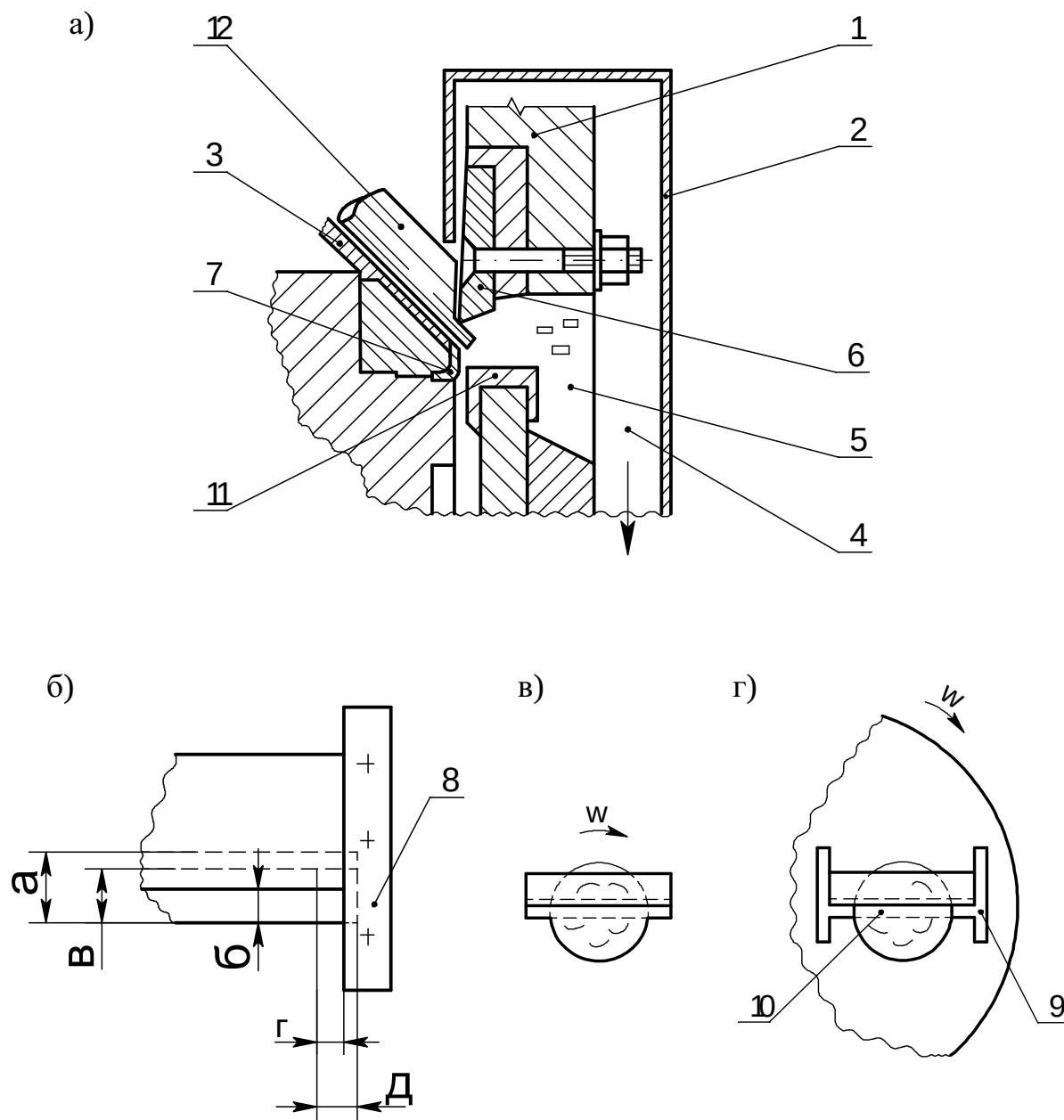


Рис. 3. Стружкообразующее устройство:
а – общий вид; б – устройство ограничителя в сборе с режущим ножом;
в, г – работа устройства с ограничителем



На приводном валу (см. рис. 3, *а*) установлен ножевой диск 1, закрытый кожух 2 с загрузочным устройством 3 и щепоотводом 4. Ножевой диск содержит подножевую щель 5, режущие ножи 6 и контрножи 7. Режущие ножи 6 представляют собой пластину с лезвием, образованным опорной поверхностью и задней гранью. С боков режущего ножа вплотную к его торцам на ножевом диске 1 установлены ограничители 8 (см. рис. 3, *б*). Ограничитель представляет собой пластину с выступом 9 (рис. 3, *з*), закрывающим частично подножевое отверстие 5 (см. рис. 3, *а*) со стороны, обращенной к лезвию режущего ножа 6: *а* – ширина отверстия (см. рис. 3, *б*), *б* – открытая часть ширины и длина отверстия 10, *в* – расстояние от торца выступа до торцевого края подножевой щели. Выступ 9 имеет скос оппозитно задней грани режущего ножа 6. В теле выступа 9 со стороны, противоположной скосу, выполнен посадочный паз, охватывающий установ, обеспечивающий возможность закрепления ограничителей 11 на ножевом диске 1. При загрузке древесины 12 в переработку в загрузочное устройство 3 и включенном электродвигателе ножевой диск 1 совершает вращательное движение вокруг своей оси; заготовка упирается в него под действием составляющей силы резания ножа и веса бревна. Выступы 9 ограничителей 8 обеспечивают фиксацию заготовки древесины в процессе резания ножом 6, тем самым снижают возможность образования сколов и отщепов. В данном техническом устройстве износ подножевого диска стружкой полностью устранен. Достижимый эффект связан с установкой ограничителей, которые позволяют устранить конструктивный недостаток рубительных машин. Критерием оценки качества щепы является стандартный выход фракций, а качество срезов – размерность щепы. Экономический эффект составил около 20 млн р. в год, что подтверждается актом внедрения [3].

Вывод:

- в США одним из путей решения проблемы более полного использования древесного сырья считают измельчение целых деревьев в щепу и использование ее для производства целлюлозы и других волокнистых полуфабрикатов по причине недостатка лесных ресурсов;
- в России решают проблему переработки низкокачественной древесины в щепу путем применения дисковых рубительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Американская техника и промышленность. Сборник рекламных материалов. Вып. 5. Лесная и целлюлозно-бумажная промышленность, 1977 г. США и СССР.
2. Пат. 2179922 Российская Федерация МПК⁷ В 27L 11/00. Рубительная машина для изготовления технологической щепы / Мокрицкий Б. Я., Рубцов Ю. В., Соловьев В. А.; опубл. 2002, Бюл. № 6.
3. Пат. 2172671 Российская Федерация МПК⁷ В 27L 11/00. Станок стружкообразующий / Мокрицкий Б. Я., Рубцов Ю. В., Соловьев В. А.; опубл. 2001; Бюл. № 24.

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ CHRONICLE OF SCIENTIFIC LIFE

Докучаев И. И., Соловьев В. А.
I. I. Dokutchayev, V. A. Solovyev

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РАЙОННЫХ ЦЕНТРОВ (ПО МАТЕРИАЛАМ Г. СОВЕТСКАЯ ГАВАНЬ)

SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT OF SOCIAL-EKONOMIC DEVELOPMENT OF THE REGIONAL CENTERS (ON CITY MATERIALS THE SOVETSKAYA GAVAN)

Докучаев Илья Игоревич – доктор философских наук, профессор, заведующий кафедрой философии и социологии, проректор по связям с общественностью Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ilya_dokuchaev@mail.ru.

Mr. Ilya I. Dokutchayev – Doctor in Philosophy, Professor, Head of the Department of Philosophy and Sociology, Provost for Public Relations, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ilya_dokuchaev@mail.ru.

Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keapu@knastu.ru.

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

Особенностью ряда территориальных образований, входящих в состав Дальневосточного федерального округа, является отсутствие на их территории учебно-научных центров подготовки и переподготовки кадров. В то же время реальная ситуация такова, что те отрасли промышленности, заложенные и развитые еще в советское время, которые обеспечивали социально-экономическую устойчивость территориального образования, или полностью развалились, или находятся в полуживом состоянии. Муниципальные образования вынуждены проводить переориентацию сфер промышленной деятельности в экономически целесообразном для данной территории направлении. При этом реструктуризация протекает, как правило, при практическом отсутствии финансовой поддержки федерального центра и сравнительно низкой квалификации кадрового потенциала. Восполнить кадровый голод специалистами из других регионов можно только при наличии хорошего финансирования оплаты труда и обеспечении достойными жилищными условиями. Другим, менее затратным, путем восполнения кадрового голода является путь подготовки и переподготовки кадров из населения района.

Этот подход был принят за основу в качестве пилотного проекта при заключении соглашения о взаимном сотрудничестве между Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» и Администрацией города Советская Гавань.

При разработке данного проекта приоритетными задачами являлись:

- проведение работ по внедрению стандарта ISO 50001 «Энергоменеджмент на предприятии»;
- организация на основе активных методов обучения подготовки специалистов по направлению энергоэффективность и энергосбережение, необходимых Администрации;
- подготовка на договорной основе (по заказам строительных организаций) студентов-выпускников по дополнительным программам, ориентированным на углубленные знания



в области использования информационных технологий в строительстве;

- проведение совместных научных исследований и внедрение результатов в производство;
- организация курсов повышения квалификации и профессиональной переподготовки для работников Администрации в области энергоэффективности;
- обеспечение всестороннего сотрудничества в области компьютерных технологий и информационных систем;
- организация постоянно действующих курсов по приобретению рабочих профессий, востребованных в территориальном образовании.

Научно-техническое сопровождение поставленных задач предусматривает выполнение Комсомольским-на-Амуре государственным техническим университетом целого комплекса организационно-технических и научно-исследовательских мероприятий.

К числу таковых можно отнести:

1. Разработку программ повышения энергоэффективности для муниципальных образований и предприятий района на основе государственной стратегии повышения энергетической эффективности, законодательных изменений в данной сфере, а также выработку практических рекомендаций по внедрению передовых технологий энергосбережения с перспективами внедрения стандарта ISO 50001 «Энергоменеджмент на предприятии».
2. Организацию и проведение подготовки специалистов в течение 2011-2013 гг. по направлению энергоэффективность в ЖКХ и промышленности.
3. Выполнение опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ по тематике, предложенной Администрацией.
4. Разработку и согласование с Администрацией программ курсов повышения квалификации для работников предприятий и Администрации, организацию их реализации.
5. Оказание услуг по внедрению на предприятиях района систем энергоменеджмента.
6. Проведение работы по созданию в районе малых энергосервисных предприятий.
7. Оказание услуг по сертификации выпускаемой и реализуемой продукции в области энергоэффективности с выдачей знака соответствия и класса энергоэффективности.
8. Оказание услуг по экспертизе разрабатываемых и внедряемых проектов в сфере энергоэффективных технологий.
9. Оказание услуг по подготовке и переподготовке специалистов в области информационных технологий в строительстве (автоматизированное проектирование строительных конструкций в системе AUTOCAD; инженер по проектно-сметной работе; ценообразование и сметное дело в строительстве: ПК «ГРАНД-СМЕТА»; системы автоматизированного проектирования в строительстве на базе ПК «Лира», «Мономах», Mathcad).

14 апреля 2011-го года в присутствии главы администрации города Советская Гавань Павла Юрьевича Боровского, генерального директора ООО «Управление Менеджмент Консалтинг» Юрия Андреевича Дубровина, ректора Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, доктора технических наук, профессора А. М. Шпилева, научного руководителя проекта, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета В. А. Соловьева, проректора по инновационной деятельности Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, доктора технических наук, профессора Э. А. Дмитриева данное соглашение было подписано. В реализации соглашения участвуют «КНАГТУ», Администрация города Советская Гавань и ООО «Управление Менеджмент Консалтинг» (организация, оказывающая финансовое и кад-

Докучаев И. И., Соловьев В. А.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО
РАЗВИТИЯ РАЙОННЫХ ЦЕНТРОВ (ПО МАТЕРИАЛАМ Г. СОВЕТСКАЯ ГАВАНЬ)**

ровое содействие в выполнении соглашения). Срок действия соглашения – до 31 декабря 2011-го года. Однако исполнение мероприятий, включенных в программу, разработанную в ходе реализации соглашения, намечено на период с 2011-го по 2015-й годы. В проекте занято 16 участников (трое от КНАГТУ, пятеро от Администрации города Советская Гавань, восемь от ООО «Управление Менеджмент Консалтинг»). Стороны обязались информировать средства массовой информации и публиковать отчеты о выполнении взятых на себя обязательств на сайтах собственных организаций.

На сегодняшний день в рамках заключенного документа разработаны программы повышения энергоэффективности для пяти муниципальных образований и предприятий района. Проработан эскизный проект модернизации ОАО «Водоканал» г. Советская Гавань, позволяющий существенно снизить потери и расход электроэнергии и воды. Проведено обучение ведущих специалистов предприятий г. Советская Гавань в области энергосбережения и энергоэффективности. Начал работу центр подготовки и обучения рабочим профессиям. Ведутся совместные работы с одной из управляющих компаний города по созданию опытного полигона для разработки и внедрения системы поквартирного учета и мониторинга тепло-, электро- и водопотребления жилых зданий. Внедрение данной разработки позволит существенно снизить финансовые издержки населения района, в котором платежи за тепловую и электроэнергию составляют свыше 4-5 тыс. р. в месяц. Прорабатывается вопрос о подписании договора по подготовке специалистов для вновь строящейся теплоэлектроцентрали.

Сегодня наши дальневосточные территории находятся в депрессивном состоянии. Их население постоянно сокращается, производство сворачивается, условия жизни деградируют. Необходимо искать пути преодоления этого положения дел. Уповать при этом приходится не только на федеральную власть, но и на собственные – региональные и муниципальные возможности. Одним из подобных путей является развитие сотрудничества университета и территории, которое всегда оказывалось чрезвычайно полезным для всех участвующих в нем сторон. Научная работа университетов с администрациями территорий – начинание, которое позволяет организовать практическую активность, обеспечивающую их развитие, на фундаментальных основах, с учетом новейших достижений в социальной и технической сферах науки. Современные подходы к администрированию предполагают как раз подобное обоснование деятельности. Пилотный проект, о котором идет речь в настоящем сообщении, вселяет надежду на то, что депрессивное состояние наших дальневосточных территорий будет преодолено если не в самом ближайшем, то в очень скором времени, а научный потенциал, накопленный университетами, будет реализован на практике.

СТАТЬИ

Математика и механика

Андрианов И.К., Олейников А.И. ПОВЕРХНОСТЬ И ЗАКОН ТЕКУЧЕСТИ ДЛЯ ЖЕСТКО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ С РАЗНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ – №3

Лошманов А.Ю. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ. – №1

Прокудин А.Н. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА – №2

Тарануха Н.А., Петрова А.Н., Любушкина Н.Н. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОЙ СВЯЗИ ИЗ НЕСТАНДАРТИЗИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С БОЛЬШИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ – №1

Авиационная и ракетно-космическая техника

Гусева Р.И. ВЛИЯНИЕ ВАКУУМ-ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ – №2

Гусева Р.И. К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ СБОРКИ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЁТА – №1

Приходько Н.Б. ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ МАССЫ КРЫЛА УНИФИЦИРОВАННОГО САМОЛЁТА – №4

Цуй Сюй, Гусева Р.И., Вэй Ли, Линюни Чжан, Юй Гао. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ – №4

Энергетика

Космынин А.В., Красильникова О.А., Гуменюк Н.С. ОПТИМАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ УПОРНЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ С ПРЯМОТОЧНЫМИ ЛАБИРИНТНЫМИ УПЛОТНЕНИЯМИ – №2

Костюченко В.И. Кузьмин В.М. ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА – №2

Кузьмин В.М., Дубровский И.Н. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ – №3

Нечитайло Т.П., Скоморовский С.А. УГОЛЬНЫЙ БИНАРНЫЙ ПАРОТУРБИННЫЙ ЭНЕРГОБЛОК ДЛЯ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ – №3

Николаенко А.С. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА НА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТ – №3

Петухов А.М., Кузьмин В.М., Дубровский И.Н. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕЩЕННОГО ЭЛЕКТРО-МАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ – №3

Приходченко О.В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ – №3

Стельмашук С.В. АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПИ-РЕГУЛЯТОРА ПО ПРЯМЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ – №4

Степанов А.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ – №3

Суздорф В.И., Кузьмин В.М. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА С ЭЛЕКТРОМАШИНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ КРИВОЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ – №1



Черный С.П., Гусаров А.А. НЕЧЕТКАЯ МНОГОКАСКАДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА – №2

Управление, вычислительная техника и информатика

Виноградов С.В. Щелкунов Е.Б. Щелкунова М.Е. Косицина Л.Г. СТАНОВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЩЕСТВА – №2

Комаровский Ю.А. ТОЧНОСТЬ ДОПЛЕРОВСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ КУЛЬМИНАЦИИ СПУТНИКОВ – №1

Трещев И.А. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ АРХИТЕКТУР С СИММЕТРИЧНО-АДРЕСУЕМОЙ ПАМЯТЬЮ – №1

Машиностроение

Биленко С.В., Муравьев В.И., Саблин П. А., Серебrenикова А.Г. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРЫВНЫХ ФУНКЦИЙ – №4

Димитрюк О.К., Танкова С.Г. АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ БАЗИРОВАНИЯ – №2

Димитрюк О.К., Танкова С.Г. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СЛУЖЕБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ СБОРОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ – №4

Димитрюк О.К., Танкова С.Г. ПОГРЕШНОСТЬ НЕ СОВМЕЩЕНИЯ БАЗ (ПОГРЕШНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ) – №3

Злыгостев А.М. Сариллов М.Ю. Линёв А.С. РОЛЬ ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА И МЕХАНИЗМЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ – №2

Ковбасюк А.А. Сариллов М.Ю. РАЗРАБОТКА СПОСОБА СУШКИ С ПОМОЩЬЮ РЕЗОНАТОРНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА – №2

Космынин А.В., Красильникова О.А., Гуменюк Н.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УПОРНЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ – №3

Ли А., Туркменов Х. И., Рузиев Ш.Н. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ СЕМЕННОГО ВОРОХА В БУНКЕРЕ КЛЕВЕРОТЕРКИ – №3

Мокрицкий Б.Я. Бурков А.А. МЕТОДОЛОГИЯ НЕТРАДИЦИОННОГО КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА – №4

Свиридов А.В. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИТЬЯ В ГИПСОВЫЕ ФОРМЫ – №2

Степаненко В.Е., Фролов Д.Н. Марьин Б.Н. МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ – №3

Тютин Е.А., Шпилева А.А. МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОЛИМЕР - СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ГРАНУЛИРОВАННЫМИ НАНОПОРОШКАМИ – №2

Файзиматов Ш.Н. ПРИМЕНЕНИЕ ПНЕВМОВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПЕРЕКАЧКИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД – №1

Ханов В.А., Марьин Б.Н., Фролов Д.Н., Куриная Н.П., Шпорт Р.В. НЕОБХОДИМОСТЬ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ В РАМКАХ КРУПНОЙ КОРПОРАЦИИ – №3

Шаломов В.И. ИТОГИ ОПЫТНОЙ ПРОВЕРКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ – №4

Щелкунов Е.Б. Хвостиков А.С. МЕТАЛЛООБРАБОТКА 2011 – №4



Металлургия и материаловедение

Колыхалов Д.Г., Марьин Б.Н., Феоктистов С.И., Шпорт Р.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИ-МА ПОЛЫХ И ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛЕДЯНЫХ СТЕРЖНЕЙ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА – №4

Куриный В.В. Свиридов А.В. ОБЗОР МЕТОДОВ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ – №4

Лиманкин В.В., Марьин Б.Н., Ким В.А., Марьин С.Б., Хохлов С.А. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АРМАТУРЫ ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ – №2

Марьин Б.Н., Грачева О.А., Сысоев О.Е., Макаров К.А., Марьин С.Б., Гаряев Р.Ф., Шпилев А.М., Шпорт В.И. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ И ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ПО-СРЕДСТВОМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ВОДЫ – №1

Марьин С.Б. Куриный В.В., Куриная Н.П., Черников Р.В., Прилуцкий Н.В. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШТАМПОВКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «QFORM» В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ОАО «АСКОЛЬД» Г. АРСЕНЬЕВ – №2

Муравьев В.И., Бахматов П.В., Долотов Б.И., Физулаков Р.А., Фролов А.В. ПРОЦЕССЫ УПОРЯДОЧЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ – №1

Муравьев В.И., Евстигнеев А.А., Бахматов П.В., Бутин А.В. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ТСПН – №4

Муравьев В.И., Фролов А.В., Дмитриев Э.А., Башков О.В., Тарасов Е.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ – №3

Перевалов А.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГИБА В РОЛИКАХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ В СИСТЕМЕ MSC MARC – №4

Салина М.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ. ЛИТЬЕ ПО ЛЕДЯНЫМ МОДЕЛЯМ – №3

Салина М.В., Евстигнеев А.И. ВЛИЯНИЕ ВАКУУМИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАЗМЕРНУЮ ТОЧНОСТЬ ВЫПЛАВЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ И ОТЛИВОК В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ – №1

Свиридов А.В. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБОЛОЧКОВЫХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА – №1

Свиридов А.В. СУШКА ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА – №3

Севастьянов Г.М. ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ РАСЧЕТА ГРАНИЦЫ ФРОНТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В РАСПЛАВЕ СТАЛИ – №2

Черномас В.В. Лушников Н.Ю. АНАЛИЗ СТРУКТУР МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ЛИТЕЙНО-КОВОЧНОМ МОДУЛЕ – №2

Черномас В.В., Саликов С.Р. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ МЕТАЛЛО-ИЗДЕЛИЙ НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА – №3

Флот и кораблестроение

Овчинников И.Д. ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В СУДОСТРОЕНИИ – №1

Тарануха Н.А., Кошкин С.В., Селиванов Е.И., Шадрин М.П. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ БУКСИРОВОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ СУДОВ В ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ – №2



Тарануха Н.А., Журбин О.В., Журбина И.Н. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ – №4

Науки о земле и безопасности жизнедеятельности

Афанасьева И.В., Анисимов В.В. ОЦЕНКА КАНЦЕРОГЕННОГО РИСКА ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ГРУПП ООО «РН-КОМСОМОЛЬСКОГО НПЗ» – №4

Воронова В.В. АНАЛИЗ НАРУШЕНИЙ ПЕРСОНАЛОМ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ – №2

Гореликова Е.И., Гаврилова М.В., Степанова И.П. ОЦЕНКА ИНГАЛЯЦИОННОГО КАНЦЕРОГЕННОГО РИСКА ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ ОТ СВИНЦОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ – №1

Клинская Е.О., Христофорова Н.К. БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРИДОРОЖНЫХ ЗОН ГОРОДОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА ПО СОДЕРЖАНИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОДУВАНЧИКАХ – №1

Марченко Л., Христофорова Н.К., Чернова Е.Н. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В МАССОВЫХ ВИДАХ РЫБ ЮЖНОГО ПРИМОРЬЯ – №1

Никифорова Г.Е. РОЛЬ ШУМОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ ТРАНСПОРТА В СОВРЕМЕННОМ ГОРОДЕ – №1

Рубцов Ю.В., Рудько С.В., Коннова Г.В. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ НИЗКОКАЧЕСТВЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ НА ЩЕПУ РУБИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ В США И РОССИИ – №4

Степанова И.П., Осколова И.Д. АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАВМАТИЗМА НА ОАО «АМУРМЕ-ТАЛЛ» МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ – №3

Строительство и архитектура

Баженов В.П., Насонова М.С. РАСТУЩИЙ ДОМ И ПОВЫШЕНИЕ ОСЕДЛОСТИ НАСЕЛЕНИЯ КАК УСЛОВИЕ РАЗВИТИЯ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ – №1

Чернышев Н.И., Сысоев Е.О. МОСТОВАЯ СИСТЕМА КАК ОСНОВА РЕАЛИЗАЦИИ ТОЧЕЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ – №1

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ

Дмитриев Э.А., Ри Д.Х. ИТОГИ V МЕЖДУНАРОДНОГО ФОРУМА «ОТ НАУКИ К БИЗНЕСУ» «СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВУЗОВ С НАУКОЕМКИМ БИЗНЕСОМ» – №3

Докучаев И.И. ВИКТОР ПОРФИРЬЕВИЧ БАЖЕНОВ. ПАМЯТИ УЧЕНОГО И РЕДАКТОРА – №2

Докучаев И.И., Соловьев В.А. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РАЙОННЫХ ЦЕНТРОВ (ПО МАТЕРИАЛАМ Г. СОВЕТСКАЯ ГАВАНЬ) – №4

Евстигнеев А.И., Мокрицкий Б.Я. ОБЗОР НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ КНАГТУ ЗА 2010 ГОД – №2

Олейников А.И. ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ШКОЛА ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ ОСНОВАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ» – №2